



**Diagrammverstehen in der Biologie –
Förderung des Diagrammverstehens durch Anregung zur Bildung
translationaler Kohärenz**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
des Doktors der Erziehungswissenschaften (Dr. paed.)
an der Westfälischen Wilhelms-Universität
Münster

vorgelegt von
Lars Jahnke
geb. in Münster

Münster 2020

Erstgutachter

Prof. Dr. Marcus Hammann

Zweitgutachter:

Prof. Dr. Helge Gresch

Tag der mündlichen Prüfung:

08.01.2020

Zusammenfassung

Das Verstehen von Liniendiagrammen stellt für Lernende insbesondere im Biologieunterricht häufig eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Das Forschungsvorhaben hat daher zum Ziel, Lernende beim Verstehen entsprechender Liniendiagramme zu fördern. Das Konstrukt Diagrammverstehen wird dazu auf Grundlage einer intensiven Literaturrecherche theoretisch konzeptualisiert. Darauf aufbauend werden in einem iterativen Entwicklungsforschungsprozess Probleme und Förderbedarfe von Lernenden identifiziert und instruktionale Maßnahmen zur Förderung des Diagrammverstehens entwickelt.

Entwickelt wird eine Kombination aus Selbstlernaufgaben, in denen Lernende beim Strukturieren eines Diagramms in bedeutungsvolle Zeichen und beim elaborativen Interrogieren, dem Stellen von Fragen an das Diagramm, unterstützt werden sowie eine Kombination aus den genannten Maßnahmen in Verbindung mit kognitiv aktivierenden Aufgaben. Die Wirksamkeit der beiden Maßnahmen-Kombinationen wird in einem Interventions-Kontrollgruppen-Design, aufbauend auf verschiedenen Voruntersuchungen, empirisch evaluiert. Lernende (N = 504) sollen zu diesem Zweck, verteilt auf verschiedene Interventions- und Kontrollgruppen, die Graphenverläufe eines komplexen Liniendiagramms aus dem Themenbereich Enzymatik kausal erklären. Aufbauend auf den Erklärungen der Lernenden wird das Konstrukt Diagrammverstehen in einem Prozess aus deduktiv-induktiver Kategorienbildung operationalisiert.

Die Maßnahmen erwiesen sich als geeignet, das Diagrammverstehen von Lernenden zu fördern. Zugleich wurden im Rahmen der empirischen Untersuchung Lern- und Verstehenshürden sichtbar, die in Zusammenhang mit Diagrammverstehen in dieser Tiefe bisher noch nicht beschrieben werden konnten.

Um die Hürden und ihre Überwindung systematisch zu analysieren, wird auf Grundlage der theoretisch und der empirisch gewonnenen Erkenntnisse theoriebildend ein Modell des Diagrammverstehens entwickelt, das zyklisch-progressives Modell des Diagrammverstehens (ZP-Modell). Das ZP-Modell beschreibt Diagrammverstehen als einen zyklisch-progressiven Analyseprozess, in dem durch iterativ ablaufende, kohärenzbildende Translationsprozesse zwischen grafischer Darstellung und referierter inhaltlicher Situation die in dem Diagramm grafisch zusammengefassten Zusammenhänge mental rekonstruiert und erklärt werden.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abkürzungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis.....	VI
Abbildungsverzeichnis	VIII
1. Einführung in das Thema Diagrammverstehen	1
2. Übersicht über den Forschungsprozess.....	5
3. Theoretische Konzeptualisierung von Diagrammverstehen	9
3.1. Konzeptualisierung von (Linien-)Diagrammen	9
3.2. Diagrammverstehen – eine vorläufige Definition.....	13
3.3. Diagrammverstehen in verschiedenen Kontexten.....	13
3.3.1. Diagrammverstehen in mathematisch-statistischen Kontexten.....	14
3.3.2. Diagrammverstehen in naturwissenschaftlichen Kontexten.....	15
3.4. Dimensionen des Diagrammverstehens	16
3.4.1. Dimension Informationsentnahme.....	17
3.4.2. Dimension Interpretieren	18
3.4.3. Dimension Erklären	19
3.5. Erklären im Kontext des Diagrammverstehens.....	21
3.6. Diagrammverstehen als Problemlöseprozess	24
3.7. Diagrammverstehen als Translationsprozess	26
3.7.1. Translationen zwischen Situations- und Graphenraum.....	26
3.7.2. Translationen innerhalb des Situationsraums	31
3.7.3. Bildung translationaler Kohärenz	35
3.8. Kognitionspsychologische Aspekte des Diagrammverstehens.....	36
3.8.1. Einführung in das Konzept mentaler Repräsentationen	36
3.8.2. Kognitionspsychologische Modelle des Diagrammverstehens	44
3.8.3. Cognitive-Load-Theorie (CLT).....	55
3.9. Zusammenfassung	61
4. Identifikation von Problemen und Förderbedarfen (F1).....	63
4.1. Herleitung von Forschungsfrage 1	63

4.2. Kompetenzorientierte Perspektive	65
4.2.1. Analyse einfacher Tätigkeiten	65
4.2.2. Analyse komplexerer Tätigkeiten	73
4.2.3. Exemplarische Studien zur Informationsentnahme und zum Extrapolieren	79
4.3. Defizitorientierte Perspektive	91
4.3.1. Exemplarische Studien zu Missinterpretationen	92
4.3.2. kognitionspsychologische Erklärungsansätze für Missinterpretationen	100
4.4. Prozessorientierte Perspektive	110
4.4.1. Diagrammverstehen als semiotischer Prozess.....	111
4.4.2. Exemplarische Studien zum Vorgehen beim Interpretieren	121
4.5. Beantwortung von Forschungsfrage 1	132
5. Identifikation von Förderkonzepten (F2)	139
5.1. Herleitung von Forschungsfrage 2.....	139
5.2. Diagrammverstehen als Prozess	141
5.2.1. Vorikonografische Beschreibung.....	142
5.2.2. Ikonografische Analyse.....	143
5.2.3. Ikonologisches Interpretieren.....	144
5.2.4. Prozessmodell des Diagrammverstehens	145
5.3. Identifikation potenzieller Förderkonzepte.....	147
5.3.1. Analyse empirischer Studien.....	148
5.3.2. Deduktion von Förderkonzepten.....	154
5.4. Empirische Voruntersuchungen zur Spezifikation der Förderkonzepte.	161
5.5. Beantwortung von Forschungsfrage 2	165
6. Evaluation der instruktionalen Maßnahmen in Hinblick auf das Erklären (F3)	169
6.1. Herleitung von Forschungsfrage 3	169
6.2. Forschungsmethodik zur Beantwortung von Forschungsfrage 3	171
6.2.1. Lernmaterialien und instruktionale Maßnahmen	171
6.2.2. Untersuchungsdesign.....	182
6.2.3. Stichprobe.....	186
6.2.4. Durchführung der Untersuchung.....	187

6.2.5. Beschreibung der Variablen.....	188
6.2.6. Verwendung quantitativer Methoden	194
6.3. Auswertung zur Beantwortung von Forschungsfrage 3	198
6.3.1. Ergebnisse der Auswertung des Vorwissenstests	198
6.3.2. Ergebnisse der Gruppenvergleiche	204
6.4. Beantwortung von Forschungsfrage 3.....	211
7. Operationalisierung Diagrammverstehen (F4).....	217
7.1. Herleitung von Forschungsfrage 4	217
7.2. Theoretische Erweiterung: epistemische Perspektive	219
7.2.1. Komplexes Schlussfolgern im Kontext von Diagrammen	220
7.2.2. Einführung in das abduktive Schlussfolgern	223
7.2.3. Abduktives und induktives Erklären.....	228
7.2.4. Interaktion von Schlussfolgerungsarten im Erkenntnisprozess.....	230
7.2.5. Einordnung der Erkenntnisse in die bestehende theoretische Fundierung	234
7.3. Analyse von Lernervoraussetzungen.....	235
7.3.1. Vertiefende Analyse des Vorwissenstests	236
7.3.2. Schülervorstellungen zum Themenbereich Enzymatik	249
7.3.3. Empirische Analyse der Schulbuchliteratur	251
7.4. Forschungsmethodik zur Beantwortung von Forschungsfrage 4.....	260
7.5. Theoretische Entwicklung des Kategoriensystems	261
7.6. Spezifizierung der Kategorien anhand von Lernerantworten	265
7.6.1. Niveau 1: Perzeptuelles Analysieren	265
7.6.2. Niveau 2: Induktives Erklären	271
7.6.3. Niveau 3: Abduktives Erklären.....	279
7.6.4. Niveau 4: Abduktives Erklären unter kritischer Evaluation von Schlussfolgerungen.....	307
7.6.5. Niveau 5: Eingeschränktes Denken in Wahrscheinlichkeiten.....	315
7.6.6. Niveau 6: Umfassendes Denken in Wahrscheinlichkeiten.....	320
7.7. Beantwortung von Forschungsfrage 4.....	328
8. Evaluation der instruktionalen Maßnahmen in Hinblick auf das Diagrammverstehen (F5).....	333
8.1. Herleitung von Forschungsfrage 5	333

8.2. Forschungsmethodik zur Beantwortung von Forschungsfrage 5	334
8.3. Auswertung zur Beantwortung von Forschungsfrage 5	336
8.3.1. Analyse des Messinstruments zur Erfassung der kognitiven Belastung	336
8.3.2. Überprüfung der Randomisierung in Hinblick auf vorwissensgestützte Schlussfolgerungsfähigkeiten.....	343
8.3.3. Ergebnisse der Gruppenvergleiche.....	344
8.4. Beantwortung von Forschungsfrage 5	363
9. Entwicklung des zyklisch-progressiven Modells des Diagrammverstehens (F6).....	369
9.1. Herleitung von Forschungsfrage 6.....	369
9.2. Zyklisch-progressives Modell des Diagrammverstehens	369
9.3. Analyse von Lern- und Verstehenshürden und ihrer Überwindung	374
9.3.1. Abstraktionshürde.....	375
9.3.2. Abduktionshürde	376
9.3.3. Revisionshürde	377
9.4. Beantwortung von Forschungsfrage 6	380
10. Diskussion der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse.....	381
11. Konsequenzen für die Schulpraxis	383
12. Ausblick	387
13. Literaturverzeichnis	389
14. Anhang.....	449
14.1. Titelblatt des Untersuchungsheftes	449
14.2. Vorwissenstest.....	450
14.3. Lernmaterialien	453
14.3.1. Lernmaterialien der Interventionsgruppe-I-S-EI-Erk	453
14.3.2. Lernmaterialien der Kontrollgruppe-K-Erk	457
14.3.3. Lernmaterialien der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk.....	460
14.3.4. Lernmaterialien der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk.....	466
14.3.5. Lernmaterialien der Kontrollgruppe-K-Be-Erk	471
14.4. Selbsteinschätzung	476

Abkürzungsverzeichnis

AIME	Amount of Invested Mental Effort
CFI	Comparative Fit Index
ECL	Extraneous Cognitive Load
EF	Einführungsphase
F1- F6	Forschungsfragen 1 bis 6
GCL	Germane Cognitive Load
GFI	Goodness of Fit Index
I-KA-S-EI- Erk	Instruktion (I) – <i>Kognitive Aktivierung</i> (KA) – Unterstützung bei der <i>Strukturierung</i> (S) – Unterstützung bei der <i>elaborativen Interrogation</i> (EI)
I-S-EI-Erk	Instruktion (I) – Unterstützung bei der <i>Strukturierung</i> (S) – Unterstützung bei der <i>elaborativen Interrogation</i> (EI)
ICL	Intrinsic Cognitive Load
K-Erk	Kontrolle (K) – Erklären (Erk)
K-Be-Erk	Kontrolle (K) – Beschreiben (Be) – Erklären (Erk)
K-Erk-Be- nErk	Kontrolle (K) – Erklären (Erk) – Beschreiben (Be) – nachträglich Erklären (Erk)
KMK	Kultusministerkonferenz
OECD	Organisation for Economic Co-Operation and Development
PISA	Program for International Student Assessment
RMSEA	Root Mean Square of Error Approximation
SRMR	Standardized Root Mean Square Residual
TOGS	Test of Graphing in Science
TIMSS	Third International Mathematics and Science Study
ZP-Modell	zyklisch-progressives Modell des Diagrammverstehens

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1.</i> Niveaus statistischer Fähigkeiten nach Kimura (1999) (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Kimura 1999, zitiert nach Aoyama & Stephens 2003, S. 210)	76
<i>Tabelle 2.</i> Fünf Stufen der Diagramminterpretation nach Aoyama (2006) (aus dem Englischen nach Aoyama 2006, S. 5; siehe dazu auch Aoyama 2007).	78
<i>Tabelle 3.</i> Kategorisierung der in Kapitel 1 beschriebenen empirischen Studien, geordnet nach Forschungsperspektiven und Dimensionen des Diagrammverstehens.....	136
<i>Tabelle 4.</i> Übersicht über die Wahrscheinlichkeit des Aufeinandertreffens von Enzym- und Substratmolekülen.....	177
<i>Tabelle 5.</i> Übersicht über die Interventions- und Kontrollgruppen des Forschungsvorhabens	183
<i>Tabelle 6.</i> Übersicht über die acht erklärungsrelevanten Aspekte des Untersuchungsdiagramms und der erwarteten Erklärungen	193
<i>Tabelle 7.</i> Übersicht über Hinweise zur Verteilung und Streuung der analysierten Merkmale in den Vergleichsgruppen und Empfehlung eines Testverfahrens.....	197
<i>Tabelle 8.</i> Items des nach Itemanalyse überarbeiteten Vorwissenstests	200
<i>Tabelle 9.</i> Ergebnisse des Vorwissenstests (N= 504)	201
<i>Tabelle 10.</i> Im Vorwissenstest erreichte Punktzahl, geordnet nach Vergleichen zur Beantwortung der Forschungsfragen 3a und 3b	203
<i>Tabelle 11.</i> Anzahl der bei der Erklärung des Diagramms verschriftlichten Wörter, geordnet nach Vergleichen zur Beantwortung der Forschungsfragen 3a und 3b	205
<i>Tabelle 12.</i> Vollständigkeit der Erklärung, geordnet nach Vergleichen zur Beantwortung der Forschungsfragen 3a und 3b	207
<i>Tabelle 13.</i> Selbsteinschätzung der Lernenden in Hinblick auf ihre Leistung beim Erklären des Diagramms, geordnet nach Vergleichen zur Beantwortung der Forschungsfragen 3a und 3b.....	208
<i>Tabelle 14.</i> Kognitive Belastung der Lernenden beim Erklären des Diagramms, geordnet nach Vergleichen zur Beantwortung der Forschungsfragen 3a und 3b	210
<i>Tabelle 15.</i> Ergebnisse, der auf den Vorwissenstest angewandten Hauptkomponentenanalyse. Dargestellt sind Items des Vorwissenstests inklusive ihrer Ladungen auf die drei Faktoren.	241
<i>Tabelle 16.</i> Übersicht über die aus dem Vorwissenstest extrahierten Schlussfolgerungsfaktoren	246
<i>Tabelle 17.</i> Explorative Typologisierung von Lernenden in mögliche Analysetypen.....	248
<i>Tabelle 18.</i> Übersicht über die analysierten Schulbücher	252
<i>Tabelle 19.</i> Kodierleitfaden für die Zuordnung von Lernerantworten zu den Verstehensniveaus.....	331
<i>Tabelle 20.</i> Übersicht über Hinweise zur Verteilung und Streuung der analysierten Merkmale in den Vergleichsgruppen und Empfehlung eines Testverfahrens.....	335

<i>Tabelle 21.</i> Ergebnisse, der auf den Fragebogen zur Selbsteinschätzung der kognitiven Belastung angewandten Hauptkomponentenanalyse. Dargestellt sind Items der Selbsteinschätzung der kognitiven Belastung inklusive ihrer Ladungen auf die drei Faktoren ICL, GCL und ECL.....	338
<i>Tabelle 22.</i> Gütemaße (Fit-Indizes) zur Beurteilung der Daten-Modell-Passung.....	339
<i>Tabelle 23.</i> Ergebnisse der konfirmatorischen Faktorenanalyse	340
<i>Tabelle 24.</i> Ergebnisse der Erhebung der kognitiven Belastung, differenziert nach ICL, GCL und ECL.....	342
<i>Tabelle 25.</i> Vergleich von Lernenden der einzelnen Gruppen in Hinblick auf das von ihnen erreichte Verstehensniveau, geordnet nach Vergleichen zur Beantwortung der Forschungsfragen 5a und 5b.....	345
<i>Tabelle 26.</i> Kontingenztabelle der Verteilung der Lernenden der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk und der Kontrollgruppe K-Erk auf die sechs Verstehensniveaus, Vergleich zur Beantwortung der Forschungsfrage 5a.....	350
<i>Tabelle 27.</i> Kontingenztabelle der Verteilung der Lernenden der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk sowie der Kontrollgruppen K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk auf die sechs Verstehensniveaus, Vergleich zur Beantwortung der Forschungsfrage 5b.....	352
<i>Tabelle 28.</i> Kontingenztabelle der Verteilung der Lernenden aller fünf Gruppen auf die vier Analysekatgorien NICHT-Abstrahierer*innen (Kategorie 1), NICHT-Abduzierer*innen (Kategorie 2), NICHT-Revidierer*innen (Kategorie 3) und Erklärer*innen (Kategorie 4).....	356
<i>Tabelle 29.</i> Kognitive Belastung von Lernenden beim Lernen mit dem Diagramm differenziert in ECL, ICL und GCL, geordnet nach Vergleichen zur Beantwortung der Forschungsfragen 5a und 5b.....	357
<i>Tabelle 30.</i> Mentale Effektivität von Lernenden beim Lernen mit dem Diagramm, geordnet nach Vergleichen zur Beantwortung der Forschungsfragen 5a und 5b.....	361

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1.</i> Aufbau von Liniendiagrammen (aus dem Englischen übersetzt und modifiziert durch Verfasser nach Kosslyn 1989, S. 188).....	12
<i>Abbildung 2.</i> Zusammenhang zwischen Diagrammerklären und Diagrammverstehen (eigene Darstellung).....	20
<i>Abbildung 3.</i> Translationen zwischen Interpretationsräumen (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Leinhardt et al. 1990, S. 9).	27
<i>Abbildung 4.</i> Interpretation eines Diagramms als iterative Translation zwischen Graphen- und Situationsraum (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Ferry 1997, zitiert nach Janvier 1978)	29
<i>Abbildung 5.</i> Translationsachsen innerhalb des Situationsraums, dargestellt anhand des Cube-Modells (aus dem Englischen nach Tsui & Treagust 2013, S. 10).....	33
<i>Abbildung 6.</i> Übersicht über verschiedene mentale Repräsentationsformen (eigene Darstellung).....	37
<i>Abbildung 7.</i> Modell des Diagrammverstehens nach Pinker 1990 (aus dem Englischen nach Pinker 1990, S. 104).....	44
<i>Abbildung 8.</i> Construction-Integration-Modell (CI-Modell) des Diagrammverstehens nach Freedman und Shah 2002 (aus dem Englischen nach Freedman & Shah 2002, S. 21) .	51
<i>Abbildung 9.</i> Modell des Abbildungsverstehens nach Hegarty (2011) (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Hegarty 2011, S. 453).....	53
<i>Abbildung 10.</i> Kognitive Architektur des Menschen (nach Lingnau et al. 2013, S. 8)	56
<i>Abbildung 11.</i> Strukturmodell der Diagrammkompetenz nach Lachmayer (2008) (nach Lachmayer 2008, S. 43)	71
<i>Abbildung 12.</i> Beispielitem aus der Untersuchung von McKenzie und Padilla (1986) zur Erfassung der Fähigkeit von Lernenden Diagramme zu interpretieren. Dargestellt sind Wachstumshöhen verschiedener Pflanzen, die in unterschiedlich großen Töpfen kultiviert wurden (aus dem Englischen nach McKenzie & Padilla 1986, S. 575).....	80
<i>Abbildung 13.</i> Beispielitem aus der Untersuchung von Keller (2008) zur Erfassung der Fähigkeit von Lernenden Diagramme ganzheitlich zu lesen. Dargestellt sind in dem Diagramm die Wachstumshöhen verschiedenen Pflanzen, die mit unterschiedlichen Mengen Wasser bewässert wurden (aus dem Englischen nach Keller 2018, S. 214)....	82
<i>Abbildung 14.</i> TIMS-Item zur Erfassung der Fähigkeit von Lernenden Graphen zu extrapolieren. Dargestellt ist der Zusammenhang zwischen dem Bremsweg und der Geschwindigkeit eines Fahrzeuges (in Anlehnung an Baumert et al. 1998, S. 48).	87
<i>Abbildung 15.</i> Beispielitem aus der Studie von Pereira-Mendoza und Mellor (1991) zur Erfassung der Fähigkeit von Lernenden Daten zu extrapolieren. Dargestellt sind die Körpergrößen von vier Personen unterschiedlichen Alters (aus dem Englischen nach Pereira-Mendoza & Mellor 1991, S. 153).....	88
<i>Abbildung 16.</i> Beispielitem aus der Untersuchung von Lachmayer (2008) zur Analyse der Fähigkeit von Lernenden Graphen zu extrapolieren. Dargestellt ist eine Räuber-Beute-Beziehung zwischen Schildläusen und Marienkäfern (in Anlehnung an Lachmayer 2008, S. 35).	90

<i>Abbildung 17.</i> Diagramm aus der Untersuchung von Barclay (1986) zur Analyse der Fähigkeit von Lernenden Graphen zu extrapolieren. Dargestellt ist die Abkühlungskurve einer chemischen Substanz bei Raumtemperatur, die zuvor auf 80 °C erhitzt wurde (aus dem Englischen nach Barclay 1986, S. 4).	91
<i>Abbildung 18.</i> Diagramm aus der Untersuchung von Bell und Janvier (1981) zur Analyse der Intervall-Punkt-Konfusion. Dargestellt ist die Veränderung des Körpergewichts im Alter von null bis zwanzig Jahren (aus dem Englischen nach Bell & Janvier 1981, S. 37).....	93
<i>Abbildung 19.</i> Ort-Zeit-Diagramm aus der Untersuchung von McDermott et al. (1987) zur Analyse der der Höhe-Steigungs-Konfusion (aus dem Englischen nach McDermott et al. 1987, S. 504).....	94
<i>Abbildung 20.</i> Weg-Zeit-Diagramme aus der Untersuchung von Kerslake (1981) zur Analyse der ikonischen Konfusion (aus dem Englischen nach Kerslake 1981, S. 128).	96
<i>Abbildung 21.</i> Diagramm aus der Untersuchung von Janvier (1998) zur Analyse der Fähigkeit von Lernenden Diagramme zu interpretieren. Dargestellt ist der Durchmesser von Bakterienkulturen, die bei unterschiedlichen Temperaturen kultiviert wurden (aus dem Englischen nach Janvier 1998, S. 83).....	97
<i>Abbildung 22.</i> Diagramm aus der Untersuchung von Bell und Janvier (1981) zur Analyse der situationalen Distraction. Dargestellt ist die Entwicklung von zwei Bakterienpopulationen im Verlauf der Zeit (aus dem Englischen nach Bell & Janvier 1981, S. 37).....	99
<i>Abbildung 23.</i> Diagramm aus der Untersuchung von Bell & Janvier (1981) zur Analyse der bildlichen Distraction. Diagramm a zeigt die Geschwindigkeit eines Rennwagens auf einer Rennstrecke, Diagramm b zeigt den möglichen Rennstreckenverlauf (aus dem Englischen nach Bell & Janvier 1981, S. 38; siehe dazu auch Janvier 1981).	100
<i>Abbildung 24.</i> Modell des Text- und Bildverstehens (nach Bannert & Schnotz 2006, S. 76; siehe dazu auch Schnotz & Bannert 1999, 2003).	101
<i>Abbildung 25.</i> Diagramm, das den zeitlichen Verlauf des Spaziergangs einer Reisegruppe zeigt, sowie eine mögliche (ikonische) Missinterpretation des Diagramms (siehe Text rechts, aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Swan 1985, S. 211).....	103
<i>Abbildung 26.</i> Erläuterung der konfundierenden Wirkung von Vorstellungsbildern auf das Interpretieren von Diagrammen (modifiziert durch den Verfasser nach Bannert & Schnotz 2006, S. 76).....	104
<i>Abbildung 27.</i> Prozessmodell des universellen diagnostischen Schlussfolgerns (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Croskerry et al. 2013, S. 60; siehe dazu auch Croskerry 2009).....	108
<i>Abbildung 28.</i> Zusammenhang zwischen kognitiver Belastung und Komplexität der Anforderungssituation bei Anwendung unterschiedlicher Problemlösestrategien (modifiziert durch den Verfasser nach Bassler 2010, S. 73).....	110
<i>Abbildung 29.</i> Semiotische Triade nach Charles Sanders Peirce (1839-1914) (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Seeger 2005, S. 72)	111
<i>Abbildung 30.</i> Semiotisches Modell des Interpretierens von Diagrammen (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Roth et al. 2002, S. 333; siehe dazu auch Roth & Bowen 2001, 2003).....	117

<i>Abbildung 31.</i> Netzwerk aus semiotischen Triaden (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Seeger 2005, S. 72).....	120
<i>Abbildung 32.</i> Liniendiagramm aus der Untersuchung von Maichle (1994) zur Analyse der Fähigkeiten von Lernenden eigenständig Diagramme zu interpretieren. Dargestellt ist der Zusammenhang zwischen Blutdruck und Lebensalter, differenziert in Männer und Frauen (aus dem Englischen nach Maichle 1994, S. 209).....	124
<i>Abbildung 33.</i> Diagramm A aus der Untersuchung von Preece und Janvier (1992, 1993) zur Analyse der Fähigkeit Diagramme zu interpretieren. Dargestellt ist die Veränderung der Lichtmenge und der Anzahl an Fingerhüten unter einem Baum in einem Obstgarten (aus dem Englischen nach Preece & Janvier 1993, S. 199).....	128
<i>Abbildung 34.</i> Diagramm B aus der Untersuchung von Preece und Janvier (1992, 1993) zur Analyse der Fähigkeit Diagramme zu interpretieren. Dargestellt ist die Veränderung der Sauerstoffkonzentration und der Anzahl an Schrimps in einem Fluss (aus dem Englischen nach Preece & Janvier 1993, S. 199)	129
<i>Abbildung 35.</i> Analyse der Studien zum Diagrammverstehen aus kompetenzorientierter, defizitorientierter und prozessorientierter Forschungsperspektive (eigene Darstellung).	133
<i>Abbildung 36.</i> Forschungsfrage 2 und die Forschungsfrage vorbereitende Unterfragen (eigene Darstellung).....	140
<i>Abbildung 37.</i> Prozessmodell des Diagrammverstehens, gegliedert in vorikonografisches Beschreiben, ikonografisches Analysieren und ikonologisches Interpretieren (eigene Darstellung).....	146
<i>Abbildung 38.</i> Zusammenhang zwischen kognitiven Hilfen und inhaltlichen Zusammenhangs- sowie kausal erklärenden Aussagen (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Mautone & Mayer 2007, S. 641).....	150
<i>Abbildung 39.</i> Zusammenhang zwischen Förderkonzepten und Diagrammverstehen (eigene Darstellung).....	156
<i>Abbildung 40.</i> Einordnung der Förderkonzepte in den Prozess des Diagrammverstehens, T = Translation (eigene Darstellung).....	167
<i>Abbildung 41.</i> Gliederung von Forschungsfrage 3 in die Unterfragen 3a und 3b (eigene Darstellung).....	170
<i>Abbildung 42.</i> Untersuchungsdiagramm und Informationsmaterialien, die in der hier durchgeführten Untersuchung verwendet wurde (modifiziert durch den Verfasser nach Bettina Zeis 2014). Dargestellt ist die Veränderung der Produktkonzentration einer enzymatischen Reaktion im Verlauf der Zeit in drei Versuchen (A, EK05 und SK05).	172
<i>Abbildung 43.</i> Lernmaterial zu Aufgabe 1 (eigene Darstellung).	175
<i>Abbildung 44.</i> Informationen zu den drei Versuchen (eigene Darstellung).....	176
<i>Abbildung 45.</i> Lernmaterial zu Aufgabe 2 (eigene Darstellung)	177
<i>Abbildung 46.</i> Lernmaterial zu den Aufgabe 4 und 5 (eigene Darstellung).	179
<i>Abbildung 47.</i> Übersicht über das Untersuchungsdesign (eigene Darstellung).....	184
<i>Abbildung 48.</i> Gruppenvergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 3a (eigene Darstellung).....	184

<i>Abbildung 49.</i> Gruppenvergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 3b (eigene Darstellung)	185
<i>Abbildung 50.</i> Items zur Erfassung der kognitiven Belastung (eigene Darstellung).....	190
<i>Abbildung 51.</i> Untersuchungsdiagramm (Darstellung der Veränderung der Produktkonzentration in drei Versuchen A, EK05 und SK05), das mit elaborierenden-interrogativen Fragen annotiert wurde (modifiziert durch den Verfasser nach Bettina Zeis 2014).....	192
<i>Abbildung 52.</i> Boxplot und Histogramm der Verteilung der Gesamtpunktzahl der einzelnen Lernenden im Vorwissenstest (eigene Darstellung)	202
<i>Abbildung 53.</i> Forschungsfrage 4 und die Forschungsfrage vorbereitende Unterfragen (eigene Darstellung)	218
<i>Abbildung 54.</i> Übersicht über verschiedene Formen abduktiven Schlussfolgerns (eigene Darstellung nach Magnani 2001; 2004; 2009)	225
<i>Abbildung 55.</i> Naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinn durch Zusammenwirken von abduktiven, deduktiven und induktiven Schlussfolgerungen (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Flach & Kakas 2000, S. 7)	231
<i>Abbildung 56.</i> Interaktion von Schlussfolgerungsarten im Select-&-Test-Modell (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Stefanelli & Ramoni 1992, S. 10; siehe dazu auch Ramoni et al. 1992, Magnani 1992).....	232
<i>Abbildung 57.</i> Erweiterung des perspektivischen Ansatzes aus Abschnitt 4.5 um eine epistemische Forschungsperspektive auf das Diagrammverstehen (eigene Darstellung)	235
<i>Abbildung 58.</i> Scree-Plot der Hauptkomponentenanalyse (eigene Darstellung)	238
<i>Abbildung 59.</i> Item 1 aus dem Vorwissenstest zur Erfassung des enzymatischen Vorwissens (eigene Darstellung)	240
<i>Abbildung 60.</i> Exemplarische Rekonstruktion eines Schulbuchdiagramms aus dem Themenbereich Enzymatik, das den Zusammenhang zwischen der Reaktionsgeschwindigkeit einer enzymatischen Reaktion und der Substratkonzentration veranschaulicht (modifiziert durch den Verfasser nach Grüne Reihe 2014, S. 28).	254
<i>Abbildung 61.</i> Potenzielle (Fehl-)Vorstellung über den Zusammenhang der Reaktionsgeschwindigkeit und der (Reaktions-)zeit, die von Lernenden auf Grundlage der analysierten Schulbuchtexte möglicherweise entwickelt werden könnte (eigene Darstellung).	256
<i>Abbildung 62.</i> Exemplarische Rekonstruktion von Schulbuchdarstellungen, die enzymatische Reaktionen auf Teilchenebene im zeitlichen Verlauf veranschaulichen (modifiziert durch den Verfasser nach Grüne Reihe 2014, S. 28).....	259
<i>Abbildung 63.</i> Deduktiv gebildete Kategorien des Diagrammverstehens (eigene Darstellung)	262
<i>Abbildung 64.</i> Visueller Kurzschluss beim Diagrammverstehen (eigene Darstellung aufbauend auf dem Modell des Text- und Bildverstehens nach Bannert & Schnotz 2006, S. 76).....	270
<i>Abbildung 65.</i> Induktiver Kurzschluss beim Diagrammverstehen (eigene Darstellung aufbauend auf dem ST-Modell nach Stefanelli & Ramoni 1992, S. 10).....	279

<i>Abbildung 66.</i> Vorstellungen von Lernenden, die in der hier durchgeführten empirischen Untersuchung identifiziert werden konnten (eigene Darstellung)	280
<i>Abbildung 67.</i> Abduktiver Kurzschluss beim Diagrammverstehen (eigene Darstellung aufbauend auf dem ST-Modell nach Stefanelli & Ramoni 1992, S. 10)	306
<i>Abbildung 68.</i> Einfacher, vollständiger Erkenntniszyklus beim Diagrammverstehen (eigene Darstellung aufbauend auf dem ST-Modell nach Stefanelli & Ramoni 1992, S. 10)..	314
<i>Abbildung 69.</i> Vergleich der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk mit der Kontrollgruppe K-Erk in Hinblick auf das von den jeweiligen Lernenden im Median erreichte Verstehensniveau (eigene Darstellung).....	346
<i>Abbildung 70.</i> Vergleich der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk mit den Kontrollgruppen K-Be-Erk und K-Erk-Be-nErk in Hinblick auf das von den jeweiligen Lernenden im Median erreichte Verstehensniveau (eigene Darstellung).	347
<i>Abbildung 71.</i> Histogramm der Verteilung der Lernenden der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk und der Kontrollgruppe K-Erk auf die sechs Verstehensniveaus (eigene Darstellung).....	349
<i>Abbildung 72.</i> Histogramm der Verteilung der Lernenden der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk sowie der Kontrollgruppen K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk auf die sechs Verstehensniveaus (eigene Darstellung)	351
<i>Abbildung 73.</i> Histogramm der Verteilung der Lernenden aller fünf Gruppen auf die vier Analysekatogorien NICHT-Abstrahierer*innen (Kategorie 1), NICHT-Abduzierer*innen (Kategorie 2), NICHT-Revidierer*innen (Kategorie 3) und Erklärer*innen (Kategorie 4).	355
<i>Abbildung 74.</i> Zyklisch-progressives Modell des Diagrammverstehens (eigene Darstellung)	371
<i>Abbildung 75.</i> Lern- und Verstehenshürden im Prozess des zyklisch-progressiven Diagrammverstehens, vereinfachend dargestellt als linearer Verlauf (eigene Darstellung).....	375

1. Einführung in das Thema Diagrammverstehen

Quantitative Diagramme wie Balken-, Säulen- oder Liniendiagramme sind eine wesentliche Informationsquelle im Biologieunterricht (vgl. Roth, Bowen & McGinn 1999). In den letzten Jahren hat ihre Relevanz – vorangetrieben durch die schnelle mediale Entwicklung – stetig zugenommen (vgl. Karsai & Kampis 2010). Eine quantitative Analyse von Zentralabituraufgaben der Jahrgänge 2007 bis 2011 aus Nordrhein-Westfalen zeigte beispielsweise, dass im Fach Biologie in ca. einem Drittel der Abituraufgaben quantitative Diagramme eingesetzt wurden (vgl. Lehmkuhl 2012).

Anders als Fließtexte stellen quantitative Diagramme Informationen nicht sequenziell dar, sondern simultan durch komprimierte visuell-räumliche Anordnung von Informationselementen. Dadurch wird Diagrammleser*innen suggeriert, dass sie Diagrammen Informationen unmittelbar entnehmen können. Gerade das ist in den meisten Fällen aber nicht möglich. Obgleich quantitative Diagramme aufgrund ihres bildlichen Charakters wie einfache Informationsmedien erscheinen, stellen sie außerordentlich hohe Anforderungen an die Abstraktions- und Schlussfolgerungsfähigkeiten von Leser*innen (vgl. z. B. Padilla, McKenzie & Shaw 1986; Guthrie, Weber & Kimmerly 1993). Die komprimierte Informationsdarstellung – die häufig als wesentliche Stärke solcher Diagramme bezeichnet wird – erweist sich insbesondere für Lernende als eine erhebliche Herausforderung. Weintraub (1967) betont daher: „Their very strength thus creates a problem“ (Weintraub 1967, S. 345).

Von den verschiedenen Arten quantitativer Diagramme werden insbesondere *Liniendiagramme* bevorzugt im Biologieunterricht verwendet (vgl. Roth, Bowen & McGinn, 1999; Bowen & Roth 1998; Roth & Bowen 1999b; Plicht 2018; Lehmkuhl 2012; Meister & Upmeier zu Belzen 2018). Liniendiagramme veranschaulichen grafisch-abstrakt den Zusammenhang (Kovariation) metrisch skaliertter Variablen und gehören zu den Diagrammen mit der höchsten Informationsdichte. Padilla et al. (1986) bezeichnen Liniendiagramme deshalb auch als den am schwierigsten zu interpretierenden Diagrammtyp (vgl. ebd.; siehe dazu auch Larkin & Simon 1987). Das Verstehen der in einem Liniendiagramm referierten Inhalte durch Analyse desselbigen – kurz: Diagrammverstehen – stellt folglich hohe Anforderungen an Lernende (vgl. z. B. Mautone & Mayer 2007;

Shah & Hoeffner 2002; Preece & Janvier 1993; Leinhardt et al. 1990; Friel, Curcio & Bright 2001).

Zahlreiche Erkenntnisse zum Umgang von Lernenden mit Liniendiagrammen und zu Problemen beim Diagrammverstehen wurden in mathematischen und psychologischen Kontexten gewonnen (vgl. z. B. Curcio 1987; McDermott, Rosensquist & van Zee 1987; Kerslake 1977, 1981; Bell & Janvier 1981; Janvier 1981, 1987, 1998; Maichle 1994; Friel et al. 2001; Phillipp 2008; Leinhardt et al. 1990; Nitsch 2015). Empirische Forschungsarbeiten zum Umgang von Lernenden mit Liniendiagrammen im Biologieunterricht wurden im Vergleich dazu eher selten durchgeführt (vgl. Lachmayer 2008; Nitz, Prechtel & Nerdel 2014; Meister 2018)¹. Dabei wären gerade hier spezifische Erkenntnisse darüber, wie Lernende beim Analysieren und Verstehen von Liniendiagrammen vorgehen, von hoher Relevanz. So argumentieren beispielsweise Nitz et al. (2018), dass „das Verständnis von Diagrammen die Grundlage für den Aufbau von Wissensstrukturen [bildet], wenn es darum geht, die in Schulbuch oder Unterrichtsmaterialien dargestellten Zusammenhänge zu verstehen und zu erklären“ (Nitz et al. 2018, S. 394). Andere Autor*innen betonen sogar explizit, dass es notwendig sei, das Diagrammverstehen von Lernenden im Biologieunterricht – und nicht nur im Mathematikunterricht – gezielt zu fördern (vgl. Von Kotzebue, Gerstl & Nerdel 2015; Lachmayer 2008).

Die Entwicklung entsprechender Fördermaßnahmen wird allerdings dadurch erschwert, dass bisher noch kein Konsens darüber besteht, wie *Diagrammverstehen* zu konzeptualisieren ist. So führt beispielsweise Felbrich (2005) aus:

„Wie wir Graphen [Liniendiagramme] verstehen und welche Prozesse beteiligt sind, darüber existiert keine einheitliche Theorie. Es gibt lediglich verschiedene theoretische Ansätze und Modelle, die bislang jedoch noch nicht in eine übergreifende Theorie integriert wurden“ (ebd., S. 23).

Insbesondere wurde in Hinblick auf den Biologieunterricht bisher nicht hinreichend differenziert, ob sich Diagrammverstehen vornehmlich auf die Fähigkeit bezieht, *Informationen aus Diagrammen zu entnehmen* (vgl. Lachmayer 2008; Lachmayer et al. 2007), auf die Fähigkeit, *Informationen aus Diagrammen und*

¹ Zu Untersuchungen zum Umgang von Lernenden mit quantitativen und qualitativen Diagrammen siehe Bergey et al. 2015a, b; Cromley et al. 2010, 2013a,b,c; zu Untersuchungen von Studierenden und Lehrkräften mit quantitativen Diagrammen siehe Beck 2017; Von Kotzebue 2014; Von Kotzebue et al. 2015; Von Kotzebue & Nerdel 2012, 2015.

anderen external dargebotenen Informationsquellen *zu integrieren* (Von Kotzebue & Nerdel 2015; Beck & Nerdel 2015; Beck 2017), oder auf die Fähigkeit, Diagramme *zu erklären*.

Obgleich insbesondere das zuletzt genannte *Erklären von Diagrammen* eine hohe praktische Relevanz im Biologieunterricht besitzt (vgl. Bhatt 2008), scheint gerade hier eine erhebliche Forschungslücke zu existieren. Zum Teil können sogar widersprüchliche Konzeptualisierungsansätze identifiziert werden. Beispielsweise schreiben Nitz et al. (2018) Diagrammen eine eigene Erklärungskraft zu und betonen, dass Diagramme im Biologieunterricht genutzt werden können, um damit wissenschaftliche Konzepte oder Phänomene zu erklären (vgl. ebd., z. B. „Diagramm als eine Erklärung für das Phänomen“, S. 396). Breidenmoser und Wolkenhauer 2015 betonen dagegen, dass gerade das Erklären biologischer Sachverhalte mithilfe von Diagrammen nicht ohne Weiteres möglich sei (vgl. ebd.). Diagramme sind nach Meinung der Autoren *keine erklärenden Modelle*, sondern (lediglich und ausschließlich) *phänomenologische Modelle*. Phänomenologische Modelle sind mathematisch-statistische, deskriptive Darstellungen, die keine oder, wenn überhaupt, nur eine sehr geringe Erklärungskraft besitzen (vgl. Craver 2006; Craver & Darden 2013; Breidenmoser & Wolkenhauer 2015; Van Mil et al. 2016). Breidenmoser und Wolkenhauer (2015) betonen: „[...] phenomenological models fail to provide causal knowledge“ (ebd., S. 256). Die Erklärungskraft dieser Modelle entsteht erst dadurch, dass Vorwissen über Mechanismen und Theorien auf sie übertragen bzw. angewandt wird (vgl. Craver 2006; Craver & Darden 2013; Breidenmoser & Wolkenhauer 2015).

Gerade aber die Fähigkeit Vorwissen auf Graphenverläufe anzuwenden, um dadurch die Verläufe der Graphen kausal zu erklären, ist bei Lernenden häufig außerordentlich gering entwickelt (vgl. Aoyama 2006, 2007; Tsuji 2011; Freedman & Shah 2002; siehe dazu auch Sandoval 2001). Verschiedene Autor*innen vermuten, dass Lernende hier Probleme zeigen, weil es ihnen nicht gelingt, mithilfe des Diagramms einen Zugang zu den grafisch referierten Inhalten zu gewinnen und diese mental zu rekonstruieren (vgl. z. B. Preece & Janvier 1992, 1993; Swatton & Taylor 1994). Die Entwicklung theoretisch fundierter Fördermaßnahmen, um Lernende hierbei gezielt zu unterstützen, wird allerdings durch die heterogene und insbesondere hinsichtlich komplexerer Tätigkeiten lückenhafte Forschungslandschaft erschwert (vgl. Trickett & Trafton 2006; Wang et al. 2012). Es gilt daher auch heute noch, genau wie vor 30 Jahren, „[t]here is no proven optimal entry to [...] graphs“ (Leinhardt et al. 1990, S. 6).

Dabei finden sich durchaus verschiedene Hinweise und Empfehlungen zur Gestaltung möglicher Interventionen. So raten beispielsweise verschiedene Autor*innen zu einem aktiven, inquiry-basierten Ansatz, in dem Lernende, ausgehend von der praktisch erlebten, inhaltlichen Situation, das Diagramm in einem sozialkonstruktivistischen Ansatz entdecken (vgl. z. B. Bowen & Roth 2002; Roth & McGinn 1997; Ainley 1995; Wu & Krajcik 2006; Pratt 1995; Nemirovsky, Tierney & Wright 1998). Andere Autor*innen empfehlen dagegen die Entwicklung instruktionaler Maßnahmen und Trainings zur Schulung diagrammspezifischer Kompetenzen (vgl. Maichle 1994; Phillipp 2008; Felbrich 2005; Friel et al. 2001; Weintraub 1967; Leinhardt et al. 1990; Shah & Hoeffner 2002; Mautone & Mayer 2007; Schönborn, Anderson & Grayson 2002). Es sind insbesondere diese Empfehlungen zur Entwicklung instruktionaler Maßnahmen, an denen sich in dieser Arbeit orientiert wird, um Lernende beim Verstehen von Liniendiagrammen zu fördern.

Aufbauend auf einer intensiven Literaturrecherche wurden dazu potenzielle Förderkonzepte ausgewählt und in instruktionale Maßnahmen übersetzt. Die instruktionalen Maßnahmen wurden hinsichtlich ihrer Wirksamkeit anhand eines komplexen Liniendiagramms aus dem Themenbereich Enzymatik in einem iterativen Entwicklungsforschungsprozess evaluiert (siehe Kapitel 0). Der Themenbereich Enzymatik wurde gewählt, weil Liniendiagramme hier häufig in vergleichbarer Art und Weise eingesetzt werden. Zudem sind enzymatische Inhalte besonders abstrakt und stellen bereits an sich hohe Anforderungen an Lernende: Enzym- und Substratmoleküle sind zu klein, um sie mit dem bloßen Auge beobachten zu können, und ihre Interaktionen sind zu komplex, um sie ohne erheblichen kognitiven Aufwand mental zu rekonstruieren. Gerade in diesem anspruchsvollen Themenbereich erscheint es daher in besonderem Maße erforderlich zu sein, Lernende beim Diagrammverstehen zu unterstützen.

Die in der hier durchgeführten Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse erscheinen als anknüpfungsfähig, um sie zur (Weiter-)Entwicklung der instruktionalen Maßnahmen sowie übergeordneter lokaler Lehr-Lerntheorien in der biologiedidaktischen Forschung zu verwenden. Wie vorgegangen wurde, um die entsprechenden Erkenntnisse zu gewinnen, wird im nachfolgenden Kapitel erläutert.

2. Übersicht über den Forschungsprozess

Das hier durchgeführte Forschungsvorhaben verfolgt das Ziel, *Lernenden das Verstehen von Liniendiagrammen zu erleichtern*. Es soll ein Beitrag zur Weiterentwicklung der Unterrichtspraxis und der biologiedidaktischen Forschung geleistet werden. Von besonderer Relevanz ist die Identifikation geeigneter Förderkonzepte, mit denen sich das Diagrammverstehen fördern lässt. Die Förderkonzepte werden zu konkreten instruktionalen Maßnahmen weiterentwickelt. Die Überprüfung der Wirksamkeit der instruktionalen Maßnahmen erfolgte in mehreren Schritten qualitativ und quantitativ.

Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich sowohl der Forschungsebene als auch der Entwicklungsebene zuordnen (vgl. Prediger et al. 2012; Cobb et al. 2003). Auf der *Forschungsebene* wird theoriebildend ein Beitrag zur Entwicklung der Analyse von Verläufen, Hürden und Bedingungen des Diagrammverstehens geleistet, auf der *Entwicklungsebene* entsteht ein Lehr-Lernarrangement für den Einsatz im Unterricht. Der hier durchgeführte *Entwicklungsforschungsprozess* folgt dabei einem Entwicklungskreislauf (vgl. Prediger et al. 2012; Gravemeijer 2001; Gravemeijer & Cobb 2006). Prediger et al. (2012) sprechen hier von einem „*iterativ* mehrfach zu durchlaufendem Zyklus in miteinander *vernetzten* Phasen der Forschung und Entwicklung“ (ebd., S. 3).

Angelehnt an die genannten Arbeiten werden die methodischen Schritte in diesem Forschungsvorhaben, wie theoretische Fundierung, Entwicklung von Lernmaterialien, Analyse der Ergebnisse im Ergebnisraum und Entwicklung eines Messmodells, iterativ durchlaufen. Der Erkenntnisgewinn erfolgt vor dem Hintergrund von insgesamt sechs Forschungsfragen (F1 bis F6), die theoretisch und empirisch beantwortet werden. Teilweise werden die Forschungsfragen dazu in Unterfragen differenziert. Die sechs übergeordneten Forschungsfragen werden nachfolgend vorgestellt.

Das Forschungsvorhaben beginnt mit der Konzeptualisierung des Konstruktes Diagrammverstehen (siehe Kapitel 3). Darauf aufbauend erfolgt eine explorative Analyse der bestehenden Forschungsliteratur, mit Fokus auf empirische Forschungsarbeiten (siehe Kapitel 4). Ziel ist es, eine theoretische Fundierung zur Entwicklung von Maßnahmen zur Förderung des Diagrammverstehens zu schaf-

fen, unter besonderer Berücksichtigung von Lernerproblemen und Förderbedarfen. Die dazu erforderliche Literaturstudie erfolgt vor dem Hintergrund von Forschungsfrage 1.

Forschungsfrage 1 lautet:

Welche Probleme und Förderbedarfe zeigen Lernende im Umgang mit Liniendiagrammen?

Zur Beantwortung von Forschungsfrage 1 werden Unterschiede sowie Gemeinsamkeiten der analysierten Studien in Hinblick auf das Diagrammverstehen und die einzelnen Dimensionen des Diagrammverstehens herausgearbeitet; repräsentative Studien werden exemplarisch beschrieben. Lernerprobleme und Förderbedarfe werden identifiziert. Aufbauend auf der Identifikation der Förderbedarfe erfolgt die Beantwortung von Forschungsfrage 2 (siehe Kapitel 5).

Forschungsfrage 2 lautet:

Wie lässt sich das Diagrammverstehen von Lernenden, aufbauend auf den identifizierten Förderbedarfen, fördern?

Zur Beantwortung von Forschungsfrage 2 wird Diagrammverstehen zunächst als sequenzieller Prozess konzeptualisiert. Darauf aufbauend wird deduziert, in welcher Phase dieses Prozesses eine Förderung besonders effektiv erscheint. Aufbauend auf einer weiteren Literaturstudie wird ermittelt, wie entsprechende Förderkonzepte gestaltet werden sollten, um das Diagrammverstehen gezielt zu unterstützen. Die aus der Literatur deduzierten Förderkonzepte werden empirisch in mehreren Schritten erprobt und darauf aufbauend zu konkreten instruktionalen Maßnahmen ausgearbeitet. Im Rahmen der Beantwortung von Forschungsfrage 3 (siehe Kapitel 0) wird dann die Wirksamkeit der entwickelten instruktionalen Maßnahmen empirisch evaluiert.

Forschungsfrage 3 lautet:

Inwiefern sind die in dieser Arbeit entwickelten instruktionalen Maßnahmen geeignet, um Lernende beim kausalen Erklären von Graphenverläufen zu unterstützen?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage wird eine experimentelle Untersuchung mit über 500 Lernenden durchgeführt. Als Untersuchungsdiagramm wird ein komplexes Diagramm aus dem Themenbereich Enzymatik verwendet. Dabei wird zunächst angenommen, dass die Leistung der Lernenden beim Erklären des Diagrammes, bzw. die Vollständigkeit ihrer Erklärungen, ein geeigneter Indikator für das Verstehen des Diagrammes sei.

Es sei allerdings vorweggenommen, dass sich im Rahmen der Beantwortung von Forschungsfrage 3 zeigen wird, dass sich bei ausschließlicher Betrachtung der Vollständigkeit der Erklärungen der Lernenden nur bedingt Rückschlüsse auf ihr Diagrammverstehen ziehen lassen. Das komplexe, multidimensionale Konstrukt Diagrammverstehen wird daher im Rahmen der Beantwortung von Forschungsfrage 4 (siehe Kapitel 0), in einem Prozess der Konzeptualisierung und Kategorisierung (vgl. Mayring 2003; Mayring & Fenzl 2014), theoriebasiert und kontextspezifisch neu operationalisiert.

Forschungsfrage 4 lautet:

Wie lässt sich Diagrammverstehen operationalisieren, um Rückschlüsse auf die Lern- und Verstehensprozesse der Lernenden zu ziehen?

Die Operationalisierung erfolgt durch deduktiv-induktive Re-Analyse der Lernerantworten vor dem Hintergrund der Erkenntnisse der zuvor beantworteten Forschungsfragen. Das operationalisierte Konstrukt Diagrammverstehen wird verwendet, um die Wirksamkeit der instruktionalen Maßnahmen in Hinblick auf Lern- und Verstehensprozesse vertiefend zu analysieren. Die Analyse erfolgt vor dem Hintergrund von Forschungsfrage 5 (siehe Kapitel 8).

Forschungsfrage 5 lautet:

Inwiefern sind die in dieser Arbeit entwickelten instruktionalen Maßnahmen geeignet, um Lernende beim Diagrammverstehen zu unterstützen?

Die in den ersten acht Kapiteln theoretisch und empirisch gewonnenen Erkenntnisse, insbesondere die Erkenntnisse zu den Verstehensprozessen der Lernenden, werden im letzten Teil der Arbeit genutzt, um einen Beitrag zur (Weiter-)Entwicklung lokaler Theorien zu Lehr-Lernprozessen beim Diagrammverstehen zu leisten (siehe Kapitel 9). Die dazu notwendige Synthese und Diskussion der Erkenntnisse erfolgt vor dem Hintergrund von Forschungsfrage 6.

Forschungsfrage 6 lautet:

Wie lassen sich die in dieser Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse synthetisieren, um theoriebildend einen Beitrag zur Erforschung des Diagrammverstehens zu leisten?

Produkt dieser Synthese ist ein Modell des Diagrammverstehens, das als *zyklisch-progressives Modell des Diagrammverstehens* (kurz: *ZP-Modell*) bezeichnet wird. Das ZP-Modell wird verwendet, um Verstehenshürden von Lernenden in den Prozess des Diagrammverstehens einzuordnen und die Wirksamkeit der entwickelten instruktionalen Maßnahmen, und damit auch der identifizierten Förderkonzepte, zur Überwindung der Verstehenshürden zu diskutieren.

Die Übertragbarkeit der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse auf andere Diagramme und Kontexte wird kritisch diskutiert (siehe Kapitel 10). Darauf aufbauend werden Konsequenzen für die Schulpraxis abgeleitet (siehe Kapitel 11) und ein Ausblick auf mögliche, zukünftige (Entwicklungs-)Forschungsvorhaben gegeben (siehe Kapitel 0).

3. Theoretische Konzeptualisierung von Diagrammverstehen

Im Folgenden wird in das Thema Diagrammverstehen eingeführt; das Konstrukt Diagrammverstehen wird konzeptualisiert. Zunächst werden dazu Charakteristika von Diagrammen, insbesondere von Liniendiagrammen, präsentiert (siehe Abschnitt 3.1). Darauf folgend wird Diagrammverstehen, im Sinne einer Arbeitsdefinition, vorläufig definiert (siehe Abschnitt 3.2). Es wird zwischen Diagrammverstehen in mathematischen und naturwissenschaftlichen Kontexten unterschieden (siehe Abschnitt 3.3). Mögliche Dimensionen des Diagrammverstehens in naturwissenschaftlichen Kontexten, die Informationsentnahme, das Interpretieren und das Erklären, werden diskutiert (siehe Abschnitt 3.4). Die in Hinblick auf das Diagrammverstehen bisher nur selten untersuchte Dimension des Erklärens von Diagrammen wird, da diese Dimension für die empirische Untersuchung von besonderer Relevanz ist, tiefergehend analysiert (siehe Abschnitt 3.5). Im Anschluss daran wird Diagrammverstehen aus unterschiedlichen theoretischen Perspektiven als Problemlöseprozess (siehe Abschnitt 3.6) und als Translationsprozess (siehe Abschnitt 3.7) beschrieben. Kognitionspsychologische Aspekte des Diagrammverstehens werden diskutiert (siehe Abschnitt 3.8). Die konzeptuellen Grundlagen werden in Abschnitt 3.9 zusammenfassend beschrieben.

3.1. Konzeptualisierung von (Linien-)Diagrammen

Diagramme sind diskontinuierliche Texte und gehören zur Kategorie der Bilder. In der deutschsprachigen Literatur werden Diagramme von realistischen Bildern, wie Fotografien oder Gemälden, abgegrenzt und als logische Bilder bezeichnet (vgl. Schnotz 1994, 2001, 2002; Schnotz & Bannert 2003; Lachmayer 2008). Die Adjektive *realistisch* und *logisch* bezeichnen die Beziehung zwischen grafischer Darstellung und abgebildeter bzw. referierter inhaltlicher Situation. Bei realistischen Bildern handelt es sich um eine analoge Beziehung. Die bildliche Darstellung und der referierte Sachverhalt ähneln einander perzeptuell. Bei logischen Bildern liegt dagegen keine perzeptuelle Ähnlichkeit vor. Stattdessen werden in logischen Bildern die referierten Situationen in zumeist stark abstrahierter Art

und Weise, im Sinne logischer Relationen und gesteuert über Konventionen beschrieben. Ein Diagramm, als logisches Bild, stellt somit eine Abstraktion von der referierten inhaltlichen Situation dar (vgl. Schnotz 1994, 2001, 2002; Gattis & Holyoak 1996). Das Interpretieren eines Diagramms kann folglich als ein Akt der Elaboration – unter Anwendung diagrammspezifischen und inhaltspezifischen Vorwissens – verstanden werden. Ähnlich wie beim Lesen von Fließtexten (vgl. z. B. Ballstaedt 1997) erfordert daher auch das Lesen von Diagrammen Konstruktions- und Kohärenzbildungsprozesse (vgl. z. B. Kintsch 1988, 1998; Köster & Rosebrock 2009; Schnotz 2006).

Obgleich wesentliche Parallelen zu Fließtexten existieren (vgl. Shah 1997; Freedman & Shah 2002), unterscheiden sich Diagramme in mindestens zwei Kriterien von ihnen (vgl. Larkin & Simon 1987; Bauer & Johnson-Laird 1993; Gattis & Holyoak 1996; Roth & Bowen 1999a). Im Vergleich zu Fließtexten, die Informationen symbolisch-schriftlich, sequenziell und teilweise über mehrere Zeilen oder sogar Seiten darstellen, fassen Diagramme Informationen 1. visuell-räumlich und 2. stark komprimiert zusammen. Aufgrund dieser Unterschiede können einfache Schlussfolgerungen, sofern die Leser*innen über die dazu notwendigen Fähigkeiten verfügen (siehe Diskussion in Kapitel 0), auf der Grundlage von Diagrammen prinzipiell schneller erfolgen als auf der Grundlage von Fließtexten (vgl. Larkin & Simon 1987; Gattis & Holyoak 1996).

Der Begriff *Diagramm*² ist prinzipiell unbestimmt und subsumiert unter sich verschiedene Darstellungen mit unterschiedlichen Konventionen, wie Flussdiagramme, Karten und Liniendiagramme. Ein wesentlicher Fokus dieser Arbeit liegt auf Liniendiagrammen. Liniendiagramme gehören zu den häufigsten Darstellungen im Biologieunterricht und stellen als quantitative Diagramme gerade aufgrund ihrer besonders hohen Informationsdichte erhebliche kognitive und motivationale Anforderungen an Lernende (siehe Kapitel 0; vgl. z. B. Roth et al. 1999; Arteaga, Batanero & Contreras 2012; Roth, Bowen, & McGinn, 1999; Lachmayer 2008; Meister & Upmeier zu Belzen 2018, Bowen & Roth 1998; Felbrich 2005).

² Es sei darauf hingewiesen, dass im angloamerikanischen Sprachraum zwischen den Begriffen *graphs* und *diagrams* unterschieden wird. Unter dem Begriff *graphs* werden dort vornehmlich Liniendiagramme verstanden, während unter dem Begriff *diagrams* häufig die Darstellung qualitativer Zusammenhänge subsumiert wird (vgl. Kosslyn 2006; Winn 1991; zu einer Ausnahme siehe Larkin & Simon 1987). Eine derartige Unterscheidung wird im deutschen Sprachgebrauch nicht vorgenommen (vgl. Kattmann 2008).

Kosslyn (1989) liefert mit seiner Publikation „Understanding Charts and Graphs“ einen ersten Ansatz zur systematischen Analyse von Liniendiagrammen. Basierend auf semiotischen Theorien unterscheidet er zwischen syntaktischen, semantischen und pragmatischen Kriterien. Die syntaktische Ebene beschreibt die grafische Beziehung der Zeichen (Diagrammelemente) zueinander, die semantische Ebene die inhaltliche Bedeutung der Zeichen zu der grafisch referierten Situation und die pragmatische Ebene erfasst die Interaktion zwischen den Zeichen und der interpretierenden Person, der Diagrammleserin bzw. dem Diagrammleser (ebd.; zu erweiterten Ausführungen zu diesen drei Ebenen siehe auch Morris 1946). Es sei vorweggenommen, dass Kosslyn (1989) in seiner Analyse vornehmlich auf die Gestaltung von Diagrammen konzentriert. Er verfolgt das Ziel, Ansätze für eine effizientere bzw. effektivere Informationsdarstellung zu schaffen. Kosslyn (1989) analysiert nicht – was für diese Arbeit hochinteressant wäre –, welche Prozesse beim inhaltlichen Diagrammverstehen ablaufen, welche Probleme dabei auftreten können und wie das Diagrammverstehen auf inhaltlicher Ebene gefördert werden kann. Stattdessen lässt er dies bewusst offen: „The details of the representations and processes have yet to be specified, but the outlines of these basic forms of processing now seem relatively clear“ (ebd., S. 192). Die im nachfolgenden beschriebene Analyse nach Kosslyn (1989) stellt daher lediglich einen ersten Schritt in der Konzeptualisierung des Diagrammverstehens dar.

In der *syntaktischen Analyse* beschreibt Kosslyn (1989) den Aufbau eines Diagramms. Er unterscheidet vier Grundelemente (siehe Abbildung 1): Hintergrund, Rahmen, konzeptuelle Beschriftungen der X- und Y-Variablen und Spezifizierer (z. B. der Graphenverlauf³). Dem *Hintergrund* schreibt Kosslyn (1989) eine vornehmlich ästhetische Funktion zu, dem *Rahmen* eine ordnende, organisierende Funktion. Dieser stellt einen Bezug zwischen der X- und der Y-Variablen her. Allerdings werden durch den Rahmen an sich noch keine inhaltlichen Informationen transportiert. Erst durch die *konzeptuelle Beschriftung* – dem deskriptionalen Anteil (vgl. Schnotz 2002) eines Diagramms⁴ – wird es den Leser*innen

³ Spezifizierer (engl. *specifier*) können auch die Höhe von Säulen in einem Säulendiagramm oder die Position von Punkten in einem Streudiagramm sein.

⁴ Brandstetter-Korinth 2017 betont, dass Diagramme aufgrund ihres deskriptionalen Anteils keine ausschließlich bildlichen Repräsentationen seien, sondern eher kombinierte multiple externale Repräsentationen (vgl. ebd.; siehe zu Ausführungen zu multiplen externalen Repräsentationen auch Ainsworth 1999, 2006).

ermöglicht, die jeweiligen grafischen Elemente zu interpretieren. Den eigentlichen Informationsgehalt transportiert aber letztendlich der *Spezifizierer*, im Fall von Liniendiagrammen der *Graphenverlauf*, indem dieser grafisch eine Variable auf die andere abbildet (vgl. Kosslyn 1989).

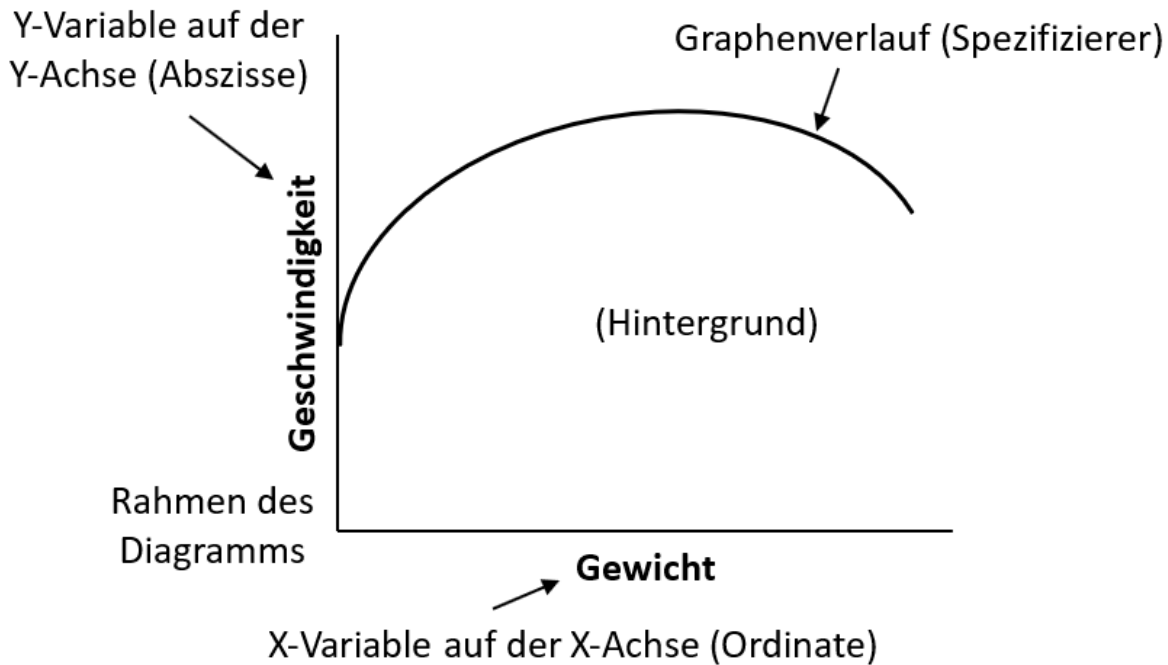


Abbildung 1. Aufbau von Liniendiagrammen (aus dem Englischen übersetzt und modifiziert durch Verfasser nach Kosslyn 1989, S. 188)

In der *semantischen Analyse* konzentriert sich Kosslyn (1989) darauf, wie es den Leser*innen gelingt, dem Diagramm explizit dargestellte Informationen zu entnehmen. Kosslyn (1989) fokussiert in diesem Zusammenhang auf die ‚wörtliche Bedeutung‘ der jeweiligen Diagrammelemente („literal meaning“, ebd., S. 189) und bezeichnet den Prozess als „literal reading“ (ebd., S. 189).

In der *pragmatischen Analyse* untersucht Kosslyn (1989) handlungsorientierte Kommunikationsaspekte. Er analysiert, inwiefern Zeichen im Diagramm eine Bedeutung besitzen bzw. inwiefern sie während der Analyse des Diagramms zu bedeutungsvollen Zeichen („meaningful symbols“, ebd. S. 189) werden. Die Zuschreibung von Bedeutung versteht er als einen interpretativen Prozess, in dem Diagrammleser*innen versuchen, die von den Diagrammkonstruent*innen intendierten Aussagen bzw. deren Bedeutung zu rekonstruieren (vgl. ebd.). Es ist dieser (semiotische) Akt der Zuschreibung bzw. Rekonstruktion von Bedeutung, der von zentraler Bedeutung für das hier durchgeführte Forschungsvorhaben ist und in den nachfolgenden Kapiteln sukzessive erschlossen wird.

3.2. Diagrammverstehen – eine vorläufige Definition

Diagrammverstehen ist ein überaus komplexes Konstrukt, das insbesondere in der biologiedidaktischen Forschung noch nicht hinreichend definiert wurde. Um für die nachfolgenden theoretischen Ausführungen eine erste vorläufige Konzeptspezifikation, im Sinne einer Arbeitsdefinition, zu entwickeln, wird sich daher zunächst an dem verwandten Konzept des Bildverstehens in biologischen Kontexten orientiert. *Bildverstehen* beschreibt Brandstetter-Korinth (2017) für den Biologieunterricht als „einen komplexen kognitiven Prozess zur Verarbeitung der dargestellten Informationen“ (ebd., S. 56). Den Prozess definiert sie als „aktive[n] Transfer von Informationen, die external durch Abbildungen repräsentiert sind, in interne mentale Modelle“ (ebd., S. 35) bzw. spezifischer als Selektion und Identifikation relevanter Abbildungsdetails, die unter Einbezug des Vorwissens „miteinander in Beziehung gesetzt und vom Bildlesenden zu einem kohärenten mentalen Modell des Darstellungsgegenstandes organisiert werden“ (ebd., S. 56). Unter internen mentalen Modellen versteht sie abstrakte, mental konstruierte Repräsentationen, in denen irrelevante Informationen eliminiert und Vorwissen integriert wurde. Sie betont, dass entsprechende Modelle für Problemlöseprozesse nutzbar seien (ebd., S. 35 ff.). Vor diesem Hintergrund wird Diagrammverstehen vorläufig definiert als ein *nach innen gerichteter (Re-)Konstruktionsprozess der grafisch referierten Inhalte, bei dem als Produkte kohärente interne mentale Modelle entstehen*.

Eine Spezifikation dieser vorläufigen Definition erfolgt im Rahmen der Beantwortung von Forschungsfrage 4 in Abschnitt 7.7.

3.3. Diagrammverstehen in verschiedenen Kontexten

Im Fokus dieser Arbeit steht das Diagrammverstehen in naturwissenschaftlichen, insbesondere biologischen Kontexten. Die meisten Untersuchungen zum Diagrammverstehen entstammen allerdings mathematischen und statistischen Kontexten. Um dies bei der Übertragung von Erkenntnissen zu berücksichtigen, werden im Folgenden Unterschiede der jeweiligen Forschungskontexte diskutiert.

3.3.1. Diagrammverstehen in mathematisch-statistischen Kontexten

Zahlreiche empirische Untersuchungen zum Diagrammverstehen haben einen mathematischen bzw. statistischen Fokus. Die entsprechenden Forschungsarbeiten sind häufig vor dem Hintergrund des Konzeptes *statistical literacy* (vgl. Gal 2002; Wallman 1993) oder anderer vergleichbarer Konzepte entstanden (zu einer Übersicht siehe Kemp 2005, S. 27 ff.⁵). Die jeweiligen Autor*innen konzentrieren darauf, Lernende zu kritischen Diagrammleser*innen zu machen (vgl. z. B. Kemp & Kissane 2010).

In *mathematischen Kontexten* werden Diagramme häufig daraufhin analysiert, wie Lernende sie in funktionalen Zusammenhängen anwenden und verstehen (vgl. z. B. Leinhardt et al. 1990; Nitsch 2015). Aufbauend auf einer Lehrplanalyse betont Lachmayer (2008), dass Diagramme in mathematischen Kontexten vornehmlich als bildhafte Darstellungen von Funktionen eingesetzt werden und nicht zur inhaltlichen Interpretation der referierten Situation:

„In der Mathematik sind Diagramme in vielen Fällen rein abstrakt. Sie beschreiben keine konkreten Variablen, sondern den Zusammenhang zwischen zwei Zahlenmengen. Die Art des Zusammenhangs steht im Blickpunkt, es interessieren dessen mathematischen Eigenschaften [...]. Ein solcher Zusammenhang wird häufig in Form einer Funktion beschrieben, entsprechend werden Diagramme in der Mathematik häufig einschränkend als bildhafte Darstellungen von Funktionen charakterisiert“ (ebd. S. 17 f.).

In *statistischen Kontexten* wird untersucht, wie Lernende Diagramme verwenden, um Daten mittels methodisch-statistischen Hintergrundwissens zu evaluieren (vgl. Scherrmann 2013; Wild & Pfannkuch 1999; Shaughnessy et al. 1996; Bright & Friel 1998; Gil & Ben-Zvi 2011; Chinn & Brewer 2001; Arteaga & Batanero 2011; Wu 2004; Wu & Wong 2009) und Diagramme zur Entscheidungsfindung bzw. zur Argumentation für oder gegen Hypothesen nutzen (vgl. Wu & Wong 2009; Shaughnessy & Pfannkuch 2002; Shaughnessy 2007; Aoyama 2006, 2007). Damit sich die Lernenden in den jeweiligen Untersuchungen vollständig auf die genannten Anforderungen konzentrieren konnten, wurden zu meist Diagramme verwendet, deren Inhalte aus einfachen Alltagskontexten

⁵ Kemp (2005) nennt hier unter anderem: “[...] numeracy, critical numeracy, mathematical literacy, quantitative literacy, document literacy, statistical literacy, critical mathematics, civic literacy“ (Kemp 2005, S. 27).

stammten. Die zu analysierenden Sachverhalte stellten meist keine Problemstellung im Sinne naturwissenschaftlicher Disziplinen dar (vgl. Leinhardt et al. 1990; Friel et al. 2001; Monteiro & Ainley 2007). Das domänenspezifische, inhaltliche Vorwissen war in entsprechenden Untersuchungen von eher untergeordneter Bedeutung und wurde teilweise sogar als lernhinderlich betrachtet (vgl. z. B. Shah 1997; Shah & Hoeffner 2002; Monteiro & Ainley 2007; Friel et al. 2001). Keller (2008) unterscheidet in ihrer Analyse daher auch zwischen Strategien, bei denen Diagramme als „mathematics word problems“ (ebd., S. 79) und Strategien, bei denen sie als „science data to be analyzed“ (ebd., S. 79 f.) betrachtet werden.

Aufgrund der genannten Unterschiede zwischen mathematischen und naturwissenschaftlichen Kontexten erscheint die Übertragbarkeit von in mathematischen Kontexten erworbener oder gezeigter Kompetenzen auf naturwissenschaftliche Kontexte nicht ohne Weiteres möglich. Leinhardt et al. 1990 fassen diese Problematik zusammen als: „Often, students who can solve graphing or function problems in mathematics seem to be unable to access their knowledge in science“ (ebd., S. 3).

3.3.2. Diagrammverstehen in naturwissenschaftlichen Kontexten

Im naturwissenschaftlichen Unterricht sind die im vorausgegangenen Abschnitt genannten Fähigkeiten zum Verstehen von Diagrammen, wie das methodisch-statistische Evaluieren der Evidenzen, zwar ebenfalls von wesentlicher Bedeutung (vgl. z. B. Chinn & Brewer 2001; Kanari & Millar 2004; Braaten & Windschitl 2011; Sampson & Blanchard 2012; Chinn & Malhotra 2002), stellen aber meist keinen direkten Lerngegenstand dar.⁶ Diagramme werden im naturwissenschaftlichen Unterricht stattdessen vornehmlich als Darstellungen betrachtet, die Beobachtungen übersichtlich zusammenfassen und Muster sichtbar machen, damit die Leser*innen etwas über die Situation bzw. das zugrunde liegende Phänomen lernen können (vgl. Ziepprecht 2016; Leinhardt et al. 1990; Lachmayer 2008). Die Kausalität der grafisch veranschaulichten Zusammenhänge muss dabei häufig nicht erst von korrelativen Zusammenhängen abgegrenzt werden, sondern wird meist frühzeitig durch Abbildungsüberschriften oder -unterschriften

⁶ Auf eine Diskussion darüber, ob aus dem, was Praxis ist, auch geschlussfolgert werden kann, was sein sollte, wird an dieser Stelle bewusst verzichtet (vgl. Moore 1903). Zu einer ausführlichen Diskussion sei hier auf Chinn & Malhotra (2002) verwiesen.

explizit vorgegeben. Die wesentliche Anforderung besteht daher hier meist in der mentalen Rekonstruktion der grafisch referierten Inhalte (vgl. z. B. Bell & Janvier 1981; Leinhardt et al. 1990; Glazer 2011; Lachmayer 2008; Nitz et al. 2018) und dem Erklären von Zusammenhängen mithilfe der grafischen Evidenzen unter Anwendung des Vorwissens (vgl. Oestermeier & Hesse 2000; Freedman & Shah 2002; Gil & Ben-Zvi 2011; Pfannkuch 2006; Wild & Pfannkuch 1999; Makar & Rubin 2009; Koslowski 1996; Nitz et al. 2018).⁷ Im naturwissenschaftlichen Unterricht werden Diagramme daher meist auch mit dem didaktischen Ziel eingesetzt, vorhandenes Wissen zur Anwendung zu bringen, um es zu flexibilisieren, Inhalte zu vertiefen, Experimente auszuwerten und neue Erkenntnisse zu generieren sowie explorativ (neue) Hypothesen zu entwickeln (vgl. z. B. Padilla et al. 1986; Ziepprecht 2016; Shah & Hoeffner 2002). So betonen Shah und Hoeffner (2002) beispielsweise in Bezug auf Diagramme: „One component of expertise in scientific reasoning is the ability to think about data by relating the data directly to theories, conclusions, hypotheses, or explanations“ (ebd., S. 65).

3.4. Dimensionen des Diagrammverstehens

Aufbauend auf den im Rahmen des hier durchgeführten Forschungsvorhabens analysierten Studien zum Diagrammeverstehen lassen sich, unter Berücksichtigung schulpraktischer Überlegungen, explorativ drei Dimensionen des Diagrammverstehens annehmen, die sich beim Diagrammverstehen über ein komplexes Interaktionsgefüge gegenseitig zu beeinflussen scheinen:

1. die *Informationsentnahme* explizit dargestellter Informationen aus dem Diagramm,
2. das *Interpretieren* implizit dargestellter Informationen und
3. das *Erklären* von Graphenverläufen bzw. der durch ein Diagramm referierten inhaltlichen Zusammenhänge.

Diese drei Dimensionen können im Unterricht in der genannten Reihenfolge anhand unterschiedlicher Operatoren wie *Beschreiben*, *Interpretieren* und *Erklären*

⁷ Es sei darauf hingewiesen, dass die zitierten Arbeiten vornehmlich aus mathematikdidaktischen Forschungsdisziplinen stammen, die sich mit dem Konzept des *informal inferential reasoning* befassen (vgl. z. B. Pfannkuch 2006; Makar & Rubin 2009).

adressiert werden (vgl. z. B. KMK 2013)⁸. Je nachdem, welche dieser drei Dimensionen adressiert wird, können sich die dazu notwendigen Verstehensprozesse und Anforderungen an das Diagrammverstehen erheblich verändern (vgl. Leinhardt et al. 1990; Roth & McGinn 1997; Friel et al. 2001; Vessey 1991; Jarvenpaa & Dickson 1988; Wang et al. 2012). Die drei genannten Dimensionen des Diagrammverstehens werden im Folgenden beschrieben und voneinander abgegrenzt.

3.4.1. Dimension Informationsentnahme

Die *Informationsentnahme* ist, verglichen mit dem *Interpretieren* und dem *Erklären*, als eher grundlegende, rezeptive Tätigkeit zu betrachten. Durch die Fähigkeit zur Informationsentnahme aus Diagrammen ist es Diagrammleser*innen möglich, explizit dargestellte Informationen aus Diagrammen abzulesen (z. B. das Ablesen von Punktwerten oder Trends). Beschreibende Tätigkeiten, die erfolgen können, ohne dass von der grafischen Darstellung abstrahiert wird, sind ebenfalls der Dimension Informationsentnahme zuzuordnen (vgl. Lachmayer 2008; Wang et al 2012).

Mayer (1996) spricht bezüglich der Informationsentnahme aus kontinuierlichen und diskontinuierlichen Texten von Informationsakquisition (*knowledge acquisition*) und grenzt entsprechende Tätigkeiten explizit vom Informationsverstehen (*knowledge understanding*) ab. Die *Informationsakquisition* beschreibt Mayer (1996) als “directly translating the presented information into a corresponding mental representation“ (ebd., S. 359). *Informationsverstehen* definiert er dagegen als den Aufbau einer mentalen Repräsentation, in der die zuvor akquirierten Informationen zu einem kohärenten und bedeutungsvollen Zusammenhangsgefüge integriert und organisiert werden (ebd., S. 359; zu einer vertiefenden Analyse vergleichbarer Zusammenhänge für Diagramme siehe Winn 1994). Die Informationsentnahme aus Diagrammen bildet somit die notwendige, aber keinesfalls auch die hinreichende Bedingung, um das Diagramm zu verstehen (vgl. Winn 1994). Sie sollte vielmehr als Basis für komplexere Tätigkeiten, wie das Interpretieren von Diagrammen und das kausale Erklären von Graphenverläufen, betrachtet werden (vgl. Wu & Wong 2009).

⁸ Die zugehörigen Arbeitsaufträge im Biologieunterricht können beispielsweise lauten: *Beschreiben Sie den Graphenverlauf* (Anforderungsbereich I-II); *Interpretieren Sie das Diagramm* (Anforderungsbereich II-III) und *Erklären Sie den Verlauf der Graphen* (Anforderungsbereich I-III) (vgl. KMK 2005, 2013).

3.4.2. Dimension Interpretieren

Ziel der *Interpretation* eines Diagramms ist die mentale (Re-)Konstruktion des grafisch referierten Sachverhaltes unter Einbezug des Vorwissens. Implizit dargestellte Informationen werden im Rahmen der Interpretation zugänglich gemacht; den einzelnen Diagrammelementen (Zeichen) wird Bedeutung beigemessen (vgl. z. B. Leinhardt et al. 1990, Roth & Bowen 1999a, b; Roth & Bowen 2003; Preece & Janvier 1993; Winn 1994). In der Schulpraxis wird das Interpretieren von Diagrammen daher auch als Vorbereitung für das Erklären der Graphenverläufe bzw. der referierten Inhalte betrachtet. Explizit wird beispielweise davon gesprochen, „Sachverhalte und Zusammenhänge in Hinblick auf Erklärungsmöglichkeiten heraus[zuarbeiten“ (KMK 2013, S. 3; siehe zu Ausführungen zum Erklären den nachfolgenden Abschnitt 3.4.3).

Um das Interpretieren im Kontext des Diagrammverstehens zu operationalisieren, unterscheiden Preece und Janvier (1993) zwischen der „Syntax“ des Diagramms (ebd., z. B. S. 199) und dem inhaltlichen Kontext, der „Story“, des Diagramms (ebd., z. B. S. 203). Interpretieren verstehen sie als *mentale Integration von Syntax und inhaltlichem Kontext (Story)*. Die Syntax des Diagramms wird vornehmlich mittels bottom-up-gesteuerter Prozesse erschlossen, die Story mittels vorwissensbasierter, top-down-gesteuerter Prozesse. Interpretatives Diagrammverstehen tritt ein, sobald Syntax und Story miteinander – mediiert durch das Vorwissen – zu einem kohärenten Zusammenhangsgefüge integriert wurden (vgl. ebd.). Nitz et al. (2018) definieren Interpretieren im Kontext von Liniendiagrammen in ähnlicher Art und Weise. Sie führen aus: „Die reine Informationsentnahme wird zur Interpretation, wenn darauf aufbauend die Verbindungen zwischen der Repräsentation (hier Diagramm) und dem dargestellten Kontext hergestellt werden, wodurch abgebildete Symbole und Zeichen kontextuelle Bedeutung erhalten“ (ebd., S. 395). Interpretative Schlussfolgerungsprozesse im Kontext des Diagrammverstehens erfüllen daher den Zweck Sachverhalte und Narrative zu entfalten (vgl. Monteiro & Ainley 2004). Komplexe Schlussfolgerungsaktivitäten sind beim Interpretieren nur dann notwendig, wenn Diagrammler*innen nicht direkt von der Syntax des Diagramms auf den referierten Inhalt schließen können (vgl. Winn 1994; Mayer 1996; Roth & Bowen 2003).

Zur Einordnung interpretativer Tätigkeit in das Konstrukt Diagrammverstehen lässt sich daher zusammenfassen, dass im Fokus der Diagramminterpretation die mentale Rekonstruktion der grafisch referierten Inhalte unter Zuhilfenahme des

Vorwissens steht. Obgleich die Interpretation dadurch bereits über die Informationsentnahme explizit dargestellter Informationen hinausgeht, handelt es sich hier immer noch um eine Tätigkeit, bei der vornehmlich mit den explizit dargestellten Informationen gearbeitet wird (vgl. z. B. Leinhardt et al. 1990; Mevarech & Kramarsky 1997; Friel et al. 2001; Monteiro & Ainley 2004). Erst das Erklären führt nach Aoyama und Stephens (2003) (siehe dazu auch Aoyama 2006, 2007) zur Konstruktion neuer qualitativer Informationen, die so vorher noch nicht in dem Diagramm enthalten waren.

3.4.3. Dimension Erklären

Erklären lässt sich definieren als „Strukturen, Prozesse, Zusammenhänge usw. eines Sachverhaltes erfassen und auf allgemeine Aussagen/Gesetze zurückführen“ (KMK 2013, S. 2). Das Erklären ist somit ein Prozess, in dem ein explizit gegebener oder durch Interpretation mental konstruierter Sachverhalt auf bereits bekannte Ursache-Wirkungszusammenhänge zurückgeführt wird (vgl. Helms 2017). Beim *Erklären* von Diagrammen wird – anders als bei der Informationsentnahme und sogar noch über die Interpretation hinausgehend – das zur Verfügung stehende Vorwissen unter Zuhilfenahme der grafischen Darstellung verwendet, um die referierten Inhalte unter Einbindung von Ursache-Wirkungszusammenhängen mental zu (re-)konstruieren. Roth (2014) spricht daher auch davon, dass beim Erklären das Diagramm selbst zum Objekt des Erkenntnisinteresses wird, und bezeichnet Diagramme in diesem Kontext als „objects of inquiry“ (Roth 2014, S. 283). Boote (ehem. Keller 2012) spricht analog von „to develop a theory to explain the graph“ (ebd., S. 2 f.).

Anders als beim rezeptiven Entnehmen von Informationen (siehe Abschnitt 3.4.1) und beim rekonstruktiven Interpretieren (siehe Abschnitt 3.4.2) werden beim Erklären neue Erkenntnisse konstruiert (vgl. insbesondere Aoyama & Stephens 2003; Aoyama 2006, 2007). Dazu werden die beim Interpretieren auf der Grundlage der grafischen Darstellung rekonstruierten Zusammenhänge um spezifisches Vorwissen über Theorien und Mechanismen erweitert und zu einem mentalen Modell, dem eigentlichen Verstehensprodukt (siehe Arbeitsdefinition in Abschnitt 3.2), integriert (vgl. Mayer 1996). Das mentale Modell kann dann wiederum verwendet werden, um weitere Aspekte des Diagramms bzw. Diagrammelemente, insbesondere Graphenverläufe, zu erklären. In Hinblick auf das Diagrammverstehen kann daher angenommen werden, dass sich das Erklären der

Diagramminhalte und das Verstehen eines Diagramms in einem progressiv-iterativ ablaufenden Verstehensprozess gegenseitig bedingen (siehe Abbildung 2)

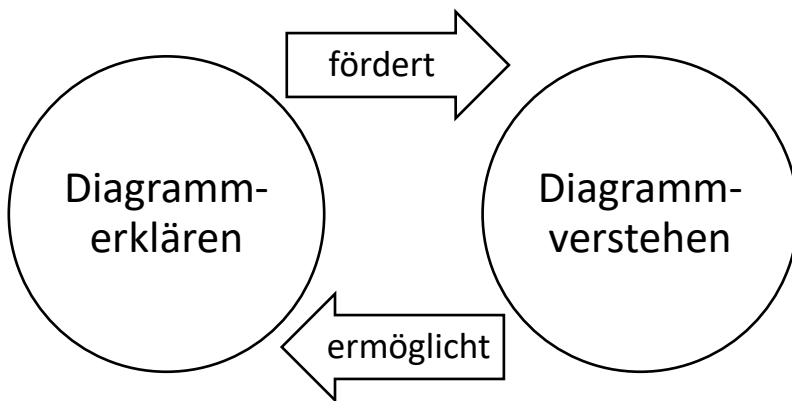


Abbildung 2. Zusammenhang zwischen Diagrammerklären und Diagrammverstehen (eigene Darstellung).

Verschiedene Autor*innen betrachten Erklären daher auch, in Abgrenzung zu eher beschreibenden Prozessen wie der Informationsentnahme und der Interpretation, als notwendige Tätigkeit, um Verständnis zu konstruieren (vgl. Lipton 2001, 2004; Gil & Ben-Zvi 2011; Wild & Pfannkuch 1999; Bhatt 2008; Lesh & Doerr 2003; Freedman & Shah 2002; Shah & Hoeffner 2002; Legare 2012; Coleman, Brown & Rivkin 1997; Côté & Goldman 1999). Diagrammverstehen wird in dieser Arbeit dem Erklären daher nicht im Sinne des Philosophen Wilhelm Dilthey (1833 – 1911) kontrastierend gegenübergestellt (vgl. Thielen 1999), sondern das Erklären wird als Teilbereich und als Voraussetzung für das Verstehen betrachtet (vgl. Nachtigall 2010). So führen beispielsweise Mayer (1996) und Lipton (2004) aus: „Explaining has been recognized as a critical learning strategy for building mental models” (Mayer 1996, S. 366) bzw. „Understanding only comes through being explained by something else“ (Lipton 2004, S. 22)⁹.

Spezifisch für das Verstehen von Diagrammen argumentieren Gil und Ben-Zvi (2011), dass das Erklären von Diagrammen „a significant aid to promoting understanding“ (ebd., S. 87) sei. Bhatt (2008) geht sogar noch weiter und führt

⁹ Lipton (2004) verweist hier auf einen potenziell unendlichen „why-regress“ (ebd., S. 22). Er räumt ein, dass auf eine jede Erklärung prinzipiell so lange wieder mit einer Wieso-Frage reagiert werden kann, bis irgendwann keine weitere Erklärung mehr möglich erscheint. Lipton (2004) hält dies jedoch nicht für weiter problematisch („not very troubling“, ebd., S. 22). Er argumentiert, dass nicht jede Erklärung weiter hinterfragt werden muss, sofern die jeweilige Erklärung geeignet erscheint, um einen Sachverhalt ‚ausreichend‘ zu erklären (vgl. ebd.). Er spricht daher hier auch von einem „benign why-regress“ (ebd., S. 22). Zu einer tiefergehenden Analyse was Lipton (2004) unter ausreichend versteht, sei auf sein Werk „Inference to the Best Explanation“ verwiesen.

Probleme beim Diagrammverstehen explizit auf das Unvermögen von Lernenden zurück, Graphenverläufe kausal erklären zu können. Sie argumentiert:

„If students do not understand or do not know appropriate causal explanations, they have no means to assign meaning to certain patterns in quantitative relations or certain values of quantities. In characterizing difficulties with quantitative conceptions, we should pay attention to causal reasoning as well“ (ebd., S. 167).

Auch in dem hier durchgeführten Forschungsvorhaben wird sich in Hinblick auf das Erklären von Diagrammen insbesondere auf das kausale Erklären von Graphenverläufen konzentriert.

3.5. Erklären im Kontext des Diagrammverstehens

Ähnlich wie die Frage, was Diagrammverstehen bedeutet, scheint auch die Frage, was *Diagrammerklären* bedeutet, immer noch nicht hinreichend beantwortet zu sein. Gerade in biologischen Kontexten erweist sich eine Operationalisierung als überaus kompliziert, da hier zwischen verschiedenen Erklärungsarten unterschieden werden kann (vgl. Bhatt 2008; Helms 2017). So führt Lombrozo (2012) beispielsweise aus, dass das Konzept *Erklären* eher einer Familie aus verwandten Konzepten entspricht als einem einzelnen konkret umrissenen Konzept (vgl. ebd.). Generische Ansätze erscheinen daher zur Operationalisierung des Diagrammerklärens zunächst naheliegend. So wurde das Erklären naturwissenschaftlicher Phänomene in der PISA-Studie 2012¹⁰ beispielsweise sehr breit definiert:

„explaining phenomena scientifically involves applying appropriate knowledge of science in a given situation. The competency includes describing or interpreting phenomena and predicting changes, and may involve recognizing or identifying appropriate descriptions, explanations, and predictions“ (OECD 2013, S. 108).

Es sei vorweggenommen, dass sich in der hier durchgeführten Analyse derart generische Ansätze allerdings nicht als zielführend erwiesen, um das Erklären und damit auch das Verstehen von Diagrammen zu analysieren. Es wurde daher ein spezifischerer Ansatz zur Definition des Erklärens gewählt: Ein Vergleich

¹⁰ Ein liniendiagrammbezogenes Item ist in diesem Zusammenhang die Frage 3 des Greenhouse-Items. In diesem soll eine alternative Erklärungshypothese für den grafisch dargestellten Zusammenhang zwischen CO₂-Konzentration und der durchschnittlichen Erdtemperatur geliefert werden.

verschiedener Erklärungskonzepte (vgl. McNeill et al. 2006; Ruiz-Primo et al. 2010; Osborne & Patterson 2011; Oestermeier & Hesse 2000; Van Mil, Boerwinkel & Waarlo 2013; Van Mil et al. 2016; Machamer, Darden & Craver 2000; Craver 2001; Southard et al., S. 2016) zeigt, dass insbesondere das Erklären durch das Beschreiben von (Kausal-)Mechanismen eine der häufigsten Arten des Erklärens in der Biologie ist. Machamer et al. (2000) führen diesbezüglich aus:

„In many fields of science what is taken to be a satisfactory explanation requires providing a description of a mechanism. So it is not surprising that much of the practice of science can be understood in terms of the discovery and description of mechanisms“ (ebd. S. 2).

Bechtel und Abrahamsen (2005) betonen in ähnlicher Art und Weise: „[...] the term biologists most frequently invoke in explanatory contexts is mechanism“ (ebd., S. 422) und fassen dies zusammen als „biologists explain why by explaining how“ (ebd., S. 422).

Entsprechende Erklärungen werden unter dem Konzept des *mechanistischen Erklärens* subsumiert. In mechanistischen Erklärungen wird zur Erklärung des *WIE*, im Sinne der Antwort auf eine *Wieso-Frage* oder auf eine „what-if-things-had-been-different“-Frage (vgl. Woodward 2003, S. 221), ein zu erklärender Sachverhalt analytisch in einzelne Aktivitäten (engl. activities) und deren konstituierende Entitäten (engl. entities)¹¹ zerlegt (vgl. Darden 2008; Van Mil, Boerwinkel & Waarlo 2013; Bechtel & Abrahamsen 2005; Machamer et al. 2000)¹². *Entitäten* werden dabei als die physischen Akteure eines Sachverhaltes bzw. eines Mechanismus betrachtet. Die jeweiligen Entitäten werden einzeln untersucht und ihre Organisation, ihre Eigenschaften sowie die jeweiligen Interaktionszusammenhänge ermittelt (vgl. z. B. Machamer et al. 2000; Craver 2001; Craver 2008; Darden 2008).

Aktivitäten werden als „the producers of change“ (Machamer et al. 2000, S. 4) und damit als konstitutiv für die Erschaffung eines (neuen) Zustandes oder Produktes betrachtet. Craver (2001) definiert mechanistisches Erklären daher auch

¹¹ Bechtel und Abrahamsen (2005) verwenden als Ersatz für den Begriff Aktivitäten den Begriff Operationen (engl. operations). Sie begründen dies mit: „We want to draw attention to the involvement of parts; for example, enzymes operate on substrates so as to catalyze changes in the substrates“ (ebd., S. 423; siehe zu einer ausführlichen Begründung auch Bechtel 2006).

¹² Zusätzliche Komplexität gewinnt das mechanistische Erklären durch das Einbeziehen räumlicher, probabilistischer und zeitlicher Dimensionen.

als „understanding how one activity leads to the next through the spatial layout of the components and through their participation in a stereotyped temporal pattern of activities from beginning to end“ (ebd., S. 61).

Van Mil et al. (2016) fokussieren auf molekularbiologische Inhalte und definieren in diesem Zusammenhang mechanistisches Erklären als: „to provide a causal account for a systemic property at the (sub)cellular level by describing the organization and interactions of underlying entities and activities“ (Van Mil et al. 2016, S. 520; siehe dazu auch Van Mil et al. 2013). Insbesondere für die Themenbereiche Neurobiologie und Molekularbiologie nehmen Machamer et al. (2000) an: „There are no activities in neurobiology and molecular biology that are not activities of entities“ (ebd., S. 5).

Obgleich mechanistische Erklärungen auch in anderen biologischen Themenbereichen in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen haben, werden sie bevorzugt in molekularbiologischen Themenbereichen verwendet (vgl. Van Mil et al. 2013; Machamer et al. 2000; Bechtel & Abrahamsen 2005; Brigandt 2013; Brailard & Malaterre 2015).¹³ Da in dem hier durchgeführten Forschungsvorhaben ein Diagramm analysiert werden soll, das enzymatische Inhalte zusammenfasst, erscheint das mechanistische Erklären vor diesem Hintergrund besonders geeignet, um das Erklären von Diagrammen in dieser Arbeit zu operationalisieren. *Diagrammerklären* wird daher hier definiert als *das Anführen einer mechanistischen Erklärung, um damit auf inhaltlicher Ebene kausal zu erklären, wieso die Graphen so verlaufen, wie sie in dem Diagramm verlaufen*.

Obwohl mit dieser Definition ein erster Ansatz dafür geliefert wurde, was unter Diagrammerklären verstanden werden kann, mangelt es immer noch an einer detaillierten Beschreibung der mentalen Prozesse, die dabei (möglicherweise) stattfinden. Die Beschreibung möglicher Prozesse wird allerdings insbesondere dadurch erschwert, dass sich in der Forschung zum Diagrammverstehen nur wenige Arbeiten finden, die sich mit der Analyse erklärender Prozesse im Kontext des Diagrammverstehens befassen (zu einer ähnlichen Kritik siehe Shah & Hoffner 2002; Freedman & Shah 2002; Trickett & Trafton 2006; Ratwani et al.

¹³ Mechanistische Erklärungen werden insbesondere in molekularbiologischen Themenbereichen verwendet, haben darüber hinaus aber auch in anderen biologischen Themenbereichen in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen (vgl. Van Mil et al. 2013; Machamer et al. 2000; Bechtel & Abrahamsen 2005; Brigandt 2013; Brailard & Malaterre 2015).

2004). So kritisieren beispielsweise Freedman und Shah (2002): „While explanation may be a viewer’s central goal, far less is known about the explanatory processes employed during graph comprehension” (ebd., S. 26). Zu einer ersten Orientierung wird daher im nachfolgenden Kapitel zunächst auf die Problemlöseforschung zurückgegriffen.

3.6. Diagrammverstehen als Problemlöseprozess

Je nach Leseziel kann das Lesen und Verstehen von Texten als ein Problemlöseprozess verstanden werden. So formulieren Sumfleth und Schüttler 1995:

„Das Lesen und Verstehen eines Textes stellt einen Problemlöseprozeß dar [...]. Der Ausgangszustand ist durch den Text vorgegeben und sein Zielzustand ist erreicht, wenn die Textinformationen in die kognitiven Strukturen der Leser integriert worden sind, der Text also verstanden wurde” (ebd., S. 59 f.).

Ähnliches kann auch für das Verstehen von Diagrammen angenommen werden (vgl. z. B. Pratt 1995; Nemirovsky & Rubin 1991; Tsuji 2011; Sumfleth & Schüttler, 1995; Sumfleth & Telgenbüscher 2000).

Der erste Schritt in einem Problemlöseprozess ist die mentale Konstruktion einer Problemrepräsentation (vgl. Reinhold, Lind & Friege 1999; zu einer ausführlichen Übersicht über Definitionen von Problemen und Problemlösen siehe z. B. Frensch & Funke 2014). Chi, Feltovich und Glaser (1981) beschreiben diese als „a cognitive structure corresponding to a problem, constructed by a solver on the basis of his domain-related knowledge and its organization” (1981, S. 121 f.). Expert*innen gelingt es besser als Noviz*innen, aufbauend auf der Problem Darstellung (zum Beispiel des Diagramms) eine vergleichsweise tiefere und korrektere Problemrepräsentation der referierten inhaltlichen Situation zu konstruieren. Sie beziehen Kausalzusammenhänge bereits frühzeitig in ihre (mentale) Repräsentation ein. Noviz*innen konstruieren dagegen oberflächlichere Problemrepräsentation. Kausalzusammenhänge werden von ihnen dabei meist nicht berücksichtigt (vgl. Chi, Feltovich & Glaser 1981; Chi, Glaser & Rees 1982; Simon & Simon 1978; Weidenmann 1994; Reinhold et al. 1999; zu diagrammspezifischen Untersuchungen siehe Roth & Bowen 1999a,b; Maichle 1994; Lowe 1993; Mazur & Hickam 1993; Preece & Janvier 1992).

Die Suche nach kausalen Erklärungen, die es ermöglichen, den Verlauf von Graphen kausal zu erklären, kann als eigenständiger Problemlöseprozess verstanden

werden. Erklärungen entsprechen dabei Lösungen für ein Problem, beispielsweise den zunächst nicht zu erklärenden Graphenverläufen, nach denen in einem theoretischen Lösungsraum gesucht wird (vgl. Newell, Shaw & Simon 1958; siehe dazu auch Klahr & Dunbar 1988; Hammann 2007; Newell & Simon 1972). Newell et al. 1958 sprechen hinsichtlich der Suche nach Lösungen von „a search for a solution in the very large space of possible solutions“ (ebd., S. 159). Sie unterscheiden dabei zwischen vorwärts- und rückwärtsgerichteten Strategien. Beide Problemlösestrategien basieren auf Syllogismen, unterscheiden sich allerdings in Hinblick auf ihren Ausgangspunkt (vgl. ebd.).

Vorwärtsgerichtete Problemlösestrategien setzen beim Ausgangszustand an und beschreiben mittels Operatoren sukzessive, wie aus dem Ausgangs- der Zielzustand entsteht. Um Probleme vorwärtsgerichtet lösen zu können, müssen Problemlöser*innen über umfassendes Vorwissen verfügen. Ist dieses vorhanden, so können sie Schlussfolgerungen relativ schnell ziehen (vgl. Zumbach, Haider & Mandl 2008; Koedinger & Anderson 1990).

Rückwärtsgerichtete Problemlösestrategien setzen dagegen beim zu beobachtenden Zielzustand an. Von diesem Zielzustand ausgehend versuchen Problemlöser*innen sich zum Ausgangszustand „zurückzuhangeln“ (Funke 2003, S. 69). Unter Verwendung invertierter Operatoren beschreiben sie, wie aus dem Ausgangs- der Zielzustand entstanden ist (vgl. Funke 2003, S. 69; Zumbach et al. 2008; Newell et al. 1958). Zumbach et al. (2008) bezeichnen rückwärtsgerichtete Strategien daher auch als „hypothesengenerierende und -testende Strategie“ (ebd., S. 5). Sie betonen, dass derartige Strategien kognitiv außerordentlich anstrengend seien, weil dazu, im Vergleich zu vorwärtsgerichteten Strategien, wesentlich mehr Operationen im Arbeitsgedächtnis stattfinden müssen (vgl. ebd.; siehe dazu auch Reimann 1997).

Vorwärtsgerichtete Strategien erscheinen geeignet, um das Argumentieren auf der Grundlage von Diagrammen oder das Ableiten von Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen aus Diagrammen zu beschreiben (vgl. dazu auch Gott & Duggan 2007; Gott & Roberts 2008); rückwärtsgerichtete Strategien erscheinen geeignet, um das kausale Erklären von Graphenverläufen zu beschreiben. Zu beachten ist allerdings, dass rückwärtsgerichtete Strategien in der Problemlöseforschung als eher „wissensunabhängig“ (Zumbach 2003, S. 41) betrachtet werden. Das Verstehen kontextueller Diagramme mit spezifischen Inhalten erfordert jedoch in hohem Maße die Anwendung von inhaltlichem Vorwissen. Das

Erklären von Graphenverläufen ist daher am ehesten als ein bidirektionaler Problemlöseprozess (vgl. Appelrath 1985; Koedinger & Anderson 1990) zu klassifizieren, in dem vorwärts- und rückwärtsgerichtete Strategien komplementär und iterativ für die Konstruktion von Bedeutung eingesetzt werden. Appelrath (1985) spricht in derartigen Fällen von einer „zweiseitig-gerichteten Strategie“ (ebd., S. 24). Verschiedene Autor*innen betrachten Diagrammverstehen vergleichbar dazu als ein Aushandeln von Bedeutung zwischen zwei ‚Wahrheiten‘, der grafischen und der inhaltlichen ‚Wahrheit‘ (vgl. Pratt 1995; Nemirovsky & Rubín 1991). Dieses Aushandeln von Bedeutung wird auch als ein iteratives Hin- und Herwechseln zwischen grafischer Darstellung und mental konstruierter inhaltlicher Situation beschrieben (vgl. Bell & Janvier 1981; Janvier 1978; Roth & Bowen, 2001; Duval, 2006; Leinhardt et al. 1990). Die dabei stattfindenden Übersetzungsleistungen, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit als *Translationen* bezeichnet werden, stellen erhebliche (kognitive) Anforderung an Lernende und erweisen sich als überaus anspruchsvolle Aufgabe. Die jeweiligen Translationsprozesse werden in dem nachfolgenden Abschnitt ausführlich analysiert.

3.7. Diagrammverstehen als Translationsprozess

In den vorausgegangenen Abschnitten wurde bereits zwischen der Informationsentnahme aus Diagrammen sowie dem Interpretieren und Erklären von Diagrammen unterschieden. Insbesondere beim Interpretieren und beim Erklären müssen Diagrammleser*innen zwischen grafischer Darstellung und mental (re-)konstruierter inhaltlicher Situation hin und her wechseln, um ein kohärentes mentales Modell der grafisch referierten Inhalte zu konstruieren. Im Folgenden werden theoretische Ansätze präsentiert, die geeignet erscheinen, um diesen Prozess der Kohärenzbildung zu strukturieren.

3.7.1. Translationen zwischen Situations- und Graphenraum

Nach Leinhardt, Zaslavsky und Stein (1990) erfolgt die Konstruktion von Bedeutung auf der Grundlage von Diagrammen durch interpretative Schlussfolgerungs-, Übersetzungs- und Vernetzungsprozesse zwischen und innerhalb von sogenannten Interpretationsräumen (vgl. ebd.; zu einer vertieften Ausführung in mathematischen Kontexten siehe auch Lesh et al. 1987; Lesh & Doerr 2003; Janvier 1987; Duval 2006). Die interpretativen Prozesse bezeichnen Leinhardt et al.

(1990) als *Translationen zwischen Interpretationsräumen*. Drei Interpretationsräume (siehe Abbildung 3) sind dabei von besonderer Bedeutung: der *Graphenraum*, in dem die Analyse von Graphenverläufen auf perzeptueller Ebene stattfindet; der *Situationsraum*, in dem die in dem Diagramm referierten Inhalte mental rekonstruiert und analysiert werden und der *Funktionsraum*, in dem mathematisch-funktionale Zusammenhänge analysiert werden (vgl. ebd.).

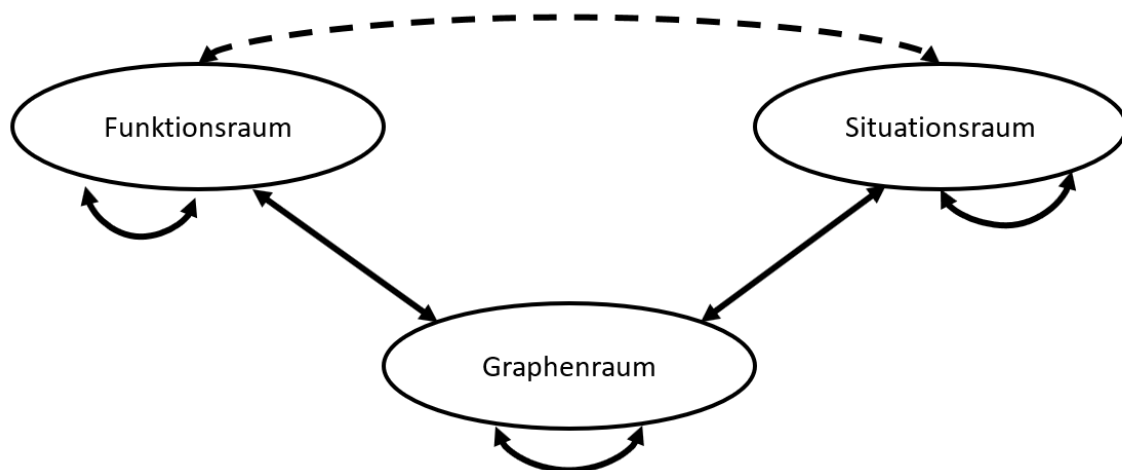


Abbildung 3. Translationen zwischen Interpretationsräumen (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Leinhardt et al. 1990, S. 9).

Diagrammverstehen ist vor dem Hintergrund der Ausführungen von Leinhardt et al. 1990 allerdings nicht als unilaterale Translation von einem Interpretationsraum in den anderen zu verstehen, sondern als Fähigkeit zur ungehinderten¹⁴, multilateralen Translation. Die drei Autorinnen betrachten Diagrammverstehen dabei als Brücke zwischen den Räumen. Anhand einer ausführlichen Analyse verschiedener, vornehmlich mathematischer Studien zum Diagrammverstehen zeigen sie auf, dass die Perspektive, aus der der Graphenverlauf, die Situation oder die Funktionsgleichung zu Beginn des Interpretationsprozesses analysiert werden, entscheidend für das Verstehen des jeweiligen Sachverhaltes ist: „The intellectual landscape, so to speak, looks different from each side of the bridge“ (ebd., S. 3). Es sei beispielsweise nicht möglich, von Translationsfähigkeiten, die zum Beispiel bei der Translation vom Graphen- in den Funktionsraum in einem

¹⁴ Hofmann und Roth (2018) – nicht zu verwechseln mit den in dieser Arbeit häufig zitierten Autoren Hoffmann und Roth (z. B. 2005, 2007) – sprechen hinsichtlich Problemen beim Diagrammverstehen bzw. bei der Translation zwischen Interpretationsräumen im Kontext des Mathematikunterrichts von „Hindernisse[n] und Schülervorstellungen“ (ebd. S. 819). In der hier durchgeführten Arbeit wird für entsprechende Probleme der Begriff *Verstehenshürden* verwendet (vgl. Schrenk et al. 2019; siehe insbesondere Abschnitt 9.3).

mathematischen Kontext gezeigt werden, auf Translationsfähigkeiten vom Situations- in den Graphenraum in einem naturwissenschaftlichen Kontext zu schließen: „Just because learners know something in one way does not mean that they can make immediate use of it from a different perspective or in a different situation“ (ebd., S. 3). Leinhardt et al. (1990) unterstreichen damit die bereits in Abschnitt 3.3 ausgeführten Schilderungen zur Problematik der Übertragbarkeit von Erkenntnissen zum Diagrammverstehen, die in mathematischen Kontexten gewonnenen wurden, auf naturwissenschaftliche Kontexte.

Für den Biologieunterricht sind insbesondere Translationen zwischen Graphen- und Situationsraum von besonderer Bedeutung. Translationen unter Einbezug des Funktionsraums treten hier vergleichsweise selten auf (vgl. Leinhardt et al. 1990; siehe zu einer Betrachtung solcher Translationen Meister 2018). Janvier (1978) (zitiert nach Ferry 1997) hat Translationsprozesse zwischen den Graphen- und Situationsraum anhand von Interviewstudien mit Lernenden im Alter von 11 und 12 Jahren (N = 20) intensiv untersucht. Er konnte zeigen, dass das Interpretieren eines Diagramms ein iterativer, progressiver Verstehensprozess, bestehend aus zwei ineinander übergehender und sich komplementär ergänzender Teilprozesse, ist¹⁵: Zunächst konzentrieren sich Diagrammler*innen auf die visuell-räumlichen Charakteristika des Diagramms und suchen nach visuellen Merkmalen oder Mustern, um auf deren Grundlage Bedeutung zu konstruieren. Parallel dazu stellen sie sich die inhaltliche Situation, die in dem Diagramm grafisch zusammengefasst wird, mental vor. Zunehmend abstrahieren sie von dieser unspezifisch mental repräsentierten (inhaltlichen) Situation (siehe Abbildung 4). Das Abstrahieren von der referierten Situation beschreibt Janvier (1981) als „a slow and gradual 'drawing-out' (abs-trahere) of the main features guided by some precise intentions“ (ebd. S. 120). Gravemeijer (2007) spricht im Falle derartiger Abstraktionsprozesse von „cutting bonds with everyday-life reality“ (ebd., S. 138). Die Diagrammler*innen nutzen dazu ihr domänenspezifisches, inhaltliches Vorwissen und projizieren inhaltlich relevante Konzepte auf das Diagramm bzw. den Graphenverlauf (vgl. Ferry 1997). In einem erfolgreichen Interpretationsprozess gelingt es ihnen zugleich, auch von der grafischen Darstellung zu

¹⁵ In dieser Hinsicht ähnelt der Ansatz von Janvier (1978) dem Modell der *Dualen Kodierung* nach Allan Paivio (vgl. Paivio 1990).

abstrahieren – im Sinne eines sich Lösens¹⁶ – und ausgewählten Diagrammelementen – in einem elaborativen Prozess – Bedeutung beizumessen. Die Interpretation eines Diagramms versteht Janvier (1978, zitiert nach Ferry 1997) daher auch als potenziell unendliches, iteratives Hin und Her zwischen abstrahierenden und elaborierenden Prozessen.

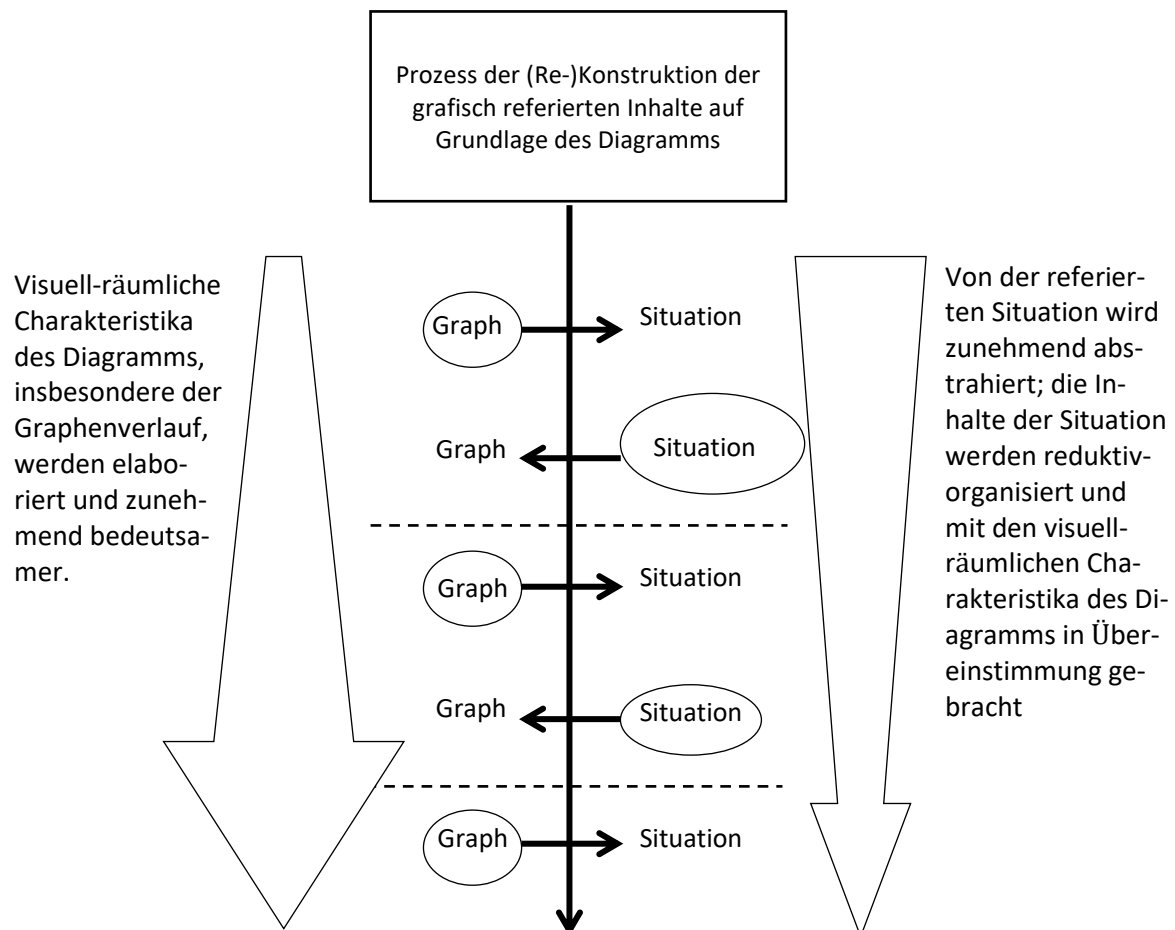


Abbildung 4. Interpretation eines Diagramms als iterative Translation zwischen Graphen- und Situationsraum (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Ferry 1997, zitiert nach Janvier 1978)

Beide Interpretationsräume, der Graphen- und der Situationsraum, werden dabei hinsichtlich ihrer Bedeutung einander angenähert. Bell und Janvier (1981) fassen dies, aufbauend auf den Ergebnissen ihrer nachfolgenden empirischen Untersuchungen, zusammen als „[...] graphical interpretation is a progressive integration

¹⁶ Es sei darauf hingewiesen, dass Janvier (z. B. 1978, 1981) Abstraktionsprozesse vornehmlich für die mentale, reduktive Organisation der referierten inhaltlichen Situation annimmt. Abstraktionsprozesse werden in dieser Arbeit allerdings auch für Prozesse angenommen, bei denen sich Lernende von der grafischen Darstellung lösen. In den nachfolgenden Ausführungen wird insbesondere von Lernenden berichtet, denen dies nicht gelingt und die das Diagramm daher perzeptuell analysieren (siehe zu entsprechenden empirischen Befunden insbesondere Abschnitt 7.6).

of the various pieces of graphical information with the situational background“ (Bell & Janvier 1981, S. 40). Lernende sind nach Meinung der Autoren insbesondere dann erfolgreich beim Verstehen eines Diagramms, wenn es ihnen frühzeitig gelingt, auf Grundlage der inhaltlichen Situation oder der grafischen Darstellung eine geeignete mentale Repräsentation zu konstruieren, von der ausgehend sie den Interpretationsprozess fortführen können (vgl. ebd.). Janvier (1978) betont daher: „Generally the interviews have shown the key to success in the translation skills lies in the possibility to derive an equivalent of one mode – as a mental rich image – on which is based the execution of the other representation“ (Janvier 1978, zitiert nach Ferry 1997, S. 95).

Im deutschsprachigen Raum findet sich in verwandten Kontexten häufig der Begriff bzw. das Konzept *Darstellungswechsel* (vgl. Nitsch 2015; Leisen 2005; Kuhnke 2012; Schnotz 2014b). Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass mit dem reinen Darstellungswechsel – wie dieser beispielsweise im Kontext der Sprachförderungsforschung diskutiert wird (vgl. z. B. Leisen 2005) – nicht zwangsläufig der hier gemeinte Interpretationsprozess verbunden ist. In dieser Arbeit wird daher auf das aus dem angloamerikanischen Raum stammende, in dieser Hinsicht umfassendere Konzept der *Translation* als theoretische Grundlage Bezug genommen (vgl. Janvier 1987; Bell & Janvier 1981; Roth & Bowen 2001; Bossé et al. 2014; Adu-Gyamfi et al. 2012; Duval 2006¹⁷; Lesh et al. 1987; Leinhardt et al. 1990).

Der mentale Wechsel (die Translation) zwischen Graphen- und Situationsraum wird auch in aktuelleren Untersuchungen weiterhin als Schlüsselkompetenz betrachtet und als maßgeblich relevant für das Ziehen inhaltlicher Schlussfolgerungen auf Grundlage von Diagrammen in naturwissenschaftlichen Kontexten (vgl. z. B. Glazer 2011). So fasst Glazer (2011) beispielsweise die Erkenntnisse ihrer Literaturstudie wie folgt zusammen:

„The ability to shift between a graph and the physical event that the graph describes is vital to determine relationships between variables, which is a central practice in science and therefore has an impact on graphing competence as a key inquiry skill“ (Glazer 2011, S. 196).

¹⁷ Duval (2006) spricht in diesem Zusammenhang von „conversion“ (ebd., z. B. S. 103) und grenzt diesen semiotischen Prozess von eher kognitiven Prozessen wie Translation und Enkodierung ab. Prinzipiell deckt sich aber Duvals Verständnis von *conversion* mit dem Verständnis von *Translation* der anderen Autor*innen.

Der genaue Ablauf der referierten Translationsprozesse ist allerdings noch nicht hinreichend geklärt.

Wie zuvor bereits angedeutet, nehmen Bell und Janvier (1981) beispielsweise an, dass Translationsprozesse mit der Konstruktion *unsystematisch* konstruierter *Verstehensinseln* beginnen, von denen ausgehend grafische und inhaltliche Informationen progressiv aufeinander zugeführt und miteinander integriert werden. Sie beschreiben dies wie folgt:

„There is a progressive interaction of graph and situation in which the former steadily grows in richness of meaning. This is typically not achieved by a systematic working through the graph, point by point or section by section, but by a scanning process in which some parts acquire meaning first and are then used to help understand other parts” (Bell & Janvier 1981, S. 40).

Roth und Bowen (2003) gehen dagegen davon aus, dass das Interpretieren eines Diagramms (im Idealfall) mit einem Prozess *systematisch* strukturierten Lesens beginnt und dass entsprechende Strukturierungstätigkeiten auch während der eigentlichen Interpretation immer wieder stattfinden (vgl. ebd).

3.7.2. Translationen innerhalb des Situationsraums

Die zuvor beschriebene *Translation* zwischen Graphen- und Situationsraum ist insbesondere in Hinblick auf den Biologieunterricht um eine aktive Prozessierung innerhalb des Situationsraums zu erweitern.

Verschiedene Forschungsarbeiten legen nahe, dass innerhalb des Situationsraums intensive Translationsprozesse zwischen verschiedenen Wissensrepräsentationen stattfinden. Dabei wird zwischen verschiedenen inhaltlichen und organisatorischen Ebenen vernetzend hin- und hergewechselt (vgl. z. B. Hammann 2019; Knippels, 2002; Knippels, Waarlo & Boersma 2005; Knippels & Warloo 2018; Verhoeff, Waarlo & Boersma 2008; Tsui & Treagust 2013; Jördens et al. 2016; Schönborn & Bögeholz 2009; Van Mil et al. 2013; Van Mil et al. 2016; Moreno et al. 2011).

Es wird angenommen, dass Lernende dabei verschiedene mentale Modelle bzw. mentale Repräsentationen konstruieren und zueinander in Beziehung setzen (vgl. Verhoeff et al. 2008; Gravemeijer 2007).

Tsui und Treagust (2013) sprechen hier auch von „translation across the representations of biological knowledge“ (ebd., S. 9). Die Translation zwischen

den Wissensrepräsentationen definieren sie, unter Bezug auf Geig und Rubba (1993), als:

„[...] an information processing task, requiring understanding of the underlying concept to the extent that the individual can interpret the information provided by the initial representation and infer the details required to construct the target representation“ (Geig & Rubba, 1993, S. 883, zitiert nach Tsui & Treagust 2013, S. 9).

Die verschiedenen Wissensrepräsentationen, die häufig auch als *Ebenen* (engl. levels) bezeichnet werden (vgl. z. B. Hammann 2019; Jördens et al. 2016; Craver & Bechtel 2007), können vielfältig sein:

„The term ‘level’ plays many roles in science. There are levels of abstraction, being, causation, description, explanation, function, and generality, to name a few, and these are not the same“ (Craver & Bechtel 2007, S. 548).

Die für das Erklären von Sachverhalten notwendige Vernetzung verschiedener Wissensrepräsentationen stellt damit eine weitere komplexe Anforderung an die Lernenden dar, die ihnen das Verstehen von Diagrammen zusätzlich erschwert. Einen übergeordneten – aber keinesfalls erschöpfenden¹⁸ und nicht immer überschneidungsfreien – Ansatz, mit dem sich die Interaktionsprobleme der verschiedenen Wissensrepräsentationen andeuten und die möglichen Translationskombinationen innerhalb des Situationsraums grundlegend strukturieren lassen, liefert das in Abbildung 5 dargestellte *Cube-Modell* nach Tsui und Treagust (2013). Das Modell beschreibt einen potenziell unendlichen Translationsraum, der an drei Translationsachsen aufgespannt wird: der horizontalen Translationsachse der Darstellungsmodalitäten (X-Achse), der horizontalen Translationsachse des domänenspezifischen Fachwissens (Z-Achse) und der vertikalen Translationsachse der Organisationsebenen (Y-Achse). Die Variablen auf den drei Achsen sind jeweils als Kontinua zu verstehen, auf denen sich theoretisch unendlich viele Differenzierungsmöglichkeiten ergeben können (vgl. dazu auch Gilbert & Treagust 2009).

¹⁸ Tsui und Treagust (2013) betonen, dass verschiedene Translationskombinationen sowie mögliche Interaktionseffekte mit Problemlösestrategien zu einem außerordentlich komplexen Konstrukt führen, das in dieser Arbeit keinesfalls erschöpfend betrachtet werden kann (vgl. ebd.).

Unter der *horizontalen Translation über Darstellungen hinweg* (X-Achse) verstehen die Autoren einen Prozess der Translation einer Darstellung in eine andere, wie zum Beispiel die schriftliche Beschreibung eines Diagramms. Der Situationsraum muss dazu beispielsweise nach Fachbegriffen durchsucht werden (vgl. z. B. Swatton & Taylor 1994; Maichle, 1994; Pinker 1990; Nitz 2012¹⁹).

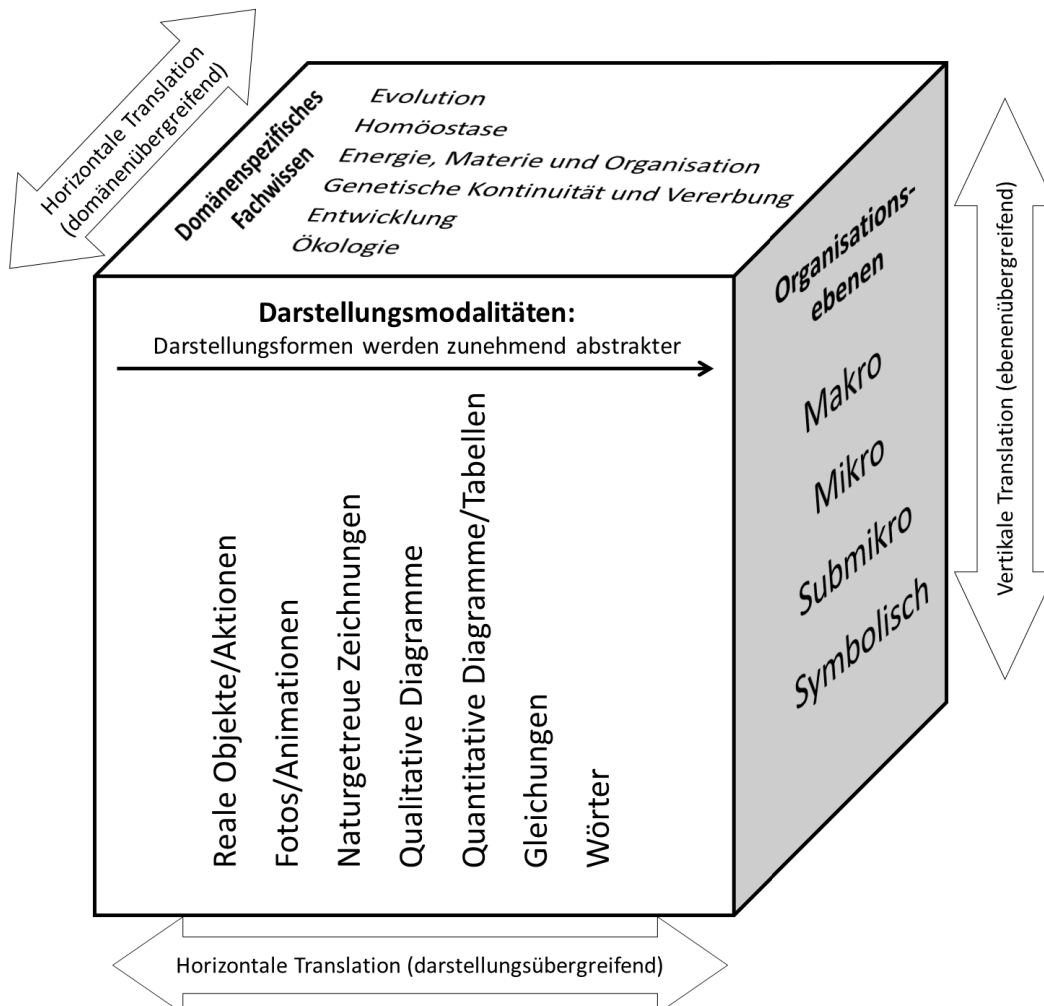


Abbildung 5. Translationsachsen innerhalb des Situationsraums, dargestellt anhand des Cube-Modells (aus dem Englischen nach Tsui & Treagust 2013, S. 10)

Wesentlich ist dabei, dass die jeweiligen Darstellungen Informationen auf unterschiedliche Art und Weise, insbesondere unterschiedlich abstrakt, zusammenfassen und darstellen. So besitzt beispielsweise ein realistisches Bild – z. B. ein Foto von einem Luchs, der einen Hasen jagt – einen geringeren Abstraktionsgrad als

¹⁹ Nitz (2012) weist darauf hin, dass die Vielzahl an Fachbegriffen, die zur Beschreibung eines Diagramms verwendet werden, wie asymptotischer, sigmoider oder exponentieller Verlauf, in Kombinationen mit der Vielzahl an komplexen inhaltlichen Fachbegriffen, wie beispielsweise Konzentrationsgradient, Lernende überfordern können (Nitz 2012). Probleme der Fachsprache sollen allerdings in dieser Arbeit nicht vertiefend beleuchtet werden. Ein kurzer Ausblick zu dieser Thematik findet sich in Kapitel 0.

ein logisches Bild – z. B. ein Diagramm, das eine Räuber-Beute-Beziehung darstellt –, weil das realistische Bild eine größere perzeptuelle Ähnlichkeit mit dem realen Kontext besitzt (vgl. Tsui & Treagust 2013; siehe Abschnitt 3.1). Die Probleme, die beim Übersetzen einer abstrakten Darstellung in eine inhaltliche Beschreibung auftreten können, resultieren nach Tsui und Treagust (2013) aus oberflächlichen Leseprozessen, in denen Lernende vornehmlich auf perzeptuelle anstatt auf inhaltliche Relationen fokussieren (vgl. ebd.; siehe dazu auch Halverson & Friedrichsen (2013); Weidenmann 1989; 1994; Swatton & Taylor 1994; Preece & Janvier 1992,1993). Lernende, die beim Lesen einer grafischen Darstellung nicht ausreichend von dieser abstrahieren, können die grafische Darstellung und den referierten Inhalt nicht zueinander in Relation setzen. Nach Meinung von Tsui und Treagust (2013) sei insbesondere ein Mangel an repräsentationaler Kompetenz für entsprechende Probleme verantwortlich:

„Students who lack representational competence often fail to make the correct association between the content knowledge of biology and its abstract representations because they tend to focus on the uninformative superficial features of the representations but do not use them as a tool” (ebd., S. 10).

Repräsentationale Kompetenz kann als Fähigkeit verstanden werden, die in einer oder mehreren Abbildung(en) enthaltenen oder durch sie referierten Entitäten und Prozesse durch Lesen der Abbildung(en) zu verstehen, sie zueinander in Relation zu setzen und sie zu kommunizieren (vgl. Kozma & Russel 2005; Griffard 2013; Tsui & Treagust 2013).

Unter einer *horizontalen Translation über Inhaltsdomänen* (Z-Achse) verstehen die Autoren das Hin- und Herwechseln zwischen biologischen Konzepten (vgl. Biological Sciences Curriculum Study 2006) der gesamten „domain of biology“ (Tsui & Treagust 2013, S. 11). Zu diesen Konzepten gehören beispielsweise die drei Konzepte Energie, Materie und Organisation, die unter anderem auch den in dieser Arbeit untersuchten Themenbereich Enzymatik beinhalten.

Von einem *vertikalen Translationsprozess zwischen verschiedenen Organisationsebenen* (Y-Achse) sprechen die Autoren hinsichtlich des Hin- und Herwechseln zwischen der makroskopischen Ebene (z. B. Gewebe), der mikroskopischen Ebene (Zellen), der submikroskopischen Ebene (Moleküle) und der abstrakten symbolischen Ebene. Auf letzterer werden Erklärungsmechanismen grafisch-abstrakt, beispielsweise in Form von Diagrammen oder Strukturformeln, dargestellt (Tsui & Treagust 2013).

In verschiedenen empirischen Untersuchungen zum Ebenenwechsel in biologischen Kontexten (zu einer Übersicht siehe insbesondere Hammann 2019; Hammann & Asshoff 2014; Jördens et al. 2018; Knippels & Waarlo 2018) konnte gezeigt werden, dass Lernende beim Erklären 1.) vornehmlich auf derselben Organisationsebene verbleiben, obwohl zur vollständigen Erklärung eines Sachverhalts die Betrachtung und die Vernetzung von Konzepten verschiedener Organisationsebenen notwendig wären, und 2.) Eigenschaften höherer Organisationsebenen unreflektiert und fachlich unangemessen auf Eigenschaften niedrigerer Organisationsebenen übertragen. Letzteres zeigt sich insbesondere für abstrakte Sachverhalte wie Diffusion. Beim Erklären der Diffusion eines Farbstoffes übertragen Lernenden beispielsweise Eigenschaften, die sie auf der Makroebene beobachten können, wie das Wandern der Farbfront, auf die Mikroebene und unterstellen auch den Teilchen – fachlich inkorrekt – eine vergleichbare, gerichtete Bewegung²⁰ (vgl. Chi 2005; Sanger, Brecheisen & Hynek 2001; zu einer Zusammenfassung in dieser Hinsicht wesentlicher Erkenntnisse siehe Hammann 2019, Hammann & Asshoff 2014).

3.7.3. Bildung translationaler Kohärenz

Die in den vorausgegangenen Abschnitten beschriebenen Translationsprozesse werden im Folgenden unter das Konzept der *Bildung translationaler Kohärenz* subsumiert und auf das Verstehen von Liniendiagrammen übertragen.

Die *Bildung translationaler Kohärenz* beschreibt den Vorgang, dass *beim Diagrammlesen beziehungsweise beim Diagrammverstehen verschiedene Translationsprozesse innerhalb und zwischen Interpretationsräumen stattfinden, um grafische Darstellung und referierte inhaltliche Situation(en) mental so aufeinander zuzuführen, dass sich die grafisch dargestellten und die referierten Inhalte zu einem kohärenten Zusammenhangsgefüge – einem mentalen Modell – ergänzen, das letztendlich geeignet ist, um dieses zum Problemlösen zu verwenden.*

Die Annahme verschiedener Translationsprozesse erweitert somit die zu Beginn dieses Kapitels (siehe Abschnitt 3.2) an das Bildverstehen angelehnte Arbeitsdefinition für das Diagrammverstehen. Zusätzlich dazu wird, ebenfalls über die zunächst gegebene Arbeitsdefinition hinausgehend, angenommen, dass Lernende

²⁰ Geeigneter wäre hier die Bezugnahme auf die Brown'sche Bewegung als ungeordnete Wärmebewegung der Farb- und Lösemittelmoleküle.

im Rahmen des Kohärenzbildungsprozesses verschiedene mentale Repräsentationen konstruieren und diese zueinander in Beziehung setzen, um damit verschiedene Schlussfolgerungsaktivitäten durchführen zu können (vgl. z. B. Schnotz 2001; Gottschling 2006; Verhoeff et al. 2008; Gravemeijer 2007). Von besonderer Relevanz sind dabei insbesondere Schlussfolgerungsaktivitäten, die es den Lernenden ermöglichen, die in dem Diagramm dargestellten Graphenverläufe durch Anwendung ihres domänenspezifischen Vorwissens mechanistisch zu erklären (siehe Abschnitt 3.5). Die in diesem Zusammenhang relevanten mentalen Repräsentationen werden nachfolgend erläutert und verschiedene Modellierungsansätze diskutiert, die ihre Entstehung beschreiben.

3.8. Kognitionspsychologische Aspekte des Diagrammverstehens

In Abschnitt 3.7 wurde dargelegt, dass Diagrammverstehen in dieser Arbeit als translationaler Kohärenzbildungsprozess verstanden wird. Im Rahmen dieses Prozesses übersetzen Lernende die in einem Diagramm referierten Inhalte in mentale Repräsentationen. Mentale Repräsentationen, die in diesem Zusammenhang relevant erscheinen, werden in Abschnitt 3.8.1 vorgestellt. In Abschnitt 3.8.2 werden darauf aufbauend ausgewählte kognitionspsychologische Modelle diskutiert, welche die Entstehung entsprechender Repräsentationen im Kontext des Diagrammverstehens beschreiben. Die jeweiligen kognitionspsychologischen Modelle wurden von verschiedenen Autor*innen entwickelt, bauen aufeinander auf, vertiefen unterschiedliche Aspekte des Diagrammverstehens und ergänzen sich komplementär. Sie fungieren insbesondere als Grundlage für die Analyse der empirisch gewonnenen Lernerantworten in Kapitel 0.

3.8.1. Einführung in das Konzept mentaler Repräsentationen

3.8.1.1 Übersicht über mentale Repräsentationen

Drei Formen mentaler Repräsentationen (siehe Abbildung 6) erscheinen im Kontext des Diagrammverstehens relevant zu sein: *propositionale Repräsentationen* (vgl. z. B. Pylyshyn 1973; Kintsch 1998), *mentale Modelle* (vgl. z. B. Johnson-Laird 1980, 1983, 2013) und *Vorstellungsbilder* (vgl. z. B. Kosslyn 1994, 2006). Propositionale Repräsentationen haben einen symbolisch-deskriptionalen, mentale Modelle und Vorstellungsbilder einen vornehmlich depiktionalen Charakter (vgl. Schnotz & Bannert 1999; Bannert & Schnotz 2006; Schnotz 2014b).

Bevor die drei mentalen Repräsentationsformen tiefergehend analysiert werden, sei darauf hingewiesen, dass in der Forschung zum Diagrammverstehen kontrovers diskutiert wird, welche Form mentaler Repräsentation das Verstehen von Diagrammen maßgeblich bestimmt. Verschiedene Autor*innen betrachten deskriptionale Repräsentationen als maßgeblich relevant (vgl. Pinker 1990; Lohse 1993; Carpenter & Shah 1998; Freedman & Shah 2002; Peebles & Cheng 2003), andere Autor*innen dagegen depiktionale Repräsentationen (vgl. Gattis & Holyoak 1996; Feeney et al. 2000; Feeney & Webber 2003; Hegarty 2011).

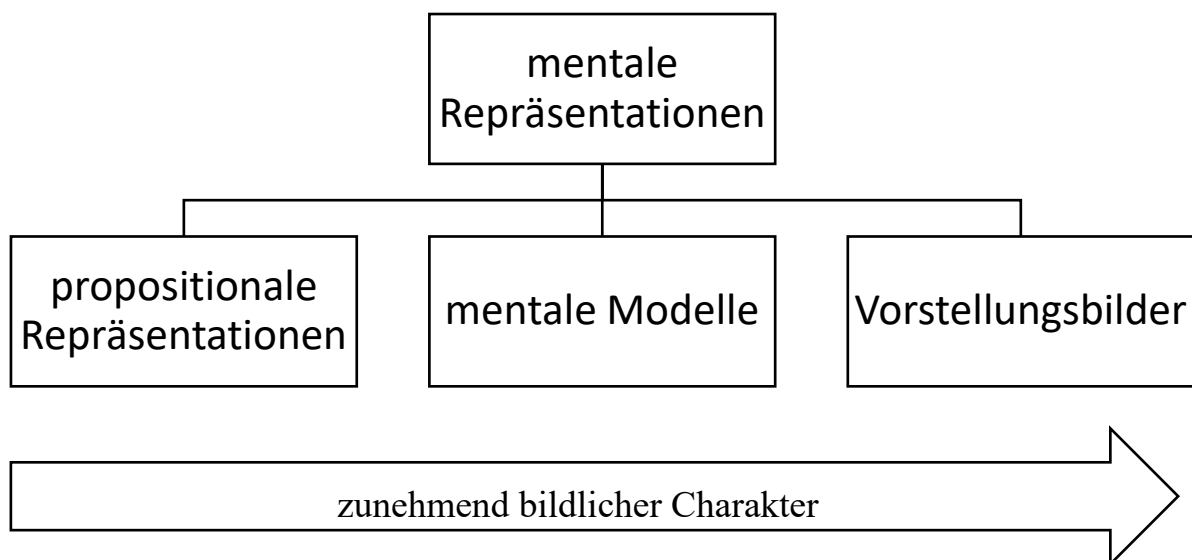


Abbildung 6. Übersicht über verschiedene mentale Repräsentationsformen (eigene Darstellung)

Zusätzlich zu der Unklarheit darüber, welche Art mentaler Repräsentationen auf der Grundlage von Diagrammen vornehmlich konstruiert wird, wird in der Forschung (siehe *imagery-Debatte*) bereits grundsätzlich das Ausmaß des bildlichen Charakters mentaler Modelle sowie die Relevanz propositionaler Repräsentationen und bildlicher Vorstellungen für das schlussfolgernde Denken kontrovers diskutiert (vgl. z. B. Kosslyn & Pomerantz 1977; Kosslyn 2006; Knauff 2013; Knauff & Johnson-Laird 2002; Gottschling 2006; Liu & Stasko 2010).

Den Ausführungen in den nachfolgenden Abschnitten sei daher insbesondere vorangestellt, dass im Rahmen dieser Arbeit kein Beitrag zur Klärung dieser Diskussionen geleistet werden kann. Vielmehr werden Aspekte aus den verschiedenen theoretischen Richtungen genutzt, um die unterschiedlichen Schwierigkeiten beim Diagrammverstehen zu analysieren und Erklärungsansätze für Probleme von Lernenden beim Diagrammverstehen zu entwickeln. Die drei Formen mentaler Repräsentationen werden dazu in den nachfolgenden Abschnitten zunächst

ausführlich vorgestellt und einzeln vor dem Hintergrund des spezifischen Kontextes des Diagrammverstehens charakterisiert. Sie werden dabei vereinfachend zunächst so beschrieben, als ob sie voneinander unabhängig seien bzw. im Sinne einer Entweder-oder-Relation existieren würden.²¹ Erst in Abschnitt 4.3.2 – vor dem Hintergrund von Forschungsfrage 1 – werden die drei mentalen Repräsentationen mithilfe des Modells des Text- und Bildverstehens (vgl. Schnotz & Bannert 1999, 2003) zueinander in Beziehung gesetzt, um darauf aufbauend das Auftreten spezifischer Probleme beim Diagrammverstehen analysieren zu können.

3.8.1.2 Propositionale Repräsentationen

Propositionale Repräsentationen sind „Beschreibungen in einer hypothetischen ‚mentalen Sprache““ (Schnotz 2014b, S. 48). Es handelt sich dabei um diskrete, semantische Sinneinheiten bzw. Wissensstrukturen aus Argumenten und Prädikaten. Sie sind ähnlich wie Sprache nach syntaktischen Regeln aus Symbolen zusammengesetzt. Propositionale Repräsentationen besitzen somit eine große Ähnlichkeit mit der linguistischen Struktur eines (kontinuierlichen) Textes (vgl. Schnotz 2001, 2003; Moser 2003). Die jeweiligen Propositionen werden im Arbeitsgedächtnis konstruiert, miteinander verknüpft, um Vorwissen angereichert und ggf. in das Langzeitgedächtnis überführt. Im Langzeitgedächtnis gespeicherte Netzwerke aus propositionalen Repräsentationen stellen eine semantische Wissensbasis dar (vgl. Kintsch & van Dijk 1978; Van Dijk & Kintsch 1983; Kintsch 1988). Van Dijk und Kintsch (1983) sprechen diesbezüglich auch von Situationsmodellen (vgl. ebd.; siehe dazu auch Kintsch 1998). Ein Situationsmodell bezeichnen sie als „the cognitive representation of the events, actions, persons, and in general the situation that a text is about“ (Van Dijk and Kintsch, 1983, S. 11 f.).

3.8.1.3 Mentale Modelle

Derzeit existieren zahlreiche Vorstellungen darüber, was unter dem Konstrukt *mentales Modell* verstanden werden kann (vgl. z. B. Nitz & Fechner 2018). Vereinfacht betrachtet, ähneln mentale Modelle dem von Van Dijk und Kintsch (1983) entwickelten Konzept des Situationsmodells (siehe vorausgegangener Abschnitt). Während ein Situationsmodell allerdings stärker der zugrunde liegenden abstrakten amodalen Textbasis ähnelt, entspricht ein mentales Modell

²¹ Die parallele Existenz mehrerer mentaler Repräsentationen soll hier keinesfalls ausgeschlossen werden.

eher dem beschriebenen Sachverhalt in seiner tatsächlichen Form (vgl. Richter & Schnotz 2018). Obgleich verschiedene Autor*innen annehmen, dass mentale Modelle auch aus propositionalen Einheiten gebildet werden können, wird diesen eher ein bildlicher als ein propositionaler Charakter unterstellt (vgl. Schnotz & Bannert 1999; Schnotz 2001, 2014b; Christmann 1989; Wang & Barrow 2011). Entsprechend wird angenommen, dass sich mentale Modelle dann leichter konstruieren lassen, wenn die zugrunde liegenden Sachverhalte konkret beschrieben oder dargestellt sind (z. B. die Beschreibungen eines weißen Hochzeitskleides), und schwerer, wenn der Sachverhalt abstrakt ist (z. B. beim Denken in Wahrscheinlichkeiten) (vgl. z. B. Sadoski et al. 1993).

Die Funktion mentaler Modelle definieren Wang und Barrow (2011) sehr generisch als „internal representations that an individual constructs to understand or to give a rational explanation for an experienced phenomenon“ (ebd., S. 562) und betonen damit insbesondere den erklärenden Charakter dieser Modelle. Andere Autor*innen betonen nicht nur den erklärenden Charakter, sondern darüber hinaus insbesondere auch den prädiktiven Charakter und die Möglichkeit, vorwärtsgerichtete Schlussfolgerungen aus dem mentalen Modell abzuleiten (vgl. Meiser et al. 2001; Greca & Moreira 2002). So definieren Greca und Moreira (2002) mentale Modelle beispielsweise wie folgt:

„A mental model is an internal representation which acts out as a structural analogue of situations or processes. Its role is to account for the individuals' reasoning both when they try to understand discourse and when they try to explain and predict the physical world behavior.“ (Greca & Moreira 2002, S. 108 f.)

Mandl, Friedrich & Hron (1988) verweisen darüber hinaus darauf, dass mentale Modelle es Menschen ermöglichen würden, Ereignisse im Geiste zu simulieren und diese dadurch stellvertretend zu erfahren:

„Mentale Modelle ermöglichen Individuen, Inferenzen zu ziehen, Vorhersagen zu machen, Phänomene zu verstehen, Entscheidungen über Handlungen zu treffen und ihre Ausführung zu überwachen sowie – als herausragendes Merkmal – Ereignisse stellvertretend zu erfahren. Mittels mentaler Modelle ist es möglich, das Verhalten dynamischer Systeme sowie Handlungsvollzüge im Umgang mit diesen Systemen vor dem geistigen Auge zu simulieren“ (Mandl et al. 1988, S. 146).

In dieser Arbeit wird zur Definition mentaler Modelle insbesondere Bezug genommen auf die Arbeiten von Johnson-Laird und Knauff (vgl. Johnson-Laird 1980, 1983; Johnson-Laird & Byrne 1991; Rauh, Schlieder & Knauff 1996;

Knauff & Johnson-Laird 2002; Knauff 2013; Knauff & May 2006). Der Vorteil der Fokussierung auf entsprechende Ausführungen liegt nicht in einer spezifischen Definition, sondern vielmehr in der Ausrichtung der jeweiligen empirischen Forschungsarbeiten auf das logische und räumliche Schlussfolgern unter Berücksichtigung von Problemlöseaspekten. Diagramme sind visuell-räumliche Darstellungen. Es erscheint daher naheliegend, dass Schlussfolgerungsprozesse, die zum Erschließen und Verstehen von Diagrammen geeignet sind, in enger Beziehung zu den oben genannten rationalen Denkprozessen stehen. Knauff und Kollegen (vgl. Ragni & Knauff 2013; Knauff et al. 2003; Rauh et al. 1996) haben die ursprünglichen Überlegungen von Johnson-Laird (vgl. z. B. Johnson-Laird 1983) hinsichtlich einer detaillierten Analyse des bildlichen und räumlichen Denkens beim logischen Schlussfolgern weiterentwickelt. Knauff (2013) beschreibt mentale Modelle als nicht-propositionale, nicht-bildliche, sondern logisch-räumliche mentale Repräsentationen, die Informationen im Sinne räumlich-qualitativer Relationen kodieren. Ein mentales Modell sei daher abstrakter als visuelle und konkreter als sentimentale, propositionale Vorstellungen (vgl. ebd.). Knauff und Kollegen (vgl. Knauff et al. 2003; siehe dazu auch Knauff 2007, 2013) liefern sogar empirische Hinweise dafür, dass bildhafte Vorstellungen das (logische) Schlussfolgern behindern (vgl. ebd.). Mentale Modelle bezeichnet Knauff (2013) daher, unter Betonung der Überlegenheit logisch-räumlichen Schlussfolgerns gegenüber dem visuellen Schlussfolgern, als „supramodal spatial representations“ (ebd., z. B. S. XI) oder auch als Modelle „in the strictest logical sense“ (Knauff 2007, S. 34).

Knauff (2007) spezifiziert den Zusammenhang zwischen grafischer Darstellung, inhaltlichen Relationen und mentalem Modell als Analogie-Beziehung: „The representation’s parts correspond to the parts of what it represents, and its structure corresponds to the structure of the reasoning problem“ (ebd., S. 34). Eine derartige Analogie-Beziehung zwischen Modellelementen und Elementen des betrachteten Sachverhaltes sowie zwischen der Struktur des Modells und der Struktur des Schlussfolgerungsproblems lässt sich gut in Übereinstimmung bringen mit den in Abschnitt 3.7 beschriebenen Translationsprozessen, bei denen sukzessive grafische Darstellung und referierte inhaltliche Situation aufeinander zugeführt werden. Ähnliche Überlegungen werden auch von verschiedenen anderen Autor*innen für das Diagrammverstehen aufgestellt (vgl. Taylor & Tversky 1992; Tversky 1991; Trafton & Trickett 2001; Trafton et al. 2002; Trafton, Tri-

ckett & Mintz 2005; Ratwani, Trafton & Boehm-Davis 2004). Empirische Studien, welche die geschilderten Überlegungen in Hinblick auf das Diagrammverstehen unterstützen, finden sich zum Beispiel für euklidische Diagramme (vgl. Hamami & Mumma 2013; Sato et al. 2014; Sato & Mineshima 2012; Shimojima & Katagiri 2013).

Das schlussfolgernde modellbasierte Denken wird daher im Folgenden vor dem Hintergrund der Ausführungen von Rauh, Schlieder und Knauff (1996) in drei Phasen²² unterschieden: *Modellkonstruktion*, *Modellinspektion* und *Modellvariation*. In der Phase der *Modellkonstruktion* wird aufbauend auf den Prämissen bzw. den gegebenen Informationen eines Problemlösekontextes ein vorläufiges mentales Modell konstruiert. In dem nachfolgenden, inspizierenden Prozess (*Modellinspektion*) wird das konstruierte Modell durch Schlussfolgerungsprozesse (vgl. z. B. Meiser et al. 2001) auf Widersprüche zur Problemsituation überprüft und es wird nach neuen, in den Prämissen nicht explizit erwähnten Beziehungsinhalten gesucht. Das mentale Modell wird dabei elaboriert. In der dritten Phase (*Modellvariation*) werden (iterativ) alternative Modelle mit den zuvor gebildeten Modellen bzw. den darauf basierenden Konklusionen und dem Problemlösekontext abgeglichen und gegeneinander getestet. Widersprüche zwischen Problemlösekontext und bestehenden Modellen führen dann entweder zu einer schrittweisen Adaption bestehender Modelle oder zur vollständigen Modellrevision, gefolgt von einem iterativen Prozess aus Konstruktion und Inspektion neuer mentaler Modelle (vgl. Rauh et al. 1996).

Fehler können in diesem Prozess insbesondere dann auftreten, wenn beim Schlussfolgern mehrere mentale Modelle berücksichtigt werden müssen (vgl. Knauff 2013) oder wenn aus unterschiedlichen mentalen Modellen zu demselben Sachverhalt ein ungeeignetes Modell zum Problemlösen ausgewählt wird (vgl. Moser 2003). Moser (2003) bezeichnet Fehler beim Problemlösen daher auch als „‘Missgriffe‘ auf konzeptueller Ebene“ (ebd., S. 188). Konsequenz eines solchen *Missgriffs* sind beispielsweise fachlich inkorrekte Inferenzbildungen (vgl. ebd.; siehe insbesondere Ausführungen zur empirischen Analyse der Lernerantworten in Abschnitt 7.6.3).

²² Die Autoren (Rauh et al. 1996) bauen hier auf den drei Phasen *comprehension*, *description*, *validation* nach Johnson-Laird und Byrne (1991, S. 35 f.) auf und spezifizieren diese drei Phasen vor dem Hintergrund des räumlich-relationalen Schlussfolgerns.

3.8.1.4 Vorstellungsbilder

Vorstellungsbilder sind konkreter als mentale Modelle und enthalten mehr visuelle Informationen, dafür allerdings weniger vorwissensbasierte Informationen (vgl. Schnotz 2014a). Vorstellungsbilder werden vor diesem Hintergrund auch als perzeptnahe Vorstellungen und mentale Modelle als perzeptferne Vorstellungen bezeichnet (vgl. Bannert & Schnotz 2006). Vor dem Hintergrund verschiedener Untersuchungen (vgl. Kosslyn 1973; Kosslyn et al. 1978) nehmen verschiedene Autor*innen an (vgl. z. B. Chabris & Kosslyn 2005), dass es sich bei Vorstellungsbildern um konkrete analoge Repräsentationsformate handle. Chabris und Kosslyn (2005) sprechen sogar davon, dass Vorstellungsbilder tatsächlich „pictures in the head“ (ebd., S. 42) seien.

Vorstellungsbilder werden sowohl auf der Grundlage eines konkreten Textes als auch auf der Grundlage von Vorerfahrungen mit den jeweiligen Elementen konstruiert, deren perzeptuelle und konzeptuelle Informationen in abstrakterer Form im Langzeitgedächtnis gespeichert wurden (vgl. Lloyd 1982). Sie können sogar zu abstrakten Funktionswörtern wie „und“, „oder“, „etc.“ konstruiert werden (vgl. Sadoski & Paivio 2001, S. 84 ff.).

Vorstellungsbilder sind dabei keinesfalls ausschließlich zweidimensional, sondern können ebenso dreidimensional sein und im Kopf beliebig rotiert werden (vgl. Kosslyn 1980). Kosslyn (1980) veranschaulicht dies mit der Frage an die Leserin bzw. den Leser, ob ein Frosch Lippen und einen kleinen grünen Schwanz habe. Laut Kosslyn versuchen Leser*innen Antworten auf diese Frage zu entwickeln, indem sie sich einen Frosch vorstellen und das Abbild des Frosches mental rotieren²³, um im Detail seine Lippen und sein Hinterteil zu ‚betrachten‘ (vgl. ebd.).

Es erscheint somit – wie zu Beginn dieses Kapitels bereits angedeutet – schwierig, zwischen Vorstellungsbildern und mentalen Modellen zu differenzieren. Einen pragmatischen Unterscheidungsansatz liefert Dutke (1994). Er verwendet als Metapher zur Veranschaulichung der Beziehung zwischen Vorstellungsbild und mentalem Modell einen Würfel (vgl. ebd.). Das mentale Modell eines Würfels verfügt – je nach Vorwissen der Lernenden – über Informationen zu allen sechs Seiten des Würfels und erfasst darüber hinaus auch die Beziehungsrelationen der Seiten zueinander. Mithilfe dieses Modells kann die Vorstellung des

²³ Entsprechende Rotationsoperationen wurden auch für das Lesen von Diagrammen diskutiert (vgl. Simkin & Hastie 1987).

Würfels daher mental im Kopf gedreht und rotiert werden; jede Seite lässt sich so einzeln in einer mehr oder weniger flüchtigen Momentaufnahme betrachten. Unter Vorstellungsbildern versteht er eben diese Momentaufnahmen, die beim Rotieren des Würfels aus einer bestimmten Perspektive gemacht und im Arbeitsgedächtnis kurzfristig gespeichert werden (vgl. ebd.).

Verschiedene Autor*innen nehmen an, dass Vorstellungsbilder, ähnlich wie mentale Modelle, als Grundlage für Elaborationen oder Inferenzen verwendet werden (vgl. Kosslyn 1994; Schnotz 2014b; Bannert & Schnotz 2006; Sumfleth & Schüttler 1995). Werden Leser*innen mit einem ihnen unbekanntem Text (kontinuierlich oder diskontinuierlich) konfrontiert oder mangelt es ihnen beim Lesen an einer konkreten Bezugsbasis, so versuchen sie, um den Text zu verstehen, an ihnen bekannte Sachverhalte anzuknüpfen. Vorstellungsbilder scheinen dabei als Bezugsbasis, Ausgangspunkt oder als Gerüst für weitere mentale (Schlussfolgerungs-)Prozesse²⁴ zu fungieren und den Konstruktionsvorgang frühzeitig in eine bestimmte Richtung zu lenken (vgl. Sadoski & Paivio 2001; Paivio 1990; Bannert & Schnotz 2006; Sumfleth & Schüttler 1995). So zeigen beispielsweise verschiedene empirische Untersuchungen, dass Lernende davon profitieren, wenn sie Bilder betrachten, bevor sie mit dem Lesen von Texten beginnen (vgl. Eitel, Scheiter & Schüler 2013; Eitel & Scheiter 2015; Leopold & Mayer 2015; Bransford & Johnson 1972; Kulhavy, Stock & Caterino 1994; Schnotz 2005; Clark & Mayer 2011)²⁵.

Knauff und Kollegen (vgl. Knauff & Johnson-Laird 2002; Knauff & May 2006; Knauff 2006, 2007, 2009, 2013; Fangmeier et al. 2006) führen allerdings in Widerspruch zu der Interpretation der zuvor genannten Ergebnisse aus, dass bildlich leicht vorstellbare Sachverhalte das logische Schlussfolgern behindern würden. Sie sprechen hier sogar von einem *visuellen Beeinträchtigungseffekt* (engl. visual impedance effect) (vgl. ebd., siehe Ausführungen zum logisch-räumlichen Schlussfolgern im vorausgegangenen Abschnitt).

Da sich für beide Ausführungen empirische Hinweise finden lassen, wäre es wünschenswert in zukünftigen Untersuchungen zu ermitteln, wann sich das Kon-

²⁴ Die Annahme, dass Vorstellungsbilder einen eigenen Erkenntnisgegenstand darstellen und als Basis für Schlussfolgerungsprozesse fungieren, ist keinesfalls unumstritten und wird kontrovers diskutiert (vgl. Knauff 2007, 2013; Kosslyn 1994; Pylyshyn 1973).

²⁵ Dabei kann es bereits genügen, wenn das Bild lediglich 600 ms betrachtet wird (vgl. Eitel et al. 2013).

struieren von Vorstellungsbildern als lernförderlich erweist und wann als lernhinderlich. Insbesondere für das Verstehen von visuell-räumlichen Darstellungen wie Diagrammen, bei deren Analyse auf Vorstellungsbildern basierende Schlussfolgerungen in hohem Maße mit räumlich-logischen Schlussfolgerungen interferieren könnten, scheinen diese Erkenntnisse von besonderer Relevanz zu sein.

3.8.2. Kognitionspsychologische Modelle des Diagrammverstehens

3.8.2.1 Diagrammverstehen nach Pinker (1990)

Pinker (1990) gehört zu den ersten Wissenschaftler*innen, die das Diagrammverstehen aus kognitionspsychologischer Sicht systematisch modelliert haben. Pinkers *Theorie des Diagrammverstehens* bzw. vielmehr seine modelltheoretischen Annahmen wurden empirisch durch zwei Dissertationen bestätigt (vgl. Pinker 1983 sowie Simcox 1983, zitiert nach Pinker 1990). Das Modell von Pinker (1990) gliedert sich in drei übergeordnete Komponenten: die Wahrnehmung, das Arbeitsgedächtnis und das Langzeitgedächtnis (siehe Abbildung 7).

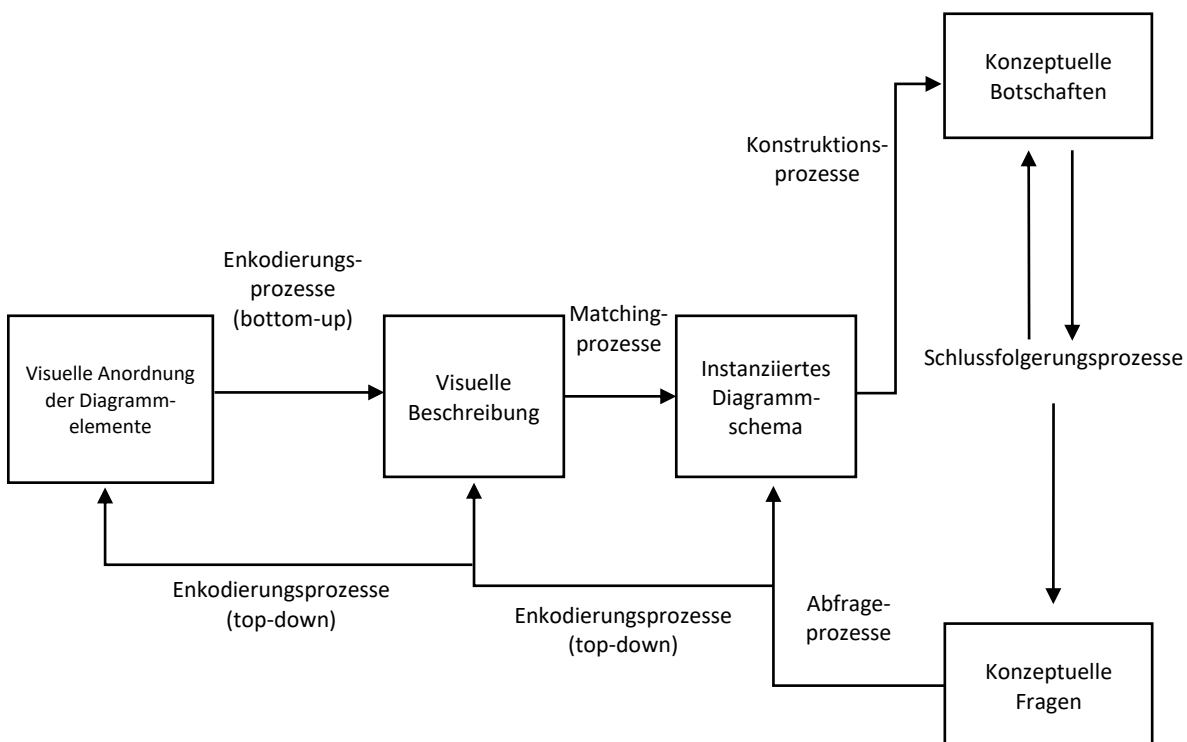


Abbildung 7. Modell des Diagrammverstehens nach Pinker 1990 (aus dem Englischen nach Pinker 1990, S. 104)

Pinker (1990) nimmt an, dass beim Lesen eines Diagramms, das Diagramm bzw. die einzelnen Diagrammelemente zunächst visuell *enkodiert*²⁶ werden. Im Arbeitsgedächtnis entsteht dadurch eine *visuelle Beschreibung* des Diagramms („visual description“, ebd., S. 77). In dieser werden visuell-räumliche Charakteristika des Diagramms in Form separater Elemente (Pinker spricht hier von „symbols“, ebd., S. 77) abgebildet. Die jeweiligen Elemente werden propositional²⁷ (siehe Abschnitt 3.8.1.2) zu einer visuellen Beschreibung verbunden (vgl. ebd.).

Es kann angenommen werden, dass Umfang und Vollständigkeit der visuellen Beschreibungen abhängig sind von den (freien) Kapazitäten des Arbeitsgedächtnisses (vgl. Lohse 1993, 1997; Kosslyn 1985, 1989; Pinker 1990), der Komplexität des Diagramms und der Gruppierung von Elementen innerhalb des Diagramms (vgl. Felbrich 2005; Xi 2005; Katz et al. 2002; Carpenter & Shah 1998; Shah 1997; Shah, Mayer & Hegarty 1999). So geht Kosslyn (1989) beispielsweise davon aus, dass nur vier Elemente gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis gespeichert werden können (vgl. ebd.; siehe dazu auch Miller 1956).

Aufbauend auf der visuellen Beschreibung des Diagramms kommt es zur Aktivierung eines Diagrammschemas. *Diagrammschemata* definiert Pinker (1990) als „[...] a memory representation embodying knowledge in some domain, consisting of a description which contains ‘slots’ or parameters for as yet unknown information“ (ebd., S. 95). Dabei handelt es sich um eine Art im Langzeitgedächtnis gespeicherte Anleitung zum Bau eines mentalen Gerüsts, die Diagrammlesende top-down dazu anleitet und sie dabei unterstützt, neue Informationen in Leerstellen des Gerüsts einzuordnen und Leseerwartungen, im Sinne konzeptueller Fragen, zur Vervollständigung weiterer Leerstellen zu wecken. Das instanziierte Diagrammschema enthält daher sowohl deklaratives Wissen über Konventionen des vorliegenden Diagramms als auch prozedurales Wissen darüber, wie sich dem Diagramm weitere Informationen entnehmen lassen. Hat eine Diagrammleserin oder ein Diagrammleser bereits Erfahrung im Umgang mit ähnlichen Diagrammen und verfügt sie oder er über ein angemessenes

²⁶ *Enkodierung* kann vereinfacht als Prozess der Aufnahme einer Information in das Gehirn verstanden werden (vgl. Myers & Wilson 2014).

²⁷ Simkin und Hastie (1987) gehen hier beispielsweise eher von einer bildhaften Organisation aus und sprechen von „schematically organized images“ (ebd., S. 459).

Schema, um das Diagramm (mental) zu beschreiben²⁸, so laufen die entsprechenden kognitiven Prozesse vermehrt automatisch ab (vgl. Shiffrin & Schneider 1977); die visuellen Beschreibungen sind dann elaborierter und vollständiger (vgl. Pinker 1990).

Pinker (1990) nimmt an, dass sich im Langzeitgedächtnis verschiedene Diagrammschemata befinden können.²⁹ Die Aktivierung eines spezifischen Schemas erfolgt auf Grundlage von *Matching-Prozessen* zwischen der visuellen Beschreibung des Diagramms im Arbeitsgedächtnis und den zur Verfügung stehenden Schemata. So ist beispielsweise das Vorhandensein einer Linie innerhalb eines kartesischen Koordinatensystems ein starker Prädiktor dafür, dass ein Liniendiagrammschema ausgewählt wird. Mithilfe des ausgewählten Schemas identifiziert die Leserin oder der Leser dann die relevanten Diagrammelemente. Zusätzlich hilft das Schema bei der Übersetzung der grafischen Informationen in *konzeptuelle Botschaften (conceptual messages)*, einer Art internaler propositionaler Wissensrepräsentation (siehe Abschnitt 3.8). Gespeicherte *konzeptuelle Botschaften* können genutzt werden, um mithilfe von *Schlussfolgerungsprozessen konzeptuelle Fragen* zu erstellen. Die entsprechenden Fragen werden in einem iterativen, top-down-gesteuerten *Abfrageprozess* an das Diagramm bzw. die bis dato mental konstruierte Wissensrepräsentation (visuelle Beschreibung) gestellt (vgl. ebd.).

Beispielsweise könnte in einer Aufgabe, in der Datenpunkte interpoliert werden müssen, eine *konzeptuelle Frage* nach bestimmten Punktwerten fragen.³⁰ Zur Be-

²⁸ Detailliertere Ausführungen über die dazu notwendige Fachsprache finden sich bei Nitz (2012) sowie Nitz, Nerdel und Prechtel (2012).

²⁹ Pinkers Modell wurde für das Lesen von Balkendiagrammen entwickelt. Verschiedene Autor*innen nehmen jedoch an, dass es auch auf Liniendiagramme übertragen werden kann (vgl. Felbrich 2005; Maichle 1994; Lohse 1997). Ausführliche Beschreibungen hierzu liefern Felbrich (2005) und Lohse (1997).

³⁰ Pinker (1990) liefert mit seinen Ausführungen zur Entwicklung konzeptueller Fragen eine Erklärung für die selektive Wahrnehmung perceptuell auffälliger Informationen in Diagrammen (vgl. MacEachren 2004). So schlussfolgert beispielsweise MacEachren (2004): „If graph (and other visual display) reading does proceed as Pinker hypothesizes, it would explain why we often seem only able to see what we know to look for“ (ebd., S. 182). Weitere Faktoren, welche die selektive Wahrnehmung/Interpretation verstärken können, sind die Verfügbarkeit von oder ggf. auch der Mangel an Metastrategien sowie die bereits erwähnten beschränkten Kapazitäten des Arbeitsgedächtnisses (vgl. Lohse 1997; Pinker 1990). Insbesondere Letzteres führt dazu, dass nicht jede relevante Information aus dem Diagramm – selbst, wenn diese in die visuelle Beschreibung übernommen wurde – auch tatsächlich als konzeptuelle Botschaft gespeichert werden kann (vgl. Pinker 1990).

antwortung dieser Frage wird dann das Diagramm oder dessen mentale Wissensrepräsentation inspiziert. Das Diagrammschema entscheidet darüber, welche Interpolationsprozeduren dabei zulässig sind. Eine auf diese Weise ermittelte Information, z. B. ein Punktwert, wird der bestehenden Wissensrepräsentation hinzugefügt. Die im Rahmen dieses Prozesses gewonnenen Erkenntnisse können in das Langzeitgedächtnis überführt werden (vgl. Pinker 1990; zu einer kognitiven Betrachtung von Leseerwartungen siehe Moser 2003).

Mittels Schlussfolgerungsprozessen, in die sukzessive (zunehmend komplexere) Informationen aus dem jeweiligen inhaltlichen Kontext einbezogen werden, kann der Leser durch tiefere Verarbeitung der konzeptuellen Botschaften auch neue qualitative Informationen konstruieren (vgl. Pinker 1990). Pinker (1990) betont allerdings, dass solche Schlussfolgerungsprozesse weit über die von ihm vordergründig untersuchten, vornehmlich bottom-up-gesteuerten Prozesse der Informationsentnahme hinausgehen (vgl. ebd.). Er betrachtet derartige inhaltliche Schlussfolgerungsprozesse nicht als einen spezifischen Bestandteil des Diagrammverstehens, sondern als generelle kognitive Vorgänge und deutet sie in seiner Theorie des Diagrammverstehens daher lediglich an:

„Naturally, I have little to say about these abilities here [to perform arithmetic operations; to infer from the context of the graph what information should be extracted from the graph, to draw qualitative conclusions relevant to some domain of knowledge based on the information in the graph]; they are part of the study of cognition in general and not the study of graph comprehensions. However, I mention them here because many types of information can be obtained either directly from a conceptual message or indirectly from inferential processes operating on the conceptual message” (Pinker 1990, S. 104).

Es verwundert somit auch nicht, dass Pinker (1990) dem domänenspezifischen, inhaltlichen Vorwissen keine besondere Funktion beim Diagrammverstehen beimisst und stattdessen vornehmlich auf das diagrammspezifische Vorwissen rekurriert. Die Fähigkeit, ein Diagramm zu analysieren, die damit vornehmlich der Informationsentnahme entspricht (siehe Abschnitt 3.4.1), ist daher nach Pinker (1990) maßgeblich von der Qualität der gebildeten visuellen Beschreibung und der Qualität des Diagrammschemas abhängig.

Für diese Annahme wird Pinker (1990) jedoch von Feeney et al. (2000) kritisiert. Die Autor*innen bemängeln explizit, dass Pinker (1990) sich in seiner Theorie

des Diagrammverstehens zu sehr auf die bottom-up-gesteuerte Informationsentnahme aus Diagrammen konzentrierte und Schlussfolgerungsprozesse nicht in seine Theorie einbeziehe:

„Whilst we agree with Pinker that inferential processes are of interest to cognitive psychologists generally, we nevertheless feel that the nature of those inferential processes and the factors which affect them are of considerable interest to any theory of graph comprehension“ (Feeney et al. 2000, S. 159).

Obgleich Pinkers Ausführungen somit nur einen ersten Ansatz zur Konzeptualisierung des Diagrammverstehens darstellen, sei darauf hingewiesen, dass insbesondere seine Überlegungen zum Einfluss von Diagrammschemata auf die Interpretation von Diagrammen von besonderer Relevanz sind, um im nachfolgenden Verlauf dieser Arbeit Lernerprobleme beim Diagrammverstehen zu erklären (siehe Abschnitte 4.3.2 und 7.6.3).

3.8.2.2 Integratives Diagrammverstehen nach Carpenter und Shah (1998)

Eine der am häufigsten zitierten Arbeiten zum Diagrammverstehen stammt von Carpenter und Shah (1998). Die Autorinnen schlagen auf der Grundlage ihrer empirischen Analysen ein *integratives Modell* des Diagrammverstehens vor (vgl. Carpenter & Shah 1998). Sie erweitern Pinkers Modell um einen zyklischen Charakter und verbinden perzeptuelle Prozesse (z. B. Vergleichen von Steigungen) mit einfachen konzeptuellen Schlussfolgerungsprozessen (z. B. Identifizieren inhaltlicher Variablen). Durch die Einbindung konzeptueller Aspekte unterscheiden sie sich grundlegend von (hauptsächlich vorausgegangenen) Autor*innen, die in ihren Modellen³¹ ausschließlich auf perzeptuelle Musterkennungs- sowie einfache Translations- bzw. Interpretationsprozesse fokussieren (vgl. z. B. Cleveland & McGill 1985; Simkin & Hasti 1987).

Insbesondere die Annahme von Carpenter und Shah (1998), dass Diagrammverstehen in einem zyklischen, integrativen Verstehensprozess stattfindet, erweist sich als außerordentlich relevant, um das Diagrammverstehen im Verlauf dieser Arbeit zu operationalisieren (siehe insbesondere Abschnitt 9.2). Es sei allerdings betont, dass auch das integrative Modell nach Carpenter und Shah (1998) wei-

³¹ Carpenter und Shah (1998) bezeichnen solche Modelle als „pattern-recognition models“ (ebd., S. 74).

terhin ein Verstehensmodell mit starkem Fokus auf bottom-up-gesteuerte Prozesse ist. *Musterkennungsprozesse* stellen auch hier den wesentlichen Schritt im Verstehensprozess dar. So betonen die Autorinnen beispielsweise: „The assumption is that most of the cognitive action comes in the first step, recognizing the graphic pattern, even though pattern recognition must be followed by other steps“ (Carpenter & Shah 1998, S. 76).

Auch sie nehmen an, dass Diagrammleser*innen, ähnlich wie von Pinker (1990) beschrieben, zunächst perzeptuelle Informationen in Form visueller Informationspakete, sogenannter visueller *Chunks*, im Arbeitsgedächtnis enkodieren. Als Chunks werden in psychologischen Kontexten Informationseinheiten bezeichnet, die als Ganzes im Arbeitsgedächtnis verarbeitet werden können (vgl. z. B. Miller 1956; Simon 1974; Handwerker 2008). In verschiedenen Kontexten konnte empirisch gezeigt werden, dass Expert*innen – im Gegensatz zu Noviz*innen – stärker zwischen wesentlichen und unwesentlichen Informationen unterscheiden und dadurch in der Lage sind, inhaltlich bedeutsamere Chunks im Arbeitsgedächtnis zu konstruieren (vgl. Chase & Simon 1973; Adelson 1981; Myles-Worsley, Johnston & Simons 1988; Reingold et al. 2001). Chunks können beispielsweise Gruppen von Säulen in einem Säulendiagramm oder Linien in einem Liniendiagramm sein, solange sie nicht parallel verlaufen (vgl. Ratwani, Trafton & Boehm-Davis 2008; Katz et al. 2004; Freedman & Shah 2002; Shah & Freedman 2011; Taber 2009; Carpenter & Shah 1998). Ebenso können Chunks Abschnitte einer Linie sein, wenn es zu einer Trendwende innerhalb der Linie kommt (vgl. Carswell, Emery & Lonon 1993). Es zeigt sich, dass mit zunehmender Anzahl visueller Chunks auch die Belastung des Arbeitsgedächtnisses zunimmt. Das kann wiederum einen Einfluss auf die Strategie haben, mit deren Hilfe das Diagramm (weiter) analysiert wird: „subjects were responding to working memory limitations in determining their overall interpretation strategy“ (Carswell et al. 1993, S. 350). Gleichermäßen kann durch grafische (Um-)Gruppierung der relevanten Informationen die Belastung des Arbeitsgedächtnisses reduziert werden (vgl. Xi 2005; Katz et al. 2002; Carpenter & Shah 1998; Shah 1997; Shah et al. 1999; Winn 1991; Halford et al. 2005): „the amount of information that has to be processed in a single cognitive step can be reduced by conceptual chunking into fewer, larger entities or by segmentation into smaller sub-tasks that are performed serially“ (Halford et al. 2005, S. 71). So gelang es beispielsweise Katz et al. (2002), Lernenden das Beschreiben eines Diagramms zu

erleichtern, indem die Autor*innen die Daten in einem Diagramm grafisch gruppierten und so die Anzahl möglicher Chunks reduzierten (vgl. ebd.). Shah et al. (1999) konnten ebenfalls durch optische Umgestaltung eines Diagramms die Anzahl an Lernenden signifikant steigern, die in der Lage sind, relevante Trends zu erkennen (vgl. ebd.).

Umgeklärt ist allerdings bisher immer noch die für das hier durchgeführte Forschungsvorhaben überaus relevante Frage, ob derartige Erfolge nur durch passive, grafische Umgestaltung von Diagrammen erzielt werden können oder ob es zudem möglich ist, Lernende gezielt darin zu schulen, ein Diagramm aktiv, top-down-gesteuert mental in geeignete Chunks zu strukturieren (vgl. Katz et al. 2002, 2004).³²

Carpenter und Shah (1998) liefern empirische Hinweise dafür, dass die von den Diagrammleser*innen konstruierten Chunks in dem von ihnen angenommenen re-iterativen Interpretationsprozess mit konzeptuellen, inhaltlichen Informationen (z. B. den Variablenbezeichnungen) integriert werden. Die grafische Darstellung des Diagramms und der referierte Inhalt werden so sukzessive aufeinander zugeführt (siehe dazu insbesondere Ausführungen in Abschnitt 3.7). Insbesondere im Fall komplexer oder unbekannter Diagramme sind dazu eine Vielzahl von Interpretationszyklen notwendig. Die zyklische Natur ihres Modells („cyclic nature“, ebd., S. 85) bezeichnen die Autorinnen daher auch als „the heart of graph comprehension“ (ebd., S. 98). Diagrammleser*innen enkodieren dabei immer wieder neue, größere visuelle Chunks, interpretieren sie und setzen sie durch Kohärenzbildungsprozesse integrativ zueinander in Beziehung. Aufeinander aufbauende Verstehenszyklen fügen sich so zu einem inkrementellen Verständnis von Diagramm und Diagramminhalten zusammen (vgl. ebd.).

³² Katz et al. (2002) versuchten diesbezüglich die folgende Forschungsfrage zu beantworten: „Are visual chunks defined by the organization of the graph or can participants' attention be drawn to see the fewer chunks in the 'many chunks' graph?“ (Katz et al. 2002, S. 3; siehe dazu auch Katz et al. 2004). Zur Klärung dieser Frage untersuchten sie, ob sich die Aufmerksamkeit von Diagrammleser*innen durch Prompting so lenken lässt, dass sie weniger visuelle Chunks wahrnehmen. Einen signifikanten Effekt konnten die Autor*innen allerdings nicht nachweisen (vgl. Katz et al. 2002, 2004). Sie schlussfolgern daher pessimistisch: „Although it is dangerous to draw conclusions from null results, this lack of effect is consistent with the idea that visual chunks are a visual processing phenomenon and might not be influenced by directions on problem-solving strategy“ (Katz et al. 2004, S. 25). Mautone und Mayer (2007) waren dagegen mit ihren instruktionalen Maßnahmen in dieser Hinsicht erfolgreich (siehe Abschnitt 5.3.1).

3.8.2.3 Wissensbasiertes Diagrammverstehen nach Freedman und Shah (2002)

Freedman und Shah (2002) entwickeln, basierend auf dem Construction-Integration-Modell (CI-Modell) des Textverstehens von Kintsch (1998), das *CI-Modell des Diagrammverstehens*. Insbesondere erweitern sie dadurch – obgleich sie dies nicht explizit hervorheben – das Modell von Carpenter und Shah (1998) um den top-down-gesteuerten Einbezug verschiedener Vorwissensarten. Freedman und Shah (2002) sprechen daher auch von „knowledge-based graph comprehension“ (ebd., z. B. S. 18). Sie nehmen an, dass zusätzlich zu den visuellen Charakteristika des Diagramms³³ das domänen- und das diagrammspezifische Vorwissen die Bildung von Propositionen beeinflusst (vgl. Freedman & Shah 2002; siehe zu Ausführungen zu Propositionen in Abschnitt 3.8.1.2; siehe Abbildung 8).

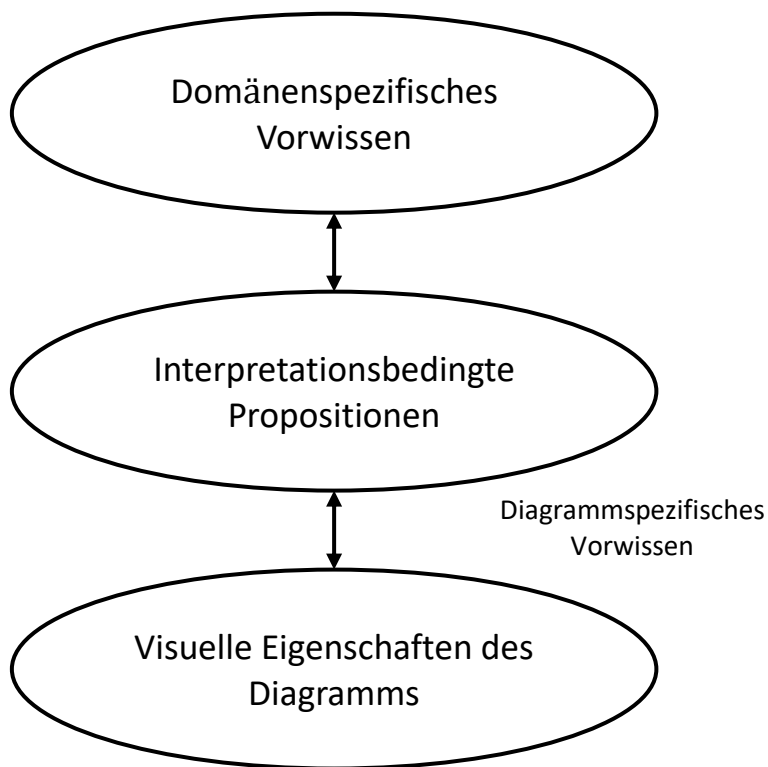


Abbildung 8. Construction-Integration-Modell (CI-Modell) des Diagrammverstehens nach Freedman und Shah 2002 (aus dem Englischen nach Freedman & Shah 2002, S. 21)

Unter *domänenspezifischem Vorwissen* verstehen die Autor*innen „any mental representation of the content of the graphical information. This knowledge may include underlying theories and models, previous findings, and methodological techniques“ (ebd., S. 23). Das domänenspezifische Vorwissen kann zum Beispiel

³³ Gemeint ist vornehmlich der Diagrammtyp und die Anordnung der Informationen innerhalb des Diagramms.

genutzt werden, um das Diagramm, ausgehend von den Inhalten, zu durchdringen (siehe Abschnitt 3.7.1). Dabei beeinflussen allerdings zunächst verschiedene Faktoren, ob das domänenspezifische Vorwissen für das Diagrammverstehen überhaupt genutzt werden kann. Zu nennen sind hier beispielsweise die Relevanz der Erklärungen, die durch das Vorwissen geliefert werden können, und die Flexibilität des Vorwissens, da dieses darüber entscheidet, ob das Vorwissen in der jeweiligen Situation (automatisch) aktiviert wird (vgl. Renkl, Mandl & Gruber 1996).

Zum *diagrammspezifischen Vorwissen* zählen Freedman und Shah (2002) Vorwissen über den Aufbau von Diagrammen: „Such as the fact that there's an x-axis and a y-axis, that straight lines means linear relationships, [...] knowledge of the properties of particular types of graph formats, and so on“ (ebd., S. 25). Ähnlich wie Pinker (1990) nehmen auch Freedman und Shah (2002) an, dass dieses Wissen in Form spezifischer Diagrammschemata gespeichert wird.

Hinsichtlich des eigentlichen Diagrammverstehens gehen sie dagegen, ähnlich wie Carpenter und Shah (1998), von einem zweischrittigen Verstehensprozess aus und unterscheiden die *Konstruktionsphase* und die *Integrationsphase*.

Im ersten Schritt, der *Konstruktionsphase*, nehmen Diagrammleser*innen die explizit gegebenen Informationen auf und konstruieren auf dieser Grundlage eine oberflächliche mentale Repräsentation des Diagramms (siehe visuelle Beschreibung nach Pinker 1990). Parallel dazu aktivieren sie (automatisch) ihr mit den dargestellten Inhalten verbundenes Vorwissen. Das jeweilige Leseziel sowie das Vorwissen bestimmen, auf welche Informationen sie sich weiter konzentrieren und welche (weiteren) Informationen sie dem Diagramm entnehmen. Vornehmlich werden in diesem frühen Stadium Informationen in die mentale Repräsentation eingebaut, die sich dem Diagramm leicht entnehmen lassen. Schlussfolgerungen werden zu diesem Zeitpunkt noch nicht gezogen. Nach Meinung von Freedman und Shah (2002) seien die Prozesse im ersten Schritt des Diagrammverstehens daher auch kognitiv wenig anspruchsvoll (vgl. ebd.). Sie widersprechen damit vorausgegangenen Ausführungen zum Diagrammverstehen, in denen (Mustererkennungs-)Prozesse zu Beginn einer Interpretation als kognitiv besonders anspruchsvoll eingeschätzt wurden (siehe zuvor beschriebene Ausführungen von Pinker 1990 sowie Carpenter und Shah 2002).

In dem zweiten, ihrer Meinung nach deutlich anspruchsvollerem Schritt des Diagrammverstehens, der *Integrationsphase*, wird die während der Konstruktionsphase enkodierte mentale Repräsentation erweitert. Dabei werden die grafischen

und textuellen Informationen mit dem Vorwissen integriert und zu einer kohärenten *interpretationsbedingten Proposition* verbunden (siehe Abbildung 8). Unter Zuhilfenahme des Vorwissens finden top-down gesteuert Schlussfolgerungsprozesse statt und führen zu einer Elaboration der konstruierten mentalen Repräsentation. Die beiden Schritte des Diagrammverstehens erfolgen in alternierenden Zyklen, in denen sukzessiv neue Erkenntnisse gewonnen werden (vgl. Freedman & Shah 2002; siehe dazu auch Kintsch 1988).

Es finden sich verschiedene Hinweise dafür, dass Personen mit hohem diagrammspezifischen und hohem domänenspezifischen Vorwissen ein Diagramm leichter in bedeutungsvolle Informationsschunks einteilen können und eher in der Lage sind, dem Diagramm inhaltliche Aussagen zu entnehmen als Personen mit geringem Vorwissen (vgl. Shah 2002; Shah, Freedman & Vekiri 2005; Freedman & Shah 2002). Ferner finden sich Hinweise darauf, dass die jeweiligen Prozesse schneller und fachlich korrekter ablaufen, wenn Graphenverläufe mit dem domänenspezifischen Vorwissen übereinstimmen (vgl. Shah 2002; siehe Abschnitte 4.3 und 4.4).

3.8.2.4 Interaktives Diagrammverstehen nach Hegarty (2011)

Hegarty (2011) baut auf den Arbeiten von Pinker (1990) und Freedman und Shah (2002) sowie auf ihrem eigenen Modell des Abbildungsverstehens auf (vgl. Hegarty 2005; Kriz & Hegarty 2007), kombiniert die verschiedenen Modelle und erweitert diese insbesondere um das zielgerichtete Lesen und die Interaktion mit der Abbildung (siehe Abbildung 9).

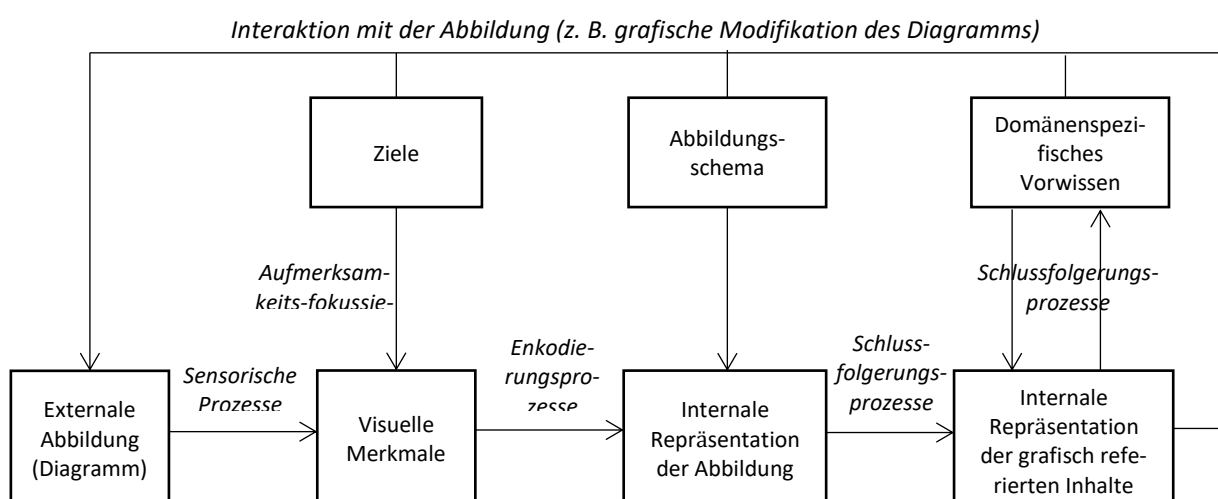


Abbildung 9. Modell des Abbildungsverstehens nach Hegarty (2011) (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Hegarty 2011, S. 453)

In Übereinstimmung mit Freedman und Shah (2002) nimmt Hegarty (2011) an, dass das Verstehen von Abbildungen aus einer komplexen Interaktion von bottom-up und top-down gesteuerten Prozessen besteht (vgl. Canham & Hegarty 2010). Entsprechende Prozesse wurden bereits in den vorausgegangenen Abschnitten ausführlich beschrieben. Auf nähere Ausführungen zu diesen Prozessen wird daher hier verzichtet. Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass Hegarty (2011), im Gegensatz zu Freedman und Shah (2002), die von der Konstruktion propositionaler Repräsentation (siehe Abschnitt 3.8.1.2) ausgehen, hier die Konstruktion eines mentalen Modells annimmt (vgl. insbesondere Hegarty 2005; Kriz & Hegarty 2007; siehe Abschnitt 3.8.1.3).

Wesentlich ist vor allem, dass Hegarty (2011) stärker als Freedman und Shah (2002) die top-down-gesteuerte Interaktion mit der jeweiligen Darstellung in das Diagrammverstehen einbezieht. Die *Interaktion mit der Abbildung* (siehe Abbildung 9) kann sowohl mental erfolgen (z. B. durch gedankliches Chunking) als auch explizit nach außen sichtbar durch Modifikation der Abbildung. Diagrammler*innen können beispielsweise Diagrammelemente hervorheben oder das Diagramm grafisch in Abschnitte strukturieren. Hegarty (2011) bezeichnet die dazu notwendigen Fähigkeiten – in Anlehnung an DiSessa (2004) – als metarepräsentationale Kompetenzen. Mittels vorwissensbasierter Schlussfolgerungsprozesse, in Interaktion mit den zuvor genannten externalisierten Modifikationen der grafischen Darstellung, erweitern, modifizieren und revidieren Diagrammler*innen ihr mentales Modell des inhaltlichen Referenten. Der Informationsgehalt des mentalen Modells kann dadurch weit über den Informationsgehalt der eigentlichen Darstellung hinausgehen. Das neu konstruierte Wissen kann sich dann wiederum auf die zuvor beschriebenen Interpretations- und Modifikationsprozesse auswirken (vgl. ebd., siehe Rückkopplungspfeile in Abbildung 9³⁴).

Die Modellierung der Interaktion von Modifikations- und Schlussfolgerungsprozessen nach Hegarty (2011), in Kombination mit den zuvor beschriebenen theoretischen Ausführungen, bildet eine geeignete theoretische Grundlage für die Analyse von Lernerproblemen und die Identifikation von Förderbedarfen (siehe Forschungsfrage 1, Kapitel 4) sowie für die gezielte Suche nach geeigneten Förderkonzepten (siehe Forschungsfrage 2, Kapitel 5).

³⁴ Es sei darauf hingewiesen, dass Hegarty (2005) sowie Kriz und Hegarty (2007) die externalisierte Interaktion mit der grafischen Darstellung noch nicht explizit in ihr Modell eingebunden hatten.

3.8.3. Cognitive-Load-Theorie (CLT)

Die *Cognitive-Load-Theorie (CLT)* wurde in den 1980er Jahren von John Sweller entwickelt. Verschiedene Autor*innen haben die Theorie bereits angewandt, um das Lesen diskontinuierlicher Texte bzw. von Text-Bild-Kombinationen mit biologischen Inhalten zu analysieren (vgl. z. B. Brandstetter-Korinth 2017; Kragten, Admiraal & Rijlaarsdam 2015; Zander 2010; Cierniak, Scheiter & Gerjets 2009; Eckhardt 2010). Die Theorie erklärt den Zusammenhang zwischen kognitiven Verarbeitungsprozessen und Lernverhalten. Eine wesentliche Annahme der Theorie ist, dass die kognitiven Kapazitäten des Arbeitsgedächtnisses begrenzt und die des Langzeitgedächtnisses theoretisch unbegrenzt sind. Bevor Informationen aus dem Arbeitsgedächtnis in das Langzeitgedächtnis überführt werden, müssen sie im Arbeitsgedächtnis verarbeitet und organisiert werden. Lernprozesse können zwar durch Schemata aus dem Langzeitgedächtnis organisiert und angeleitet werden, was sich häufig als Entlastung für das Arbeitsgedächtnis erweist, die insgesamt zur Verfügung stehenden Kapazitäten des Arbeitsgedächtnisses lassen sich dadurch aber nicht erweitern (vgl. z. B. Sweller, van Merriënboer & Paas 1998; zu einer übersichtlichen Darstellung der Zusammenhänge siehe Pollock, Chandler & Sweller 2002). Werden die kognitiven Kapazitäten des Arbeitsgedächtnisses überschritten, kommt es zu einer kognitiven Überlastung, dem sogenannten *Cognitive Overload* (vgl. z. B. Mayer & Moreno 2003). Die begrenzten Ressourcen des Arbeitsgedächtnisses (vgl. Miller 1956) wirken somit als limitierender Faktor für das Lernen. Sie können durch lernförderliche und lernhinderliche Denkhandlungen beansprucht werden (vgl. z. B. Sweller 2010).

Die Cognitive-Load-Theorie wird häufig verwendet, um Lehrmethoden und Lernumgebungen so zu gestalten, dass die Ressourcen des Arbeitsgedächtnisses möglichst effektiv genutzt werden können. Es wird angenommen, dass sich ein positiver Einfluss auf das Lernen ergibt, wenn lernhinderliche Arten kognitiver Belastung reduziert werden, weil dadurch mehr kognitive Ressourcen für lernförderliche Aktivitäten zur Verfügung stehen. Die *kognitive Belastung* (Cognitive Load – CL), die im Arbeitsgedächtnis entsteht, wird dabei als mehrdimensionales Konstrukt angesehen (vgl. z. B. Sweller et al. 1998; zu einer Zusammenfassung siehe z. B. Lingnau, Steinmann & Koffler 2013).

In vielen Arbeiten werden drei Arten von Belastungen des Arbeitsgedächtnisses unterschieden (siehe Abbildung 10): die extrinsische (engl. Extraneous Cognitive Load – ECL), die intrinsische (engl. Intrinsic Cognitive Load – ICL) und die lernbezogene Belastung (engl. Germane Cognitive Load – GCL) (vgl. Kalyuga 2011; Van Gog & Paas 2008; Sweller et al. 1998).

Die *extrinsische kognitive Belastung* (ECL) ist die lernhinderliche kognitive Belastung, die durch ineffizient bzw. ineffektiv aufbereitete Lernumgebungen, insbesondere durch nicht-lernergerichtete Informationen, verursacht wird (vgl. Sweller 2010). Dazu gehören z. B. auffällig gestaltete Grafiken, die von den lernrelevanten Inhalten ablenken. Durch die extrinsische kognitive Belastung werden kognitive Ressourcen gebunden, die den Lernenden dann nicht mehr für das Lernen zur Verfügung stehen. Ebenso wie die extrinsische kognitive Belastung durch ungünstig gestaltete Arbeitsmaterialien erhöht werden kann, kann sie auch durch geeignete Modifikationen der Lernmaterialien reduziert werden (vgl. z. B. Mayer & Moreno 2003, 2010; Cierniak et al. 2009; Sweller et al. 1998; Mayer et al. 2008; Butcher 2006; Moreno & Park 2010; Sweller, Ayres & Kalyuga 2011). Verschiedene Effekte, wie der *Split-Attention-Effekt* (vgl. Cierniak et al. 2009; Ayres & Sweller 2005; Clark & Mayer 2011; Mayer & Moreno 2003; Van Bruggen, Kirschner & Jochems 2002) oder der *Modalitätseffekt* (Mayer & Moreno 2003) werden in diesem Zusammenhang diskutiert.

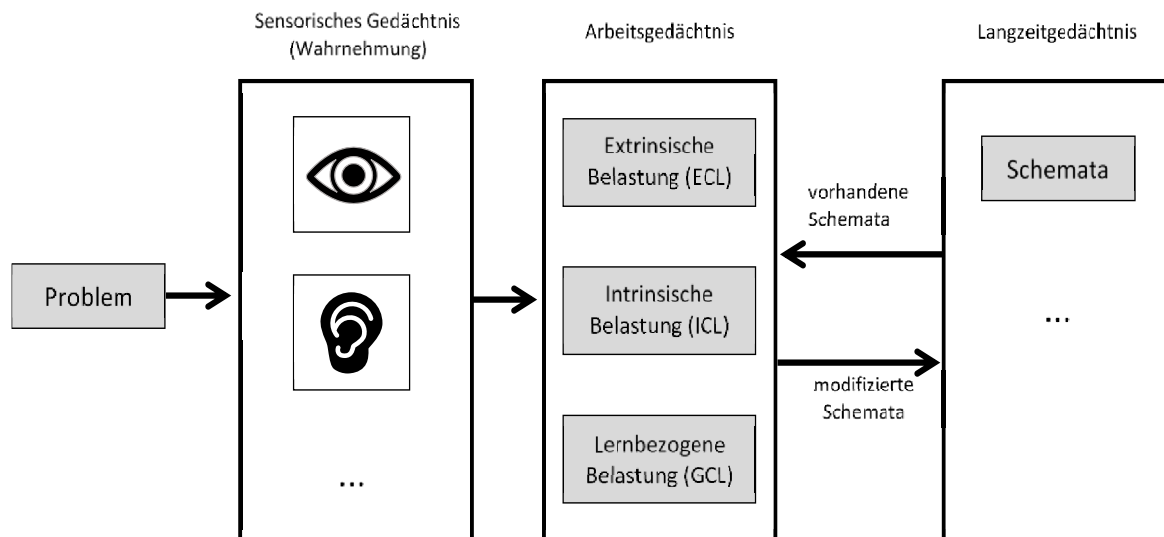


Abbildung 10. Kognitive Architektur des Menschen (nach Lingnau et al. 2013, S. 8)

Unter der *intrinsischen kognitiven Belastung* (ICL) wird die Belastung des Arbeitsgedächtnisses verstanden, die durch die den Lerninhalten innewohnende (intrinsische) Komplexität verursacht wird. Sweller (2010) spricht in diesem Zu-

sammenhang von einer „natural complexity“ der Inhalte (ebd., S. 124). Insbesondere abstrakte Inhalte oder Inhalte mit vielen inhaltlichen Querverbindungen zwischen einzelnen Elementen, führen zu einer hohen intrinsischen kognitiven Belastung. Entsprechend lassen sich Vokabellisten leichter (auswendig) lernen als beispielsweise der Vorgang der DNA-Replikation (vgl. Sweller 2010). Sweller (2010) betont, dass der ICL – zusätzlich zu der den Lerninhalten innewohnenden Komplexität – nur abhängig vom Vorwissen sei und daher beispielsweise auch unabhängig von der Darstellung der Inhalte (vgl. ebd.). Die im Detail deutlich komplexere Beziehung zwischen intrinsischer und extrinsischer kognitiver Belastung vereinfacht er daher wie folgt: „If element interactivity can be reduced without altering what is learned, the load is extraneous; if element interactivity only can be altered by altering what is learned, the load is intrinsic“ (ebd., S. 125; zu einer differenzierten Analyse siehe Beckmann 2010).

Prinzipiell würde dies bedeuten, dass sich die intrinsische kognitive Belastung eines bestehenden Lerninhaltes nicht reduzieren lässt.³⁵ Verschiedene empirische Untersuchungen liefern allerdings zumindest Hinweise darauf, dass dies durch instruktionale Maßnahmen oder eine geeignete Gestaltung der Lernmaterialien gelingen kann (vgl. Pollock et al. 2002; Zheng, Gupta & Dewald 2012; Lee, Plass & Homer 2006; Gerjets, Scheiter & Catrambone 2004). So ist es beispielsweise gelungen, die Komplexität von Informationsmaterialien bzw. die intrinsische kognitive Belastung von Lernenden durch Segmentierung und sukzessive Darbietung der jeweiligen Informationen zu reduzieren (vgl. Gerjets et al. 2004; Pollock et al. 2002; Lee et al. 2006). Eine Übersicht zur Gestaltung von Lernmaterialien, mit dem Ziel, die intrinsische Belastung zu reduzieren, findet sich beispielsweise bei Van Merriënboer, Kirschner und Kester (2003). Zusätzlich dazu finden sich ebenso Ansätze, in denen die intrinsische kognitive Belastung durch Veränderung des Vorwissens beeinflusst wird (vgl. z. B. Mayer & Moreno 2010). Zu nennen ist hier beispielsweise das Pretraining-Prinzip, das Mayer & Moreno (2010) definieren als Unterstützung bei der Konstruktion kontextrelevanten Vorwissens, um nachfolgend dargebotene Inhalte zu verstehen. Mayer & Moreno (2010) nehmen an, dass das Vorwissen die Lernenden dabei

³⁵ Paas et al. (2003) argumentieren beispielsweise: „Different materials differ in their levels of element interactivity and thus intrinsic cognitive load, and they cannot be altered by instructional manipulations; only a simpler learning task that omits some interacting elements can be chosen to reduce this type of load“ (ebd., S. 1).

unterstützt, die dargebotenen Inhalte in kognitiv leichter zu verarbeitende Informationschunks zu strukturieren (vgl. ebd.).

Die *lernbezogene kognitive Belastung* (GCL) wird, im Gegensatz zu den anderen beiden Belastungen, als positiv bzw. sogar essenziell für den Lernerfolg interpretiert (vgl. Paas & van Merriënboer 1994; Sweller et al. 1998). DeLeeuw und Mayer (2008) sprechen in diesem Zusammenhang von „deep cognitive processing“ (ebd., S. 223), Kalyuga (2010) von „cognitive activities designed to enhance meaningful learning“ (ebd. S. 55).

Schnotz und Kürschner (2007) verstehen den GCL als eine Art fokussierter und damit aktiv gesteuerter Konzentration auf den Lerngegenstand, mit dem Ziel, die dargebotenen Lerninhalte intensiver verarbeiten zu können (vgl. ebd.).

„Germane load is the cognitive load of some specific cognitive activities that are performed in addition to the ordinary performance of a learning task and which aim at the further improvement of learning. Learning can occur also without germane load, but germane load can further enhance learning“ (Schnotz & Kürschner 2007, S. 497)

Zu den Aktivitäten, die im Arbeitsgedächtnis zu einer lernrelevanten Belastung führen, zählen sie die bewusste und reflektierte Anwendung bisher noch nicht automatisierter Lernstrategien, die bewusste Suche nach Mustern oder Strukturen in Lernmaterialien sowie die Abstraktion von explizit dargestellten Informationen unter gleichzeitiger Suche nach impliziten Informationen (vgl. ebd.; siehe dazu auch DeLeeuw & Mayer (2008) und Mayer (2004) sowie die vorausgegangenen Ausführungen zu System 1 und 2 in Abschnitt 4.3.2.3). In der Forschung wurden bereits verschiedene Ansätze erprobt, um die lernbezogene kognitive Belastung (GCL) gezielt zu steigern (zu einer Übersicht über verschiedene Studien siehe Moreno & Mayer 2010; Berthold & Renkl 2009; Cromley et al. 2013b; Leutner, Leopold & Sumfleth 2009). Um einen Einblick in die überaus komplexen Zusammenhänge zu gewinnen, sei auf Gerjets, Scheiter und Catrambone 2006 verwiesen.

Schnotz und Kürschner 2007 betonen zudem die Relevanz der Motivation der Lernenden, die notwendig sei, damit die Lernenden überhaupt dazu bereit sind, sich unter Einsatz erheblicher kognitiver Ressourcen intensiv mit den jeweiligen Inhalten zu beschäftigen (vgl. Schnotz & Kürschner 2007; siehe dazu auch DeLeeuw & Mayer 2008). Es sei in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen,

dass gerade im Kontext des Abbildungsverstehens Lernende häufig nicht eigenständig erkennen, dass sie sich intensiv mit einer Abbildung beschäftigen müssen, um von dieser zu profitieren. Qualitative und quantitative Diagramme, die zusammen mit Fließtexten dargeboten werden, betrachten sie häufig lediglich als schmückendes Beiwerk oder ignorieren sie vollständig (vgl. Peeck 1993, 1994; Weidenmann 1989; Cromley, Snyder-Hogan & Luciw-Dubas 2010; Tang 1991; Schmidt-Weigand, Kohnert & Glowalla 2010). Weidenmann (1989) kritisiert daher: „Most people are convinced that the understanding of pictures requires only a small amount of invested mental effort. As a consequence, one tends to process pictures superficially“ (ebd., S. 161).

Die bisher angeführten Überlegungen (vgl. DeLeeuw & Mayer 2008; Sweller et al. 2011; Schnotz & Kürschner 2007) zur Betrachtung des GCL als einer Art aktiv und bewusst investierter mentaler Energie ähneln dem bereits von Salomon (1984) vorgeschlagenen Konzept der durchschnittlichen in das Lernen bzw. Verstehen investierten mentalen Anstrengung, kurz: AIME (engl. Average Invested Mental Effort). Den AIME definiert Salomon (1984) als „[...] number of nonautomatic mental elaborations applied to a unit of material“ (ebd., S. 648). Salomon (1984) zählt dazu insbesondere die aktive Strukturierung und mentale Elaboration von Informationsmaterialien sowie komplexere Schlussfolgerungsprozesse. Er bezeichnet diese Art der Informationsverarbeitung als „mindful“ (ebd., z. B. S. 648)³⁶ und grenzt sie von oberflächlicher, automatischer Informationsprozessierung ab, die er nach Langer (1984) als „mindless“ (ebd., z. B. S. 648)³⁷ bezeichnet. Verschiedene Autor*innen (vgl. Cierniak et al 2009; Cierniak 2011) sind der Auffassung, dass der AIME gut geeignet sei, den GCL zu erfassen, gegebenenfalls sogar besser als andere Skalen (vgl. ebd.).

Obgleich die Cognitive-Load-Theorie bereits seit Jahren zur Erklärung verschiedener Sachverhalte und insbesondere zur Entwicklung von Interventionen und

³⁶ Andere Autor*innen sprechen in vergleichbaren Kontexten von *Meaningful Learning* (vgl. z. B. Mayer 1996; Mayer et al. 1995; Mayer et al. 1996; Bransford, Brown & Cocking 2000; Mayer & Wittrock 1996). Mayer und Wittrock 1996 beschreiben *Meaningful Learning* als „a process in which learners must actively construct their own learning outcomes“ (ebd., S. 53).

³⁷ Eine ausführliche Gegenüberstellung der Konzepte *Mindfulness* vs. *Mindlessness* unter Rückbezug auf verschiedene experimentelle Befunde findet sich bei Langer (1989). Es zeigen sich Ähnlichkeiten zu dem von Kahnemann (vgl. z. B. Kahnemann 2011) beschriebenen Denken in System I und System II (siehe Abschnitt 4.3.2.3).

instruktionalen Maßnahmen für den Unterricht genutzt wird, sind verschiedene Aspekte immer noch ungeklärt bzw. konnten empirisch noch nicht bestätigt werden. Insbesondere die Messbarkeit der beschriebenen Konstrukte ICL, ECL und GCL wird diskutiert (vgl. Plass, Moreno & Brünken 2010; Rey 2009; Schnotz & Kürschner 2007). Weiterhin wird diskutiert, ob sich die drei Arten kognitiver Belastung tatsächlich additiv verhalten (vgl. Sweller 2005; Paas, Renkl & Sweller 2003). Paas, Renkl & Sweller (2003) folgen dieser Additivitätshypothese und gehen zudem davon aus, dass die kognitiven Ressourcen hierarchisch investiert werden. Die kognitiven Ressourcen werden ihrer Meinung nach zunächst dem ICL zugeordnet und erst danach dem ECL und dem GCL (vgl. ebd).

„Intrinsic, extraneous, and germane cognitive loads are additive in that, together, the total load cannot exceed the working memory resources available if learning is to occur. The relations between the three forms of cognitive load are asymmetric. Intrinsic cognitive load provides a base load [...]. Any available working memory capacity remaining after resources have been allocated to deal with intrinsic cognitive load can be allocated to deal with extraneous and germane load“ (Paas, Renkl & Sweller 2003, S. 2).

Empirisch konnte die Additivitätshypothese allerdings (bisher) nicht bestätigt werden (vgl. Park 2010). Zudem ist unklar, in welcher Verbindung ICL und GCL zueinander stehen (zu einer ausführlichen Übersicht siehe Hawlitschek 2013). So subsumieren beispielsweise verschiedene Autor*innen (vgl. Kalyuga 2011; Sweller 2010; Sweller et al. 2011) das Konstrukt GCL unter das Konstrukt ICL und unterscheiden in neueren Arbeiten entsprechend nur noch zwischen ICL* (lernrelevanter kognitiver Belastung) und ECL (lernirrelevanter kognitiver Belastung).

Welche der zuvor genannten, prinzipiell ähnlichen, aber im Detail durchaus unterschiedlichen theoretischen Überlegungen sich für welchen Kontext als angemessen erweist, lässt sich nur schwer vorhersagen. Da allerdings insbesondere in Studien, die in Hinblick auf das Bild- und Diagrammverstehen durchgeführt wurden, vermehrt der Annahme einer Dreiteilung in die Konstrukte intrinsische (ICL), extrinsische (ECL) und lernbezogene Belastung (GCL) gefolgt wurde (vgl. z. B. Brandstetter-Korinth 2017; Zander 2010; Cierniak et al. 2009; Eckhardt 2010), wird auch in dieser Arbeit von einer entsprechenden Dreiteilung ausgegangen.

Ferner wird vor dem Hintergrund der analysierten Forschungsarbeiten angenommen, dass den Lernenden bei geringer intrinsischer (ICL) und geringer extrinsischer kognitiver Belastung (ECL) ausreichend mentale Ressourcen zur Verfügung stehen, um ein Diagramm intensiv zu analysieren. Die mentale Energie (AIME), die von den Lernenden dabei in die Anwendung dazu geeigneter Analysestrategien (siehe dazu insbesondere den Abschnitt 4.3.2.3) investiert wird, wird als lernbezogene kognitive Belastung (GCL) interpretiert. Es wird angenommen, dass das Verständnis des Diagramms höher ist, je mehr mentale Energie (GCL) die Lernenden in die Analyse des Diagramms investieren.

3.9. Zusammenfassung

In den vorausgegangenen Abschnitten wurde ein erster Ansatz zur Konzeptualisierung des komplexen und mehrdimensionalen Konstruktes Diagrammverstehen geliefert. Im Sinne einer Arbeitsdefinition wurde Diagrammverstehen zunächst definiert als die Konstruktion eines oder mehrerer mentaler Modelle, die zum Problemlösen verwendet werden können (siehe Abschnitt 3.2). Aufbauend auf dieser Arbeitsdefinition wurde Diagrammverstehen in die Dimensionen Informationsentnahme, Interpretieren und Erklären unterschieden (siehe Abschnitt 3.4). Die *Informationsentnahme* entspricht der Entnahme bzw. Rezeption explizit dargestellter Informationen aus dem Diagramm (siehe Abschnitt 3.4.1). Das *Interpretieren* von Diagrammen umfasst die Abstraktion von der grafischen Darstellung unter gleichzeitiger mentaler (Re-)Konstruktion der referierten inhaltlichen Situation (siehe Abschnitt 3.4.2). Das *Erklären* eines Diagramms wird als eine Erweiterung des Interpretierens von Diagrammen betrachtet. Diagrammerklären wird definiert als Elaboration des im Rahmen der Interpretation konstruierten mentalen Modells um spezifisches Vorwissen, das den Diagrammleser*innen geeignet erscheint, um damit Verläufe von Graphen kausal zu erklären. Es wird daher auch angenommen, dass Diagrammerklären erst dann stattfinden kann, wenn Diagrammleser*innen das Diagramm zuvor inhaltlich interpretiert haben. Erklären wird zudem als eng mit dem Diagrammverstehen verbunden betrachtet (siehe Abschnitt 3.4.3). Diagrammerklären wurde daher besonders intensiv analysiert. Es wurde für den Untersuchungskontext dieser Arbeit als mechanistisches Erklären von Graphenverläufen definiert (siehe Abschnitt 3.5). Die dabei stattfindenden Schlussfolgerungsprozesse wurden aus Perspektive der

Problemlöseforschung beleuchtet und als bidirektionale Schlussfolgerungsprozesse, mit einem hohen Anteil rückwärtsgerichteter Prozesse, unter Einbezug des domänenspezifischen Vorwissens beschrieben (siehe Abschnitt 3.6). Diagrammleser*innen denken dabei zwischen verschiedenen Interpretationsräumen sowie Ebenen vor- und zurück und vernetzen verschiedene inhalts- bzw. erklärungsrelevante Elemente miteinander (siehe Abschnitt 3.7). Diese Denk- und Schlussfolgerungsprozesse zwischen und innerhalb von Interpretationsräumen wurden als Translationsprozesse beschrieben und zu einem Konzept *translationaler Kohärenzbildung* – eine Art umfassenden Diagrammverstehens – kombiniert (siehe Abschnitt 3.7.3). Es wurde erläutert, dass in diesem Verstehensprozess neben mentalen Modellen zusätzlich auch propositionale Repräsentationen und Vorstellungsbilder konstruiert werden können (siehe Abschnitt 3.8.1). Die Entstehung der jeweiligen mentalen Repräsentationsformen wurde anhand verschiedener kognitionspsychologischer Modelle (siehe Abschnitt 3.8.2) als kognitiv anstrengender (siehe Abschnitt 3.8.3) progressiver Verstehensprozess aus iterativ ablaufenden Interpretationszyklen beschrieben.

4. Identifikation von Problemen und Förderbedarfen (F1)

4.1. Herleitung von Forschungsfrage 1

Im vorausgegangenen Kapitel wurde argumentiert, dass sich das Konstrukt Diagrammverstehen aus verschiedenen Dimensionen zusammensetzt: *Informationsentnahme*, *Interpretieren* und *Erklären*. Im Folgenden wird nun analysiert, welche Kompetenzen Lernende in Hinblick auf die drei Dimensionen besitzen und welche Probleme und Verstehenshürden es mithilfe von Fördermaßnahmen zu adressieren gilt. Dies erfolgte vor dem Hintergrund der theoretisch-explorativen Forschungsfrage 1:

Welche Probleme und Förderbedarfe zeigen Lernende im Umgang mit Liniendiagrammen?

Es sei vorab darauf hingewiesen, dass die drei in dieser Arbeit verwendeten Dimensionen des Diagrammverstehens in vorausgegangenen Forschungsarbeiten häufig nicht klar voneinander abgegrenzt wurden. Hinweise auf Probleme und Verstehenshürden sowie auf Kompetenzen von Lernenden beim Diagrammverstehen ließen sich daher in Hinblick auf diese drei Dimensionen nicht ohne Weiteres aus den jeweiligen Arbeiten synthetisieren. Ferner ließen sich die jeweiligen Studien zunächst nur schwer miteinander vergleichen. Teilweise lieferten die einzelnen Studien sogar widersprüchliche Aussagen. So betonen zum Beispiel Von Kotzebue und Nerdel (2012), dass Diagramme „keine intuitiv verständlichen Repräsentationen“ (ebd., S. 182) seien (siehe dazu auch Nerdel 2017, S. 180), wohingegen Ainley (1995; siehe Abschnitt 4.4.2.2.1), aufbauend auf ihren empirischen Untersuchungen, gerade auf die intuitive Leichtigkeit („intuitive ease“, ebd., S. 11) hinweist, mit der bereits junge Lernende Diagramme interpretieren können (vgl. ebd.; siehe dazu auch die empirische Studie von Pratt 1995). Die vermeintliche Widersprüchlichkeit solcher Aussagen lässt sich häufig auf die unterschiedliche Konzeptualisierung von Diagrammverstehen in den jeweiligen Studien zurückführen. Entsprechend wird gerade in neueren Arbeiten betont, dass die Heterogenität bestehender Forschungsarbeiten, in Kombination mit der dem Untersuchungsgegenstand Diagrammverstehen inhärenten Komplexität, die Diagnose von Fähigkeiten der Lernenden und die Entwicklung gezielter Fördermaßnahmen erheblich erschwere (vgl. Angra & Gardner 2018).

Deutlich wird diese Heterogenität allerdings erst dann, wenn die jeweiligen Studien in Hinblick auf ihre theoretische Fundierung sowie die Durchführung der empirischen Analyse im Detail miteinander verglichen werden. Der Beantwortung von Forschungsfrage 1 wurde daher die folgende Unterfrage vorweggestellt: *Wie lassen sich die analysierten empirischen Forschungsarbeiten zum Diagrammverstehen strukturieren, um übergeordnete Probleme zu identifizieren und Förderbedarfe zu explizieren?*

Verschiedene Autor*innen raten dazu, Diagrammverstehen zur Strukturierung aus verschiedenen Perspektiven zu analysieren (vgl. Plicht 2018; Leinhardt et al. 1990; Roth, Pozzer-Ardenghi & Han 2005; Friel et al. 2001). Im Folgenden wird ein solcher Versuch unternommen. Es sei jedoch vorweggenommen, dass die Forschungslandschaft zum Diagrammverstehen große Lücken besitzt (siehe Kapitel 0). Die deduktive Bildung von Perspektiven-Kategorien erwies sich folglich nicht als zielführend. Die Forschungs- bzw. Analyseperspektiven wurden daher induktiv gebildet. Alternative Perspektiven bzw. Kategorien erscheinen somit möglich. Die analysierten Studien wurden dazu hinsichtlich ihrer Forschungsmethodik detailliert analysiert und Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede identifiziert. Davon ausgehend wurden drei Forschungsperspektiven gebildet, aus denen sich auf die drei Dimensionen des Diagrammverstehens blicken lässt: die *kompetenzorientierte*, *defizitorientierte* und *prozessorientierte Perspektive*. Die jeweiligen Studien werden im Folgenden entsprechend dieser drei Perspektiven beschrieben.

In Abschnitt 4.2 wird auf Studien konzentriert, die Kompetenzen von Lernenden im Umgang mit Diagrammen beschreiben. Diese Studien werden unter einer kompetenzorientierten Perspektive subsumiert. In Abschnitt 4.3 werden Studien analysiert, in denen Probleme von Lernenden beim Diagramminterpretieren beschrieben werden. Da hier vornehmlich auf Missinterpretationen fokussiert wird, wird sie als defizitorientierte Perspektive bezeichnet. In Abschnitt 4.4 werden – zusammengefasst unter der prozessorientierten Perspektive – Studien zum Vorgehen von Lernenden und Experten beim Interpretieren untersucht.

Die Synthese der Erkenntnisse aus den analysierten Forschungsarbeiten sowie die detaillierte Beschreibung der drei Forschungsperspektiven erfolgen, ebenso wie die darauf aufbauende Betrachtung von Lernerproblemen und Förderbedarfen, im Rahmen der Beantwortung von Forschungsfrage 1 in Abschnitt 4.5.

Die durch Beantwortung von Forschungsfrage 1 gewonnenen Erkenntnisse werden nachfolgende verwendet, um Förderkonzepte zu identifizieren, von denen

angenommen wird, dass sie geeignet sind, um die jeweiligen Lernerprobleme und Förderbedarfe zu adressieren (siehe Forschungsfrage 2 in Kapitel 5).

4.2. Kompetenzorientierte Perspektive

Im Folgenden wird auf Kompetenzen von Lernenden im Umgang mit Diagrammen konzentriert. Um eine konzeptuelle Grundlage zur Einordnung der empirischen Erkenntnisse zu schaffen, wird in den Abschnitten 4.2.1 und 4.2.2 zunächst ausführlich über die Modellierung von Kompetenzen beim Analysieren von Diagrammen berichtet. In Abschnitt 4.2.3 werden dann exemplarisch Studien beschrieben, in denen die Kompetenzen von Lernenden aufbauend auf den zuvor beschriebenen Modellierungsansätzen empirisch untersucht wurden.

Es sei vorweggenommen, dass entsprechende Arbeiten sich vornehmlich auf die Entnahme explizit dargestellter Informationen (Informationsentnahme; siehe Abschnitt 3.4.1) aus Diagrammen beziehen. Diagrammleser*innen verbleiben dabei fast ausschließlich im Graphenraum. Forschungsarbeiten, die Kompetenzen von Lernenden in Bezug auf die Dimensionen Interpretieren und Erklären analysieren, in denen Diagrammleser*innen zusätzlich im Situationsraum agieren (siehe Abschnitte 3.4.2 und 3.4.3), sind außerordentlich selten.

4.2.1. Analyse einfacher Tätigkeiten

4.2.1.1 Informationsentnahme nach Bertin (1983), Wainer (1992) und Schnotz (1994)

Frühe Ausführungen zum Lesen von Diagrammen und zur Strukturierung des Diagrammverstehens finden sich in Bertins (1983) Werk „Semiology of Graphics“. Bertin (1983) beschreibt das Lesen eines Diagramms als einen dreischrittigen Prozess, der sukzessive abläuft und sich grundsätzlich in zwei übergeordnete Tätigkeiten einteilen lässt:

- a) die *Identifikation* der in dem Diagramm genutzten Begriffe und Konzepte,
- b) die *Wahrnehmung* der dargestellten Zusammenhänge.

Die *Identifikation* unterteilt Bertin wiederum in zwei aufeinander aufbauende, ggf. auch miteinander kombinierbare, Prozesse: *externale Identifikation* und *internale Identifikation*.

Bei der *externalen Identifikation* identifizieren Diagrammleser*innen relevante Elemente des Diagramms und gleichen sie mit ihrem Vorwissen oder zusätzlich

gegebenen Informationen ab. Sie ermitteln zunächst, welche inhaltlichen Konzepte überhaupt dargestellt sind. Dazu konzentrieren sie insbesondere auf den Diagrammrahmen (siehe Abschnitt 3.1). Durch Identifikation der referierten Konzepte reduzieren sie die potenzielle Mehrdeutigkeit der Darstellung und konstruieren ein mentales Gerüst, in das sie im nachfolgenden Leseprozess weitere Inhalte integrieren (vgl. Bertin 1983). Auf die externe Identifikation des Diagrammrahmens folgt die *internale Identifikation* der dargestellten Diagrammelemente. Dabei wird analysiert, durch welche Elemente die jeweiligen Inhalte grafisch referiert werden und wie diese Inhalte innerhalb des Diagramms perzeptuell zueinander in Beziehung gesetzt werden (vgl. ebd.).

Aufbauend auf der externalen und internalen Identifikation erfolgt die *Wahrnehmung der dargestellten Zusammenhänge*. Dabei handelt es sich nach Bertin um einen Leseprozess, der durch bewusst oder unbewusst gestellte Fragen an das Diagramm angeleitet wird. Bertin unterscheidet dabei drei Leseniveaus: elementares Lesen, intermediäres Lesen und ganzheitliches Lesen (vgl. ebd.). Lesen auf dem *elementaren Niveau* beinhaltet z. B. Ablesen eines Y-Wertes auf der Grundlage eines gegebenen X-Wertes; Lesen auf dem *intermediären Niveau* beinhaltet das Ablesen eines Trends in einem bestimmten Bereich auf der X-Achse und Lesen auf dem *ganzheitlichen Leseniveau* beinhaltet das Erfassen des Trends bzw. mehrerer Trends über den gesamten Bereich der X-Variable (vgl. ebd.). Mit zunehmendem Leseniveau werden die im Diagramm enthaltenen Informationen immer weiter komprimiert und einzelne Details vernachlässigt, um letztlich im Rahmen des ganzheitlichen Lesens eine Gesamtaussage über den Zusammenhang zwischen den Variablen treffen zu können (vgl. ebd.).

Vereinzelt wird von Autor*innen das dritte Leseniveau von Bertin, das ganzheitliche Lesen (engl. overall oder global reading), dahingehend gedeutet, dass das Vorwissen hier bereits aktiv in den Leseprozess einbezogen wird. So formuliert beispielsweise Keller (2008):

„The last type of question, called overall level questions, required students to use their background mathematics and science knowledge and experiences to help them develop a theory to explain what they saw in the graph“ (Keller 2008, S. 25).

An dieser Stelle sei allerdings darauf hingewiesen, dass Bertin (1983) grafische Darstellungen vor dem Hintergrund einer effizienten Informationsvermittlung analysiert und sich daher vornehmlich auf eine bottom-up-gesteuerte Informationsentnahme konzentriert hat. Wissensbasierte, top-down-gesteuerte Prozesse

deutet Bertin lediglich an. Obgleich nicht explizit ausgeführt scheint er diese als Prozesse zu betrachten, die erst nach der von ihm ausführlich beschriebenen Informationsentnahme erfolgen (vgl. ebd.). Diagrammleser*innen werden nach Bertin (1983) durch das ganzheitliche Lesen in erster Linie in die Lage versetzt, die Informationen aus der Darstellung in Relation zu anderen Informationen, z. B. ihrem Vorwissen, setzen zu können: „It enables the reader to retain the whole of the information and compare it to other information“ (Bertin 1983, S. 141).

Wainer (1992) erweitert Bertins Operationalisierung der Informationsentnahme. Dabei ergänzt er das dritte Leselevel von Bertin, das bisher maßgeblich die Reduktion der dargestellten Informationen zu einer Kernaussage beinhaltete, explizit um den kriteriengeleiteten Vergleich von Trends und das Erkennen von Mustern oder Gruppen (vgl. ebd.). Wainer (1992) betont zudem, dass es sich bei den drei Leseniveaus nicht zwangsläufig um drei Anforderungsniveaus zunehmender Komplexität handeln müsse: „They do not necessarily imply an increase in the empirical difficulty of the questions“ (ebd., S. 16).

Schnotz (1994) adaptiert die Kategorisierung nach Wainer (1992) bzw. Bertin (1983) und rückt das kriteriengeleitete Vergleichen noch stärker als Wainer in den Vordergrund. Schnotz (1994) differenziert zwischen dem Vergleichen einzelner Werte und dem Vergleichen von Trends. Beide Arten von Vergleichen können innerhalb einzelner Graphen erfolgen (Längsschnittvergleich) oder zwischen verschiedenen Graphen (Querschnittvergleich) (vgl. ebd.).

Die Rolle des inhaltsspezifischen Vorwissens führt allerdings auch Schnotz (1994) hier nicht näher aus. Seine Hierarchisierung enthält daher – ähnlich wie bei Bertin (1983) und Wainer (1992) – auch keine Stufe, die maßgeblich von der Verfügbarkeit inhaltlichen Vorwissens abhängt. Vielmehr nimmt Schnotz (1994) an, dass, sobald Diagrammleser*innen über geeignete Schemata verfügen, sie dem Diagramm die Informationen durch synthetisches Ablesen – eine Art unmittelbar verstehendes Lesen – relativ leicht entnehmen können, ohne dazu komplexe Schlussfolgerungsprozesse durchführen zu müssen (vgl. ebd.).

Während Schnotz in neueren Arbeiten (z. B. Schnotz 2006) ausführlich den vorwissensbasierten, konstruktiven Charakter des Text- und Bildverstehens betont, scheint er in dieser vergleichsweise frühen Arbeit (Schnotz 1994) Diagrammverstehen eher als Erkennen der Bedeutung und weniger als vorwissensbasierte Konstruktion bzw. Rekonstruktion von Bedeutung zu verstehen. So formuliert er beispielsweise: „Durch die attentiven Verarbeitungsprozesse erfolgt der Über-

gang vom einfachen Wahrnehmen zum Verstehen, indem die Bedeutung des betreffenden logischen Bildes erkannt wird“ (ebd., S. 125). Diese Differenzierung zwischen neueren und älteren Ausführungen ist insbesondere deshalb von besonderer Relevanz, da verschiedene biologiedidaktische Untersuchungen zum Umgang mit Diagrammen (z. B. Lachmayer 2008) direkt oder indirekt auf den Ausführungen von Schnotz (1994) aufbauen.

4.2.1.2 Informationsentnahme nach Curcio (1987, 1989)

Curcio (1987³⁸, 1989) untersuchte das Lesen quantitativer Diagramme im Kontext des Mathematikunterrichts. Parallel zu Bertin (1983) und Wainer (1992), aber anscheinend unabhängig von diesen, gliedert auch sie das Diagrammverstehen, aufbauend auf Arbeiten zum Leseverstehen kontinuierlicher Texte (vgl. Pearson & Johnson 1978), in drei Stufen³⁹: 1. Lesen der Daten (engl. reading the data), 2. Lesen zwischen den Daten (engl. reading between the data) und 3. Lesen über die Daten hinaus (engl. reading beyond the data) (vgl. Curcio 1987, vgl. insbesondere Curcio 1989).

In den Grundzügen ähneln die Lesestufen nach Curcio (1987, 1989) den von Bertin (1983) beschriebenen Tätigkeiten. Allerdings bezieht Curcio – im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Arbeiten – das Vorwissen aktiv in ihre Überlegungen mit ein. Zudem geht sie – was bisher noch nicht explizit geäußert und von Wainer (1992) sogar angezweifelt wurde – von einer zunehmenden Komplexität des Leseprozesses aus.

Die erste Stufe, das *Lesen der Daten*, erfordert nach Curcio (1989) ein „literal reading“ (ebd., S. 5) des Diagramms. Dabei entnehmen Diagrammleser*innen explizit dargestellte Informationen unverändert aus dem Diagramm. Zum Lesen auf dieser Stufe gehört z. B. das Identifizieren des Diagrammtitels, der Variablen oder das Ablesen einzelner Datenwerte. Curcio (1989) integriert somit den Prozess der Identifikation nach Bertin (1983) in ihre erste Lesestufe. Diese erste Stufe ist daher nach Curcio (1989) zwar eine notwendige Bedingung für das Verstehen des Diagramms, die entsprechenden Tätigkeiten betrachtet sie aber – verglichen mit nachfolgenden Tätigkeiten – als kognitiv wenig anspruchsvoll:

³⁸ Die Arbeit von Curcio (1987) im *Journal for Research in Mathematics Education* wird deutlich häufiger zitiert. Die Beschreibung der drei Lesestufen erfolgt allerdings ausführlicher im Rahmen ihres Buches „Developing Graph Comprehension. Elementary and Middle School Activities“ von 1989.

³⁹ Greenberg (2014) bezeichnet diese bereits als Kompetenzlevel.

„The reader simply ‘lifts’ the facts explicitly stated in the graph, or the information found in the graph title and axis labels, directly from the graph. There is no interpretation at this level. Reading that requires this type of comprehension is a very low level cognitive task” (Curcio 1989, S. 6).

Unter dem *Lesen zwischen den Daten* versteht Curcio das Vergleichen von Elementen des Graphen und den Gebrauch einfacher mathematischer Operationen wie Addieren, Subtrahieren, Dividieren etc., um darauf aufbauend Schlussfolgerungen⁴⁰ ziehen zu können. Anders als beim Lesen der Daten sind beim Lesen zwischen den Daten die zu entnehmenden Informationen nicht explizit, sondern implizit im Diagramm enthalten und müssen mithilfe kognitiver (mathematischer) Operationen aus diesem erschlossen werden. Auf diesem Level werden daher nach Curcio zum ersten Mal die im Diagramm enthaltenen Informationen integriert und durch Einbezug von (vornehmlich mathematischem) Vorwissen interpretiert (vgl. Curcio 1987, 1989).

Das *Lesen über die Daten hinaus* beinhaltet das Erweitern, Vorhersagen oder Schlussfolgern von Informationen, die weder explizit noch implizit im Diagramm dargestellt sind und daher nicht allein auf der Grundlage des Diagramms geschlussfolgert werden können. Für die eigentliche Beantwortung von Fragen auf der dritten Lesestufe ist somit das inhaltsspezifische Vorwissen der Diagrammleser*innen von Bedeutung.⁴¹ Das Diagramm liefert hier lediglich den Anreiz zur Suche nach Informationen, stellt grundlegende Basisinformationen bereit und bietet einen Denkraum: „[...] reading beyond the data requires that the inference be made on the basis of a ‘data base’ in the reader's head, not in the graph“ (Curcio 1989, S. 6).

Hinsichtlich des Vorwissens unterscheidet Curcio (1987, 1989) drei Arten von Vorwissen: 1. inhaltsspezifisches Vorwissen, 2. mathematisches Vorwissen und 3. Vorwissen über Diagramme sowie Erfahrung im Umgang den entsprechenden Arten von Diagrammen, kurz: diagrammspezifisches Vorwissen (vgl. insbesondere Curcio 1989).

⁴⁰ Der Fokus von Curcio (1989) liegt hier auf quantitativen und nicht auf qualitativen Schlussfolgerungen.

⁴¹ Curcio (1989) versteht inhaltsspezifisches Vorwissen vornehmlich als Alltagswissen. Fragen, die das Denken des Lesens über die Daten hinaus triggern, sind daher nach Curcio Fragen wie „Wenn Maria bis zum nächsten Jahr um 5 cm und José um 10 cm wächst, wer ist dann größer und um wie viel?“.

Empirisch konnte Curcio (1987) zeigen, dass sich für Lernende der Jahrgangsstufe vier alle drei Wissensarten als signifikante Prädiktoren für das Diagrammverstehen erweisen. In der Jahrgangsstufe sieben erwiesen sich allerdings weder das diagrammspezifische noch das inhaltspezifische Vorwissen als signifikante Prädiktoren für das Diagrammverstehen (vgl. Curcio 1987).

Es sei darauf hingewiesen, dass Curcio (1987) in ihrer Untersuchung sehr einfache Diagramme mit alltagsnahen Inhalten verwendet hat und das Diagrammverstehen in ihrer Untersuchung vornehmlich im Sinne der Informationsentnahme (siehe Abschnitt 3.4.1) operationalisiert wurde. Die empirischen Ergebnisse von Curcio (1987) liefern somit in erster Linie Hinweise dafür, dass ein basales, inhaltliches Verständnis der dargestellten Relationen für die Entnahme explizit dargestellter Informationen aus einfachen Diagrammen genügt. Ein elaborierteres Verständnis der dargestellten Relationen scheint dagegen zur Informationsentnahme nicht notwendig zu sein.

4.2.1.3 Informationsentnahme nach Lachmayer (2008)

Ein biologiespezifischer Ansatz zur Analyse von Diagrammfähigkeiten findet sich bei Lachmayer (2008) (vgl. auch Lachmayer et al. 2007). Lachmayer (2008) hat ein Modell der Diagrammkompetenz für den Biologieunterricht entwickelt. Dabei konzentriert sie sich auf die drei (Haupt-)Komponenten: *Informationsentnahme*, *Konstruktion* und *Integration von Informationen* (siehe Abbildung 11). Da von diesen drei Komponenten für die vorliegende Arbeit vornehmlich die Informationsentnahme relevant ist, wird lediglich diese Komponente des Modells im Folgenden näher beschrieben. Zu einer ausführlichen Analyse der Komponenten Integration und Konstruktion, über die Arbeit von Lachmayer (2008) hinaus, sei auf Von Kotzebue und Nerdel (2012, 2015) verwiesen.

Zur Strukturierung der Komponente *Informationsentnahme* orientierte sich Lachmayer (2008) insbesondere an den Arbeiten von Bertin (1974, gleichwertig mit Bertin 1983, siehe Abschnitt 4.2.1.1), Schnotz (1994) und Curcio (1987). Lachmayer unterscheidet dabei in Anlehnung an Bertin (1974 bzw. 1983) hinsichtlich der Komponente Informationsentnahme zwei Unterkomponenten: das *Identifizieren* von Elementen in Diagrammen und das *Ablesen* von Informationen aus Diagrammen (siehe Abbildung 11).

Beim *Identifizieren* geht es nach Lachmayer (2008) darum, „ohne Beachtung der Datenpunkte bereits eine Aussage über den im Diagramm dargestellten Sachver-

halt zu treffen“ (ebd., S. 32). Dazu gehören Prozesse wie das Erkennen der dargestellten Relationen, das Zuordnen der dargestellten Variablen zu den Achsen und das Beachten der Skalenreichweite. Beim *Ablezen* wird dann auf die jeweiligen Datenwerte bzw. den Verlauf des Graphen fokussiert. Bezugnehmend auf Curcio (1987) und Schnotz (1994) unterteilt Lachmayer (2008) das Ablezen in vier Stufen: 1. Ablezen eines Funktionswertes, 2. Vergleich zweier Werte oder Erkennen eines Trends, 3. Vergleich mehrerer Werte oder Vergleichen von Trends (Längs- und Querschnittvergleich) und 4. Extrapolieren/Vorhersagen des Graphenverlaufs.

Informationsentnahme		Konstruktion		
Identifizierung	Erkennen der dargestellten Relation		Wahl des passenden Diagrammtyps	Aufbau des Rahmens
	Zuordnung der Variablen zu den Achsen		Zuordnung der Variablen zu ihren Achsen	
			Beschriftung der Achsen	
	Zuordnung der Datenreihen zu den Symbolen („Legenden“)		Zeichnen einer Legende	
Beachten der Skalenreichweite		Zeichnen der Skalen		
Ablezen	1. Ordnung	Ablezen eines „Funktionswertes“	Eintragen der Punktwerte	Dateneintrag
	2. Ordnung	Vergleich zweier Werte oder Erkennen eines Trends (qualitativ/quantitativ)	Skizzierung einer Verbindungslinie zwischen Punkten oder freie Skizzierung einer Trendlinie	
	3. Ordnung	Vergleich mehrerer Werte oder Vergleichen von Trends (qualitativ/quantitativ)	Freie Skizzierung mehrerer Trends	
	4. Ordnung	Extrapolieren/Vorhersagen		
Integration				

Abbildung 11. Strukturmodell der Diagrammkompetenz nach Lachmayer (2008) (nach Lachmayer 2008, S. 43)

Die Unterscheidung in die Unterkomponenten Identifizieren und Ablezen konnte Lachmayer (2008) empirisch bestätigen. Für die Stufung der Unterkomponente Ablezen ist ihr das allerdings nicht gelungen: „Beispielsweise zeigte sich, dass die Items zum Ablezen zweiter und dritter Ordnung im Mittel leichter von den Probanden zu lösen waren als die zum Ablezen erster und vierter Ordnung“ (ebd., S. 150 f.). Aussagen auf der Grundlage der Untersuchung von Lachmayer (2008) wie „Beim Ablezen werden vom Ablezen erster Ordnung bis zum Extrapolieren

immer komplexere Anforderungen an Schülerinnen und Schüler gestellt“ (vgl. Ziepprecht 2016, S. 15) sollten daher mit Vorsicht interpretiert werden. Insbesondere vor dem Hintergrund von Wainer (1992), der darauf verweist, dass bei der Informationsentnahme nicht zwangsläufig eine Stufung der Komplexität zu erwarten ist, sollten die Ergebnisse von Lachmayer (2008) hinsichtlich der vorgeschlagenen Stufung in nachfolgenden Analysen überprüft werden. Neben der Strukturmodellierung untersuchte Lachmayer (2008) unter anderem, wie sich allgemeine Lesekompetenz, Rechenfähigkeiten, inhalts- und diagrammspezifisches Vorwissen auf die beiden Unterkomponenten Identifizieren und Ablesen auswirken. Sie konnte zeigen, dass das diagrammspezifische Vorwissen bzw. Übung im Umgang mit Diagrammen einen großen Einfluss auf das Identifizieren und Ablesen hat (vgl. ebd.). Das inhaltspezifische Vorwissen hat dagegen nur einen geringen Einfluss auf die Leistungen beim Identifizieren und keinen Einfluss auf das Ablesen. Lachmayer (2008) schlussfolgert daher, was aus biologiedidaktischer Perspektive zunächst durchaus überraschen mag, dass „das biologische Fachwissen der Schüler keinen nennenswerten Einfluss auf deren Fähigkeiten zum Lesen [...] von Diagrammen hat“ (ebd., S. 167). Dieser Befund stimmt weitgehend mit den Ergebnissen von Curcio (1987) überein und steht in Einklang mit den in den vorausgegangenen Abschnitten beschriebenen theoretischen Ausführungen zur Informationsentnahme aus Diagrammen.

Als relevant für die Informationsentnahme aus Diagrammen erwiesen sich dagegen mathematische Fähigkeiten – ebenfalls in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Curcio (1987). Lachmayer (2008) konnte einen signifikanten Einfluss von Rechenfähigkeiten auf die Leistung beim Ablesen von Informationen aus Diagrammen nachweisen (vgl. ebd.). Ähnliches wurde auch von anderen Autor*innen beobachtet (vgl. z. B. Galesic & Garcia-Retamero 2011; Phillipp 2008; Åberg-Bengtsson & Ottosson 2006; Keller 2008). Hinsichtlich der allgemeinen Lesekompetenz zeigte sich dagegen – wie beim biologiespezifischen Vorwissen – nur ein geringer Einfluss auf die Unterkomponente Identifizieren und kein Einfluss auf die Unterkomponente Ablesen. Lachmayer (2008) schlussfolgert daher, dass die Anforderungen, die an das Ablesen und Vergleichen einzelner Werte oder Trends aus Diagrammen gestellt werden, sich von denen unterscheiden, die an das Lesen kontinuierlicher Texte gestellt werden (vgl. ebd.).

4.2.2. Analyse komplexerer Tätigkeiten

4.2.2.1 Kritik an Modellen der Informationsentnahme

Verschiedene Autor*innen kritisieren, dass die zuvor beschriebenen Arbeiten durch den starken Fokus auf die Dimension Informationsentnahme das Diagrammverstehen zu stark vereinfacht betrachten würden (vgl. z. B. Trafton & Trickett 2001; Ratwani, Trafton & Boehm-Davis 2004; Trickett & Trafton 2006; Canham & Hegarty 2010). Solche Autor*innen bezeichnen Aufgaben der Informationsentnahme, wie das Ablesen explizit dargestellter Werte aus Diagrammen oder das Beschreiben von Trends, als „‘Mechanical‘ Aspects of Graphing“ (Swatton & Taylor 1994, S. 237), „simple tasks“ (Trickett & Trafton 2006, z. B. S. 297) oder „low-level interpretative questions (questions that can be answered directly from the data)“ (Pereira-Mendoza 1995, S. 2). Die jeweiligen Fähigkeiten werden von ihnen als „elementary graph literacy“ (Galesic & Garcia-Retamero 2011, S. 452), „basic graph reading ability“ (Aoyama & Stephens 2003, S. 214) oder „the ability to retrieve simple facts from a graph“ (Shah et al. 2005, S. 429) beschrieben. Pereira-Mendoza (1995) betont sogar, dass die Fähigkeiten zur Informationsentnahme (und zur Konstruktion von Diagrammen) im Kontext des problemorientierten Diagrammverstehens von untergeordneter Bedeutung seien:

„While drawing a graph and answering factual or low-level interpretative questions are components of developing graphical skills, these are not the only components. In fact, in terms of the ability to use graphs in problem-solving situations or to analyse critically data in newspapers, on television or in other documents, these are the least important components“ (ebd., S. 2).

Phillips (1997) unterscheidet vor dem Hintergrund ähnlicher Überlegungen daher in seinem Forschungsüberblick auch explizit zwischen einfacheren *Lower-level-Fähigkeiten* und *Higher-level-Fähigkeiten* wie dem Erklären: „There has been an increasing awareness of the distinction between low level skills (e.g. reading off a value, plotting a point) and higher level skills (e.g. telling a story to explain the data)“ (ebd., S. 50). Ähnlich unterscheiden auch Shah & Hoeffner (2002) zwischen „mere fact retrieval“ (ebd., S. 62) und „graph comprehension as a science or social science reasoning process“ (ebd., S. 64 f.) und fordern, dass interpretative Schlussfolgerungsprozesse auf Grundlage quantitativer Diagramme differenzierter untersucht werden sollten. Zudem raten sie, Diagrammler*innen verstärkt dazu anzuleiten, sich die referierten Sachverhalte mental

vorzustellen: „to think of graph reading as an interpretation and evaluation task as opposed to a mere fact retrieval task“ (ebd., S. 64). Obgleich die in den vorausgegangenen Abschnitten beschriebenen Ansätze zur Modellierung der Informationsentnahme aus Diagrammen explizit oder implizit dafür kritisiert werden, dass sie zu sehr auf basale Tätigkeiten fokussieren würden, finden sich nur wenige Forschungsarbeiten, die komplexere Tätigkeiten der Dimensionen Interpretieren und Erklären modellieren und messen. Die in dieser Hinsicht für diese Arbeit relevanten Ansätze werden im Folgenden präsentiert.

4.2.2.2 Ansätze zur Erweiterung bestehender Modelle

Monteiro & Ainley (2004, 2007; Ainley & Monteiro 2008) führten unter Verwendung der Leseniveaus nach Curcio (1987) ausführliche Interview- und Fragebogenanalysen durch, um zu ermitteln, wie Lernende beim Interpretieren von Diagrammen vorgehen. Sie kritisieren, aufbauend auf ihren empirischen Ergebnissen, dass die Lesestufen nach Curcio (1987) lediglich ein „relatively superficial reading of the data“ (Ainley & Monteiro 2008, S. 4) erfordern würden, und bemängeln, dass sogar Curcios dritte Lesestufe – die eigentlich das Vorwissen berücksichtigen solle – in der empirischen Umsetzung in erster Linie kognitive Fähigkeiten erfasse. Inhaltlich relevante Überlegungen seien für die Lösung der entsprechenden Aufgaben nicht notwendig. Im Sinne einer statistischen Grundbildung (*statistical literacy*, vgl. Gal 2002) erweitern sie daher das höchste Leseniveau nach Curcio (Lesen über die Daten hinaus) um eine Kompetenz, die sie⁴² als *critical sense* bezeichnen (vgl. Monteiro & Ainley 2004, 2007; Ainley & Monteiro 2008). *Critical sense* wird von ihnen verstanden, als „a skill to analyse data and its interrelations rather than simply accepting the initial impression given by the graph“ (Monteiro & Ainley 2004, S. 3).

Ähnlich wie Monteiro und Ainley betrachten auch Shaughnessy et al. (1996) die von Curcio (1989, siehe dazu auch Curcio 1987) vorgeschlagene Kategorisierung als unzureichend. Sie argumentieren für eine vierte Stufe, auf der der Kontext aktiv in die Analyse einbezogen wird, und bezeichnen diese Stufe als *Blick hinter die Daten* (engl. look behind the data):

⁴² Insbesondere basierend auf der unveröffentlichten Dissertation von Carlos Monteiro (2005).

„Curcio (1989) has suggested that there are three aspects of data analysis: *Look at the Data*, *Look Between the Data*, and *Look Beyond the Data*. These terms capture the analysis, comparison, and inference parts of teaching and learning data analysis. We suggest an even wider view of data handling which includes *Look Behind the Data*, since data sets arise within a particular context“ (Shaughnessy et al. 1996, S. 206).

Datenanalyse beschreiben Shaughnessy et al. (1996) dabei als eine Art (mathematischer) Detektivarbeit, die innerhalb eines Kontextes stattfindet. Sie betonen, dass erst der Blick hinter die Daten es den Leser*innen ermögliche, bedeutsame Verbindungen zwischen Kontext und Daten herzustellen (vgl. ebd.). Shaughnessy (2007) unterscheidet beim Blick hinter die Daten zwei datenanalytische Tätigkeiten: 1. die Suche nach kausalen Erklärungen für die Daten bzw. für die (Ko-)Variation in den Daten und 2. die Suche nach Beziehungen zwischen den Variablen in den Daten (vgl. ebd.).

4.2.2.3 Kompetenzmodell nach Aoyama & Stephens (2003) bzw. Aoyama (2006, 2007)

Die bisher genannten Arbeiten zum Analysieren von Diagrammen entstammen der angloamerikanischen und europäischen wissenschaftlichen Community. Ähnliche Überlegungen wurden parallel dazu im japanischen Raum veröffentlicht (vgl. Kimura 1999, zitiert nach Aoyama & Stephens 2003). Aufbauend auf den japanischen Vorarbeiten von Kimura (1999), der das Lesen von Diagrammen in neun Kompetenzstufen einteilt (siehe Tabelle 1), nehmen Aoyama und Stephens (2003) analog zu Shaughnessy und Kollegen (1996) sowie Monteiro und Ainley (2004, 2007; Ainley & Monteiro 2008) an, dass die Einteilung nach Curcio (1987) nicht genügt, um das Schlussfolgern komplexer Zusammenhänge, das Erklären dieser Zusammenhänge oder das Evaluieren der Daten und der Erklärungen zu erfassen (vgl. Aoyama & Stephens 2003).

Aoyama und Stephens (2003) betrachten die von Kimura (1999) vorgeschlagenen Level als Kompetenzstrukturmodell aus vier übergeordneten Stufen (A – C, D & E, siehe Tabelle 1). Nicht alle der dargestellten Level müssen in der dargestellten Reihenfolge entwickelt werden. Eine Entwicklungsreihenfolge nehmen Aoyama & Stephens (2003) lediglich für die Level A, D, E und F an. Die Level A bis E entsprechen in ihren Grundzügen den drei Lesestufen nach Curcio (1987). Level F geht dagegen deutlich – und sogar noch weiter als das von Shaughnessy (2007) vorgeschlagene *Lesen hinter den Daten* – über die ersten

drei Stufen, A – C, D & E, hinaus. Auf Level F, dem anspruchsvollsten Analyseniveau, werden die grafisch dargestellten Informationen umfassend erweitert. Den entsprechenden Erkenntnisgewinn definieren Aoyama und Stephens (2003) als „creating dimensionally new information from, or imposing new information on, pre-existing qualitative and quantitative information“ (ebd., S. 211). Dazu zählen sie das kausale Erklären von Graphenverläufen, das Hinterfragen der Reliabilität der Daten sowie das Evaluieren von Schlussfolgerungen, die auf der Grundlage der Daten gezogen wurden. Um auf Level F agieren zu können, müssen Lernende die Fähigkeit besitzen, „to step back from what is directly implied by the data, and to bring to that stance additional knowledge of other factors and of likely interpretative frameworks“ (ebd., S. 213).

Tabelle 1. Niveaus statistischer Fähigkeiten nach Kimura (1999) (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Kimura 1999, zitiert nach Aoyama & Stephens 2003, S. 210)

Level	Merkmale
Level A ₁	Lernende können einfache Informationen aus Tabellen und Diagrammen entnehmen.
Level A ₂	Lernende können inhaltlich relevante Elemente eigenständig identifizieren.
Level A ₃	Lernende können Informationen von zwei Graphen miteinander vergleichen.
Level A ₄	Lernende können einfache Trends (<i>simple trends</i>) identifizieren.
Level B	Lernende verfügen über Metawissen darüber, was eine geeignete Datenquelle zur Beantwortung einer Frage kennzeichnet.
Level C	Lernende können statistische Berechnungen durchführen.
Level D	Lernende können Kernaussagen (<i>global trends</i>) aus Diagrammen ablesen.
Level E	Lernende können quantitative Informationen in qualitative Informationen übersetzen.
Level F	Lernende können aufbauend auf den quantitativen Informationen neue Informationen konstruieren, die weit über das Diagramm hinausgehen.

Die beiden Autoren betrachten Level F daher auch als die kognitiv anspruchsvollste Leistung beim Analysieren von Diagrammen und grenzen die zugehörigen Tätigkeiten auf Level F explizit gegenüber Tätigkeiten auf Level E ab, die sie – obgleich vergleichsweise anspruchsvoll – immer noch als das Ziehen einfacher Schlussfolgerungen auf Grundlage der gegebenen Daten bezeichnen: „simply an extraction of qualitative information from pre-existing quantitative

data“ (Aoyama & Stephens 2003, S. 212). Es sei an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen, dass die Tätigkeiten auf Level E in den vorherigen Kategorisierungen nach Bertin (1983), Wainer (1992), Schnotz (1994) und Curcio (1987, 1989) die höchste Leseleistung darstellten.

Zur empirischen Überprüfung der von Kimura (1999) definierten Fähigkeiten auf Level A bis E (und damit nicht F) nutzten Aoyama und Stephens (2003) Items im Multiple-Choice-Format. Es zeigte sich, dass es den Lernenden sehr gut gelingt, dem Diagramm Informationen auf diesen Stufen zu entnehmen (vgl. ebd.). Um die Fähigkeiten der Lernenden auf Level F näher zu analysieren, sollten Lernende der fünften (N = 17) und der achten Jahrgangsstufe (N = 18) eine vorgegebene Erklärung, die eine fiktive Person auf Grundlage von Diagrammen geschlussfolgert hat, evaluieren. Aoyama und Stephens (2003) versuchten mittels gezielter Fragen, tiefere Einblicke in das evidenzbasierte Schlussfolgern der Lernenden zu gewinnen. Es zeigte sich, dass Lernende der fünften Jahrgangsstufe lediglich dazu in der Lage waren, explizit dargestellte Informationen aus Diagrammen zu entnehmen. Sie waren praktisch nicht in der Lage, eine vorhandene Erklärung zu den Daten nachzuvollziehen, geschweige denn, diese zu evaluieren. In Hinblick auf jüngere Lernende schlussfolgern die Autoren daher: „It appeared that the best one could expect from elementary grade students was the ability to understand [im Sinne von Ablesen] and connect the information presented“ (ebd., S. 222). Dafür gelang es aber ungefähr einem Fünftel der Lernenden der achten Jahrgangsstufe, die Daten mit der vorgegebenen Erklärungshypothese in Beziehung zu setzen, und einem weiteren Fünftel sogar, die entsprechende Erklärungshypothese kritisch zu evaluieren. Allerdings war auch hier lediglich ein Lernender in der Lage, eine alternative Erklärungshypothese auf Grundlage der Daten zu konstruieren (vgl. ebd.).

Aufbauend auf diesen Vorarbeiten hat Aoyama (2006, 2007) in nachfolgenden Untersuchungen mittels Rasch-Modellierung empirisch ein Stufenmodell des Diagramminterpretierens entwickelt. Das Stufenmodell basiert auf dem empirisch bestätigtem⁴³ Stufenmodell von Watson und Callingham (2003) zur Modellierung von *Scientific Literacy* sowie der *SOLO-Taxonomie*⁴⁴ nach Biggs und Collis (1982; 1991; vgl. dazu auch Biggs & Tang 2011).

⁴³ Vgl. dazu Watson, Kelly und Izard (2005).

⁴⁴ Auch Kemp (2005) bzw. Kemp und Kissane (2010) haben die SOLO-Taxonomie verwendet, um das Lesen von Diagrammen und Tabellen zu strukturieren.

Aoyamas (2006, 2007) Ergebnisse deuten auf ein eindimensionales Konstrukt hin, das sich in fünf Stufen zunehmender Anforderungsniveaus einteilen lässt (siehe Tabelle 2). Aoyama (2007) betont jedoch, dass auch alternative, mehrdimensionale Konstrukte nicht ausgeschlossen seien.

Tabelle 2. Fünf Stufen der Diagramminterpretation nach Aoyama (2006) (aus dem Englischen nach Aoyama 2006, S. 5; siehe dazu auch Aoyama 2007).

Stufe 1: <i>Idiosyncratic</i>	Lernende sind nicht in der Lage, Werte aus Diagrammen abzulesen oder Trends zu erkennen. Sie können das Diagramm nicht inhaltlich interpretieren. Beispielsweise können sie die Graphenverläufe nicht mit dem inhaltlichen Kontext in Beziehung setzen. Aussagen basieren auf persönlichen Erfahrungen, die nichts oder nur wenig mit den in den Diagrammen dargestellten Sachverhalten zu tun haben.
Stufe 2: <i>Basic Graph Reading</i>	Lernende können einzelne Werte aus Diagrammen ablesen und Trends erkennen. Das Ablesen erfolgt allerdings immer noch mechanisch. Die Lernenden können keine interpretative Beziehung zwischen der grafischen Darstellung und dem referierten inhaltlichen Kontext herstellen.
Stufe 3: <i>Rational/Literal</i>	Lernende können einzelne Werte aus dem Diagramm ablesen und Trends erkennen. Sie können das Diagramm inhaltlich interpretieren und Kernaussagen über Zusammenhängebeziehungen aus dem Diagramm entnehmen. Die dargestellten Zusammenhänge werden von ihnen dabei allerdings nicht kritisch hinterfragt und können von ihnen nicht erklärt werden.
Stufe 4: <i>Critical</i>	Lernende können das Diagramm vollständig lesen und inhaltlich interpretieren. Sie können zudem, unter kritischer Berücksichtigung statistischer Konzepte, inhaltliche Schlussfolgerungen auf Grundlage der Daten aufstellen und die Daten sowie vorgegebene Erklärungen für die Daten kritisch hinterfragen. Die Lernenden können allerdings noch nicht eigenständig Erklärungshypothesen entwickeln, um die Daten zu kausal erklären.
Stufe 5: <i>Hypothesising and Modelling</i>	Lernende können das Diagramm vollständig lesen und inhaltlich interpretieren. Sie können die Daten nutzen, um Handlungsempfehlungen aus diesen abzuleiten. Darüber hinaus evaluieren sie die dargestellten Informationen kritisch und entwickeln eigenständig, ggf. unter Berücksichtigung statistischer Konzepte, Erklärungshypothesen oder sogar komplexe erklärende Modelle, um die Daten zu erklären. Die Lernenden agieren hier zum ersten Mal als „active statistics ‚researchers‘ not just as information receivers“ (Aoyama 2007, S. 308).

Anmerkung. Die Bezeichnungen der Stufen wurden wörtlich übernommen.

Die empirischen Befunde von Aoyama (2006, 2007) zeigen, dass mit zunehmendem Alter tendenziell immer mehr Lernende höhere Kompetenzstufen erreichen, dass aber – in Übereinstimmung mit den Untersuchungen von Aoyama und Stephens (2003) – nur sehr wenige Lernende in der Lage waren, die grafisch dargestellten Zusammenhänge angemessen zu erklären (vgl. ebd.).

Wesentlich für das hier durchgeführte Forschungsvorhaben ist zudem, dass Aoyama und Stephens (2003) sowie Aoyama (2006, 2007) vermuten, dass auf den höheren Kompetenzstufen Analysezyklen zunehmender Komplexität iterativ ablaufen. In dieser Hinsicht stimmen sie mit Carpenter und Shah (1998) überein, die den iterativen Charakter der Diagrammanalyse bereits für einfachere Interpretationsaufgaben empirisch nachgewiesen haben (siehe Abschnitt 3.8.2.2). Da allerdings nur wenige Lernende überhaupt in der Lage waren, auf den höheren Kompetenzstufen zu agieren, konnten die Autoren die vermuteten iterativen Analysezyklen nicht näher untersuchen. Aoyama und Stephens (2003) fordern daher: „Clearly, more research is required to confirm the existence of further levels associated with Extended Abstract responses“ (ebd., S. 222). Für entsprechende Analysen sei hier auf Forschungsfrage 6 dieser Arbeit verwiesen (siehe Kapitel 9).

4.2.3. Exemplarische Studien zur Informationsentnahme und zum Extrapolieren

Im Folgenden werden verschiedene empirische Studien beschrieben und analysiert, die explizit oder implizit auf den oben beschriebenen Modellierungsansätzen aufbauen. Im Fokus dieser Studien steht insbesondere die Analyse der Kompetenzen von Lernenden, Informationen aus Diagrammen zu entnehmen.

4.2.3.1 Untersuchungen zur Informationsentnahme

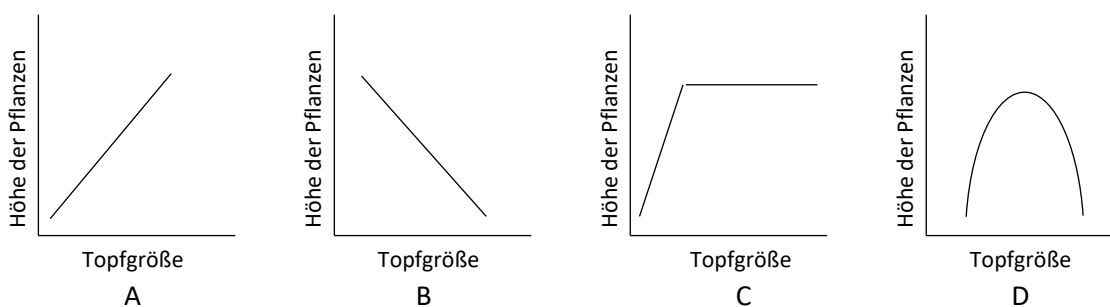
4.2.3.1.1. Untersuchung von Padilla, McKenzie und Shaw (1986)

Padilla, McKenzie und Shaw (1986) untersuchten die Diagrammkompetenz (engl. graphing competence) von Lernenden der Jahrgangsstufen sieben bis zwölf (N = 625). Die Autor*innen entwickelten dazu einen Multiple-Choice-Test (TOGS, Test of Graphing in Science), der sowohl Items zur Konstruktion als auch zur Interpretation von Diagrammen enthält (siehe dazu auch McKenzie & Padilla 1986).

Es sei jedoch vorab betont, dass das von ihnen verwendete Konzept *Interpretation* („graph interpretation“, ebd., S. 22) nicht der in Abschnitt 3.7 beschriebenen Translation vom Graphen- in den Situationsraum entspricht, sondern vornehmlich der Informationsentnahme explizit dargestellter Informationen aus Diagrammen innerhalb des Graphenraums. Deutlich wird dies anhand der Analyse eines Items, das von McKenzie und Padilla (1986) exemplarisch vorgestellt wurde (siehe Abbildung 12).

Nutze die folgenden Informationen, um die Fragen 16 und 17 zu beantworten.

Dick plant, die Auswirkungen des Anbaus von Sonnenblumen in unterschiedlichen Topfgrößen zu untersuchen. Die nachfolgenden Diagramme zeigen die vier möglichen Ergebnisse des Experiments.



Welcher Graph wird *am besten* durch die nachfolgenden Aussagen beschrieben.

16. Wenn die Topfgröße zunimmt, verringert sich die Höhe der Pflanzen. [Lösung: Diagramm B]

17. Wenn die Topfgröße zunimmt, steigt die Höhe der Pflanzen, allerdings nur bis zu einer bestimmten Größe. Ab dieser Topfgröße bleibt die Pflanzenhöhe gleich und ändert sich auch bei zunehmender Topfgröße nicht. [Lösung: Diagramm C]

Abbildung 12. Beispielitem aus der Untersuchung von McKenzie und Padilla (1986) zur Erfassung der Fähigkeit von Lernenden Diagramme zu interpretieren. Dargestellt sind Wachstumshöhen verschiedener Pflanzen, die in unterschiedlich großen Töpfen kultiviert wurden (aus dem Englischen nach McKenzie & Padilla 1986, S. 575).

Um das Item zu lösen, können bzw. sollten Lernende vollständig im Graphenraum agieren. Wird dagegen versucht, in den Situationsraum zu wechseln, so steigt die Komplexität des Items bzw. der Diagramme erheblich an. So ist beispielsweise fraglich, wie das referierte ‚Experiment‘ durchgeführt wird. Keinesfalls könnte sich dies mithilfe eines einzelnen Topfes oder einer einzelnen Pflanze pro Diagramm realisieren lassen. Für jedes Diagramm wären bereits bei einem einfachen Versuchsaufbau zahlreiche Töpfe unterschiedlicher Größen sowie entsprechend viele Pflanzen zu verwenden. Die Höhe dieser verschiedenen Pflanzen in den unterschiedlich großen Töpfen müsste zum gleichen Zeitpunkt ermittelt werden. Die Verwendung durchgezogener Linien erweist sich daher hier als ungünstig, da dadurch eine Messung im zeitlichen Verlauf sugge-

riert wird. Im Verlauf dieser Untersuchung wird sich noch an verschiedenen Stellen zeigen, dass Lernende auf Grundlage derartiger Darstellungen dazu neigen, Fehlvorstellungen zu konstruieren (siehe dazu insbesondere Ausführungen zu Missinterpretation in Abschnitt 4.3 und die empirische Analyse der Lernerantworten in Abschnitt 7.6.3). Empirisch konnten die Autor*innen zeigen, dass es Lernenden verhältnismäßig leichtfiel, einzelne Punkte aus Liniendiagrammen abzulesen (84 % korrekte Lösungen). Die Lernenden zeigten dagegen erhebliche Schwierigkeiten, Variablen auf den Achsen korrekt anzuordnen (46 % korrekte Lösungen), den Zusammenhang zwischen zwei Variablen zu erfassen (49 % korrekte Lösungen), Datenwerte zu inter- oder zu extrapolieren (57 % korrekte Lösungen) und Informationen aus verschiedenen Diagrammen miteinander zu integrieren (47 % korrekte Lösungen) (vgl. Padilla et al. 1986; McKenzie & Padilla 1986).

Vor dem Hintergrund der hier nur kurz diskutierten Einschränkungen des Tests wäre allerdings zu diskutieren, welche der genannten Probleme sich auf Schwierigkeiten bei der Interpretation von Diagrammen im Situationsraum und welche auf die Analyse von Diagrammen im Graphenraum zurückführen lassen.

4.2.3.1.2. Untersuchung von Keller (2008)

Keller (2008) (vgl. dazu auch Boote (ehem. Keller 2012)) verwendete in ihrer Untersuchung Items des zuvor beschriebenen *TOGS* von Padilla et al. (1986). Sie re-analysierte den *TOGS* vor dem Hintergrund der Lesekompetenzstufen nach Bertin (1983) (siehe Abschnitt 4.2.1.1) und schlussfolgerte, dass der *TOGS* vornehmlich die ersten beiden Lesestufen nach Bertin (1983) erfasst (elementares und intermediäres Lesen). Um darüber hinaus untersuchen zu können, wie Lernende (N = 14) Graphenverläufe interpretieren und Schlussfolgerungen aus Diagrammen ziehen (ganzheitliches Lesen), erweiterte Keller (2008) den *TOGS* um zusätzliche Items. Zudem entwickelte sie Prompts, welche die Lernenden im Rahmen einer Studie lauten Denkens dazu anregen, ihre Problemlösestrategien zu erläutern („why did you choose [...]?“; ebd., S. 211) und ihr Vorwissen zu offenbaren („Do you have any personal experience [...] that could help you better understand this question?“; ebd., S. 218). Keller überprüfte dadurch unter anderem, inwieweit Lernende im Alter von 12 bis 13 Jahren (N = 14) ihr mathematisches und naturwissenschaftliches Vorwissen zur Lösung der Items einsetzen.

Analog zum TOGS nutzte auch Keller (2008) zur Analyse des ganzheitlichen Lesens Items, in denen Lernende Diagrammen eine passende Beschreibung zuordnen mussten. Abbildung 13 (siehe nachfolgende Seite) zeigt beispielhaft ein solches Item. Um die erste der beiden Aufgaben, Aufgabe A) *Welche Beschreibung passt am besten zu dem Diagramm?*, beantworten zu können, genügt es allerdings – ähnlich wie im vorausgegangenen Abschnitt bereits für die Items von Padilla et al. (1986) diskutiert –, wenn die Lernenden bei der Analyse im Graphenraum agieren (Antwort *d* ist korrekt). Eine Interpretation des Diagramms im Situationsraums ist zur Lösung der Aufgabe nicht notwendig.

In den Interviews sollten die Lernenden ihre Zuordnung begründen. Keller (2008) berichtet, dass Lernende, welche die Multiple-Choice-Items korrekt beantwortet hatten, zum Teil geraten hatten oder aufgrund falscher Schlussfolgerungen zur richtigen Antwort gekommen waren. Für nachfolgende Untersuchungen der Fähigkeit Diagramme zu interpretieren rät sie daher zur Verwendung offener, authentischer Diagramminterpretationsaufgaben (vgl. ebd.).

Rose besitzt einen Blumenladen. Jeden Tag hat sie ausgewählte Pflanzen mit unterschiedlichen Mengen Wasser gegossen. Nach drei Wochen hat sie die Höhe dieser Pflanzen gemessen. Das Diagramm (rechts) zeigt ihre Ergebnisse.

Die folgenden Aussagen beschreiben den Zusammenhang zwischen der gegebenen Wassermenge und der Pflanzenhöhe.

- A) Welche Beschreibung passt am besten zu dem Diagramm?
 B) Wieso ist das passiert?

- A. Bis 120 ml nimmt die Pflanzenhöhe mit zunehmender Wassermenge ab; ab 120 ml steigt die Pflanzenhöhe mit zunehmender Wassermenge.
- B. Beide, die Wassermenge und die Pflanzenhöhe, steigen bis 120 ml; ab 120 ml nehmen beide wieder ab.
- C. Bis 120 ml nimmt die Pflanzenhöhe mit zunehmender Wassermenge stark zu; ab 120 ml nimmt die Pflanzenhöhe weniger stark zu.
- D. Bis 120 ml nimmt die Pflanzenhöhe mit zunehmender Wassermenge zu; ab 120 ml nimmt die Pflanzenhöhe mit zunehmender Wassermenge ab.

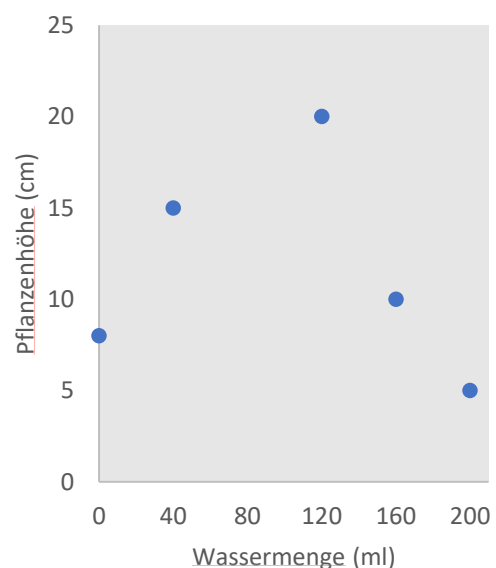


Abbildung 13. Beispielitem aus der Untersuchung von Keller (2008) zur Erfassung der Fähigkeit von Lernenden Diagramme ganzheitlich zu lesen. Dargestellt sind in dem Diagramm die Wachstumshöhen verschiedenen Pflanzen, die mit unterschiedlichen Mengen Wasser bewässert wurden (aus dem Englischen nach Keller 2008, S. 214)

Während Aufgabe A sich vollständig im Graphenraum lösen ließ, mussten die Lernenden, um Aufgabe B (*Wieso ist das passiert?* siehe Abbildung 13) beantworten zu können, das Diagramm inhaltlich interpretieren. Sie mussten dazu den Situationsraum konstruieren und innerhalb des Situationsraums Kausalüberlegungen in ihre Interpretation einbeziehen. Vor dem Hintergrund der hohen Komplexität, die damit verbunden ist, überrascht es nur bedingt, dass lediglich einer der von Keller (2008) untersuchten 14 Lernenden in der Lage war, zur Beantwortung von Aufgabe B, inhaltliche Vermutungen über den grafisch referierten Zusammenhang aufzustellen. Dieser Lernende formulierte als Antwort auf die Frage, wieso die Pflanzenhöhe mit zunehmender Menge Wasser abnimmt:

„Well, too much water may have rotted the roots so the roots wouldn't have been very good. That would have been over-watering and that would have slowly killed the plant. So, giving it too much fertilization isn't good. You have to give it the right amount“ (Boote, ehem. Keller 2012, S. 16).

Es sei angemerkt, dass dieser eine Lernende sowohl über hohes mathematisches als auch über hohes naturwissenschaftliches Vorwissen verfügte. Die anderen Lernenden konnten lediglich die Schlussfolgerung aus dem Diagramm ziehen, dass zu viel Wasser dem Pflanzenwachstum schadet. Anstatt kausale Erklärungen zu entwickeln, haben diese Lernenden eine alternative Problemlösestrategie gewählt und vorwärtsgerichtet – ohne den Situationsraum zu konstruieren – Schlussfolgerungen bzw. Handlungsanweisungen zur Bewässerung von Pflanzen aus dem Diagramm abgeleitet (vgl. Keller 2008). Es sei bereits darauf hingewiesen, dass vergleichbare Problemlösungen auch in der hier durchgeführten Untersuchung beobachtet werden konnten (siehe dazu insbesondere Ausführungen zum induktiven Erklären in Abschnitt 7.2.3 und zur Analyse der Lernerantworten in Abschnitt 7.6.2).

Zudem verweist Keller (2008) darauf, dass – ähnlich wie bereits im vorausgegangenen Abschnitt diskutiert – viele Lernende dazu tendierten, das Diagramm vornehmlich als das Wachstum einer einzelnen Pflanze im Verlauf eines Zeitraums und nicht als Vielzahl einzelner Experimente zu betrachten. Keller (2008) schlussfolgert daher kritisch, dass der TOGS, den sie als Grundlage für ihre Arbeit verwendete, trotz guter Reliabilität und angemessener Validität hauptsächlich ein Mathematiktest sei und daher eigentlich eher ungeeignet, um den Einfluss naturwissenschaftlichen Wissens auf den Umgang mit Diagrammen zu ermitteln (vgl. ebd.).

4.2.3.1.3. Untersuchung von Swatton & Taylor (1994)

Swatton und Taylor (1994) untersuchten mithilfe halboffener und offener Aufgaben an 181 Schüler*innen im Alter von 10 bis 13 Jahren, inwieweit diese in der Lage waren, *numerische* und *beschreibende Aufgaben* zu Linien- und Balkendiagramme zu lösen. Die von ihnen verwendeten Diagramme veranschaulichten einfache, alltagsnahe Zusammenhänge, beispielsweise das Wachstum einer Sonnenblume in Abhängigkeit von der Zeit. Über das Alltagswissen hinausgehendes naturwissenschaftliches Wissen war zur Beantwortung der Fragen nicht notwendig (vgl. ebd.).

Die *numerischen Aufgaben* entsprechen Aufgaben der Informationsentnahme nach Curcio (1987, 1989) und beinhalten das Ablesen von Punktwerten und Steigungen, das Berechnen von Differenzen sowie die Interpolation und Extrapolation von Werten. Swatton und Taylor (1994) unterscheiden hier zusätzlich zwischen konkreten und abstrakten Tätigkeiten. Zu den konkreten Tätigkeiten zählen sie beispielsweise das Ablesen einzelner Werte oder Trends sowie das Interpolieren von Werten. Zu den abstrakten Tätigkeiten zählen sie mentale Operationen, wie das Extrapolieren und das Ermitteln der Steigung von Graphen. Swatton und Taylor (1994) konnten zeigen, dass die Schwierigkeit numerischer Aufgaben durch den inhaltlichen Kontext der Diagramme beeinflusst wird und dass das Anforderungsniveau zunimmt, je abstrakter die Anforderung ist. Insgesamt erwiesen sich die Lernenden beim Lösen der numerischen Aufgaben aber als angemessen kompetent (vgl. ebd.).

In den *beschreibenden Aufgaben* sollten die Lernenden in wenigen Sätzen inhaltlich beschreiben, wie sich die abhängige Variable in Abhängigkeit von der unabhängigen Variablen entweder in dem ganzen Diagramm oder in einzelnen Diagrammabschnitten ändert. Die Lernenden mussten das Diagramm dazu selbstgesteuert analysieren. Während die Lernenden wenig Schwierigkeiten beim Lösen der numerischen Aufgaben zeigten, erwiesen sich die beschreibenden Aufgaben als erhebliche Herausforderung für die Lernenden. Swatton und Taylor (1994) bezeichnen numerische und beschreibende Aufgaben daher als „very different“ (ebd., S. 234, 235). Bei den beschreibenden Aufgaben waren 25 % der 11- bis 13-jährigen Schüler*innen nicht in der Lage, eigenständig einen Zusammenhang zu identifizieren. Swatton und Taylor bezeichnen dies als „[p]erhaps the most disturbing aspect“ (ebd., S. 234). Zudem gelang es weniger als 10 % der Lernenden, den Zusammenhang angemessen zu verbalisieren. Statt den Zu-

sammenhang zwischen zwei Variablen zu erfassen, konzentrierten sie sich lediglich auf eine Variable und beschrieben vornehmlich optisch auffällige Elemente des Graphen („it goes up/down“, ebd., S. 234). Die jeweiligen Lernenden scheinen bei dieser bildlichen Beschreibung vollständig im Graphenraum verblieben zu sein. Swatton und Taylor (1994) sprechen diesbezüglich von ungeeigneten, perzeptuellen Problemlösestrategien und beschreiben das Vorgehen der Lernenden wie folgt:

„Pupils apparently see the graph more as a 'picture' of one variable than as a model of a deeper underlying relationship between the two variables“ (ebd., S. 234)

Moore & Thompson (2015; siehe dazu auch Moore 2016) subsumieren derartige Probleme von Lernenden unter dem Konzept *static shape thinking* und meinen damit die Interpretation beziehungsweise die Beschreibung eines Diagramms „as a static image and object in and of itself“ (Moore & Thompson 2015, S. 784). Der Graph wird dabei von Lernenden als eine Art Linie verstanden, die keine tiefergehende Bedeutung als sich selbst besitzt. Sie sprechen auch von „treating a graph as a piece of wire (graph-as-wire)“ (ebd., S. 784). Derartige Diagrammbeschreibungen, bei denen die Lernenden das Diagramm ausschließlich im Graphenraum analysieren, konnten auch in der hier durchgeführten Untersuchung nachgewiesen werden (siehe Abschnitt 7.6.1).

4.2.3.1.4. Untersuchungen von Wu (2004) und Wu & Wong (2007, 2009)

Wu (2004; siehe dazu auch Wu & Wong 2009) untersuchte die Fähigkeiten von Lernenden im Umgang mit Diagrammen in mathematischen Kontexten anhand einer sehr großen Stichprobe (N = 907; Alter 13 bis 15 Jahre). Dabei konzentrierte sie sich vornehmlich auf quantitative Diagramme wie Balkendiagramme, Histogramme und Liniendiagramme mit einfachen, alltagsnahen Kontexten. Im Fokus ihrer Analyse standen die Kompetenzen Ablesen von Informationen, Interpretieren von Diagrammen, Konstruieren von Diagrammen und Evaluieren der Eignung bzw. der Effektivität der jeweiligen visuellen Darstellung. Ziel des Interpretierens war insbesondere das Ziehen von Schlussfolgerungen auf der Grundlage eines oder mehrerer Diagramme.

Empirisch konnte Wu (2004) zeigen, dass es den Lernenden deutlich schwerer fällt, Diagramme zu evaluieren und zu interpretieren, als diese zu konstruieren und Informationen aus diesen abzulesen. Wu und Wong (2009) erklären dies damit, dass die Lese- und Konstruktionsaufgaben sich auf das Diagramm an sich

beziehen und die Interpretations- bzw. Evaluationsaufgaben über die grafische Darstellung hinausgehen. Zudem schlussfolgern Wu und Wong (2009), auf der Grundlage von Korrelationsanalysen, dass das Ablesen von Informationen aus Diagrammen die Grundlage für das Interpretieren derselbigen bilde (vgl. ebd.). Wu und Wong (2007) erfassten zudem die Einstellung (attitude toward statistical graphs - ASG) von Lernenden zu den vier genannten Tätigkeiten, dem Ablesen, Interpretieren, Konstruieren und Evaluieren von Diagrammen. Sie konnten insbesondere zeigen, dass Lernende gegenüber dem Ablesen von Informationen aus Diagrammen eine besonders positive Einstellung besitzen und sie sich dabei am sichersten fühlen. Gegenüber dem Interpretieren besaßen die Lernenden die negativste Einstellung und fühlten sich am unsichersten (ebd.; siehe dazu auch Tang 1991). Wu und Wong (2007) erklären den Unterschied zwischen den beiden Tätigkeiten Informationsentnahme und Interpretieren damit, dass das Ablesen von Informationen wesentlich einfacher sei als das Interpretieren eines Diagramms und dass im (Mathematik-)Unterricht die inhaltliche Interpretation von Diagrammen vergleichsweise selten eingeübt werde (vgl. ebd.).

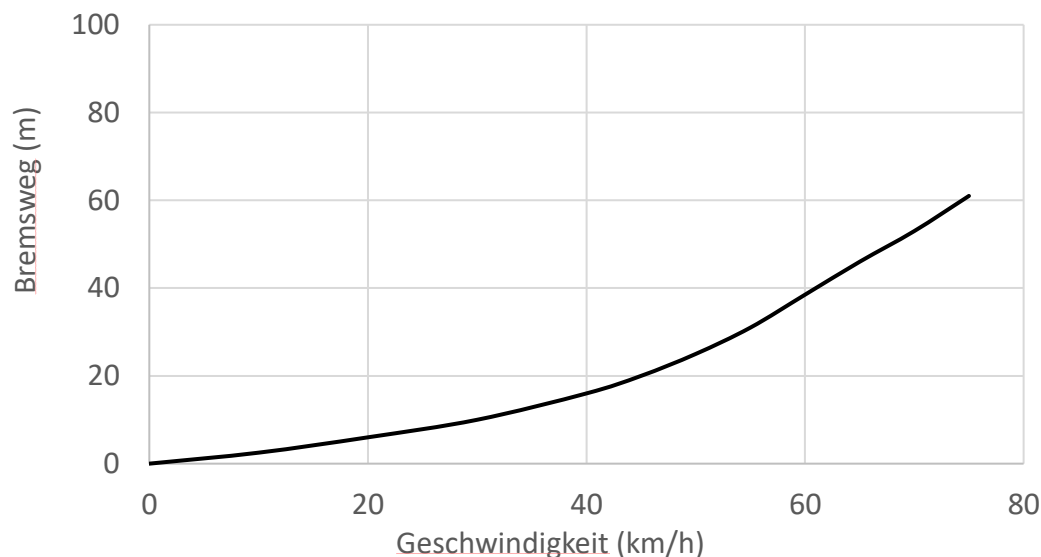
4.2.3.2 Untersuchungen zum Extrapolieren

Verschiedene Autor*innen (vgl. z. B. Curcio 1987; Lachmayer 2008; Monteiro & Ainley 2004) betrachten das Extrapolieren von Graphenverläufen als die höchste Fähigkeit in Hinblick auf Informationsentnahme aus Diagrammen. Diesbezüglich sollte allerdings unterschieden werden zwischen einer *perzeptuellen Vorhersage*, z. B. dem Fortführen eines grafischen Musters, und einer *inhaltlichen begründeten Vorhersage*, aufbauend auf den grafisch referierten Inhalten. Eine perzeptuelle Vorhersage, die praktisch ausschließlich innerhalb des Graphenraums erfolgt, erfordert kein domänenspezifisches Vorwissen, sondern vornehmlich diagrammspezifisches Vorwissen sowie zu einem gewissen Anteil räumliches Vorstellungsvermögen (vgl. Fausset 2008). Bereits Kinder im Alter von sechs bis neun Jahren scheinen dazu in der Lage zu sein (vgl. Bryant & Somerville 1986).

Eine inhaltlich begründete Vorhersage erfordert dagegen häufig ein umfassendes Verständnis der inhaltlichen Situation. Obgleich eine perzeptuelle Vorhersage dadurch einfacher erscheint als eine inhaltlich begründete Vorhersage, stellen beide Arten von Vorhersagen, die inhaltliche und die perzeptuelle, Lernende vor erhebliche Herausforderungen.

So zeigten Lernende im Alter von 13 bis 14 Jahren beispielsweise erhebliche Probleme mit dem perzeptuellen Extrapolieren eines Graphen (vgl. Baumert et al. 1998, dritte TIMS-Studie). Die Lernenden sollten mithilfe des in Abbildung 14 dargestellten Diagramms ermitteln, wie lang der Bremsweg eines Autos ist, das 80 km/h pro Stunde fährt. Dazu mussten sie den Verlauf des Graphen bis zu einem X-Wert von 80 km/h grafisch verlängern. Der Bremsweg konnte dann auf der Y-Achse abgelesen werden. Obgleich diese Aufgabe auf den ersten Blick einfach erscheint, waren lediglich 59 % der Lernenden dazu fähig, die korrekte Lösung (B) auszuwählen (vgl. Baumert et al. 1998).

Die Grafik zeigt zu verschiedenen Geschwindigkeiten eines Autos die Strecke, die benötigt wird, um das Auto durch Betätigen der Bremse zum Anhalten zu bringen (Bremsweg).



Ein Auto fährt 80 km/h. Wie lang ist ungefähr der Bremsweg für das Auto?

- A. 60 m
- B. 70 m
- C. 85 m
- D. 100 m

Abbildung 14. TIMS-Item zur Erfassung der Fähigkeit von Lernenden Graphen zu extrapolieren. Dargestellt ist der Zusammenhang zwischen dem Bremsweg und der Geschwindigkeit eines Fahrzeuges (in Anlehnung an Baumert et al. 1998, S. 48).

Über Probleme beim Extrapolieren berichten auch Pereira-Mendoza und Mellor (1991). Diese untersuchten mittels schriftlicher Aufgaben und Interviews den Umgang von fast 250 Lernenden im Alter von 10 bis 12 Jahren mit verschiedenen Diagrammen. Die Inhalte der jeweiligen Diagramme entstammten einfachen Alltagskontexten, wie beispielsweise der Zusammenhang von Körpergröße und Alter bei Kindern. Die Autor*innen konnten zeigen, dass die Lernenden nahezu keine Probleme mit dem Ablesen explizit dargestellter Informationen hatten. Erhebliche Probleme zeigten die Lernenden dagegen beim Extrapolieren: Insbesondere zeigte sich, dass die Lernenden fast ausschließlich perzeptuelle und fast keinerlei inhaltliche Vorhersagen trafen und überhaupt nur dann zum Extrapolieren in der Lage waren, wenn sie ein grafisches Muster in den Daten erkennen konnten (vgl. ebd.). Das Bedürfnis nach Mustern erwies sich dabei als so überwältigend, dass Lernende inhaltliche Widersprüche beim Extrapolieren teilweise vollständig ignorierten (vgl. ebd., siehe zu vergleichbaren Ausführungen auch Ainley 2000). So schlussfolgerten Lernende beispielsweise, entgegen ihrem lebensweltlichen Wissen, dass für den Fall, dass in das unten dargestellte Diagramm (siehe Abbildung 15) eine weitere, 10 Jahre alte Person aufgenommen wird (siehe freie Lücke rechts), diese größer sein muss als Person vier, obgleich Person vier mit einem Alter von 19 Jahren bereits 160 cm groß ist.

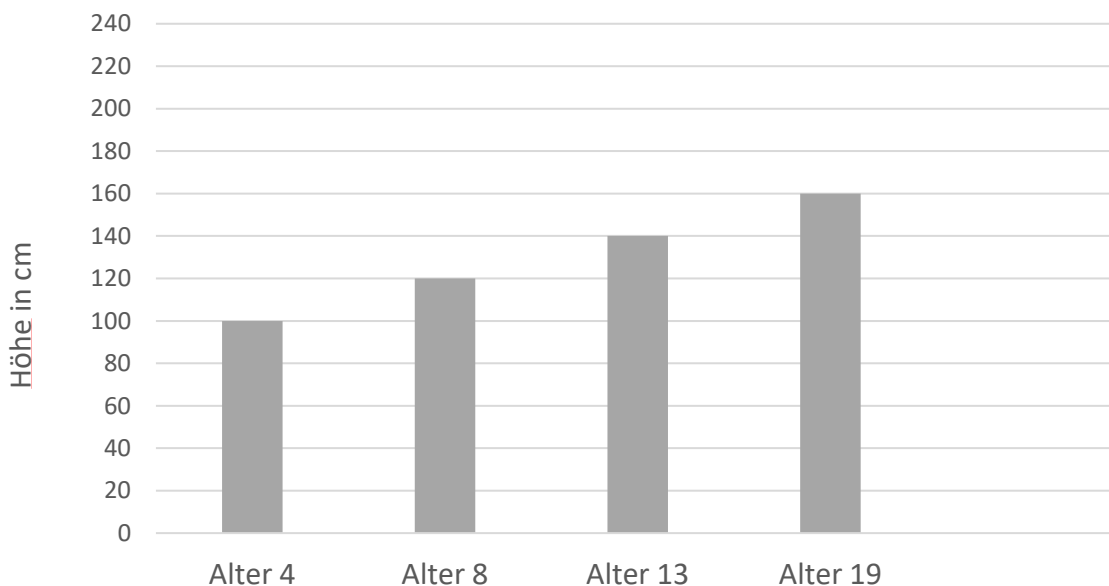


Abbildung 15. Beispielitem aus der Studie von Pereira-Mendoza und Mellor (1991) zur Erfassung der Fähigkeit von Lernenden Daten zu extrapolieren. Dargestellt sind die Körpergrößen von vier Personen unterschiedlichen Alters (aus dem Englischen nach Pereira-Mendoza & Mellor 1991, S. 153)

Den inhaltlichen Widerspruch, dass eine 10 Jahre alte Person vermutlich kleiner sein wird als die bereits grafisch referierte 19 Jahre alte Person, ignorierten die Lernenden dabei teilweise vollständig. Sie rechtfertigten ihre inkorrekte Schlussfolgerung mit Verweis darauf, dass das Datenmuster keine andere Lösung zulasse oder nutzten andere, ebenfalls ungeeignete Argumente. Ein Lernender argumentierte beispielsweise, dass sich das zehnjährige Kind auf Stelzen stellen würde und daher größer sei als die 19-jährige Person: „One student, in an attempt to protect the flawed frame, suggested the possibility of the ten-year-old being on stilts rather than change the answer“ (Pereira-Mendoza & Mellor 1991, S. 155).

Zusätzlich zu Hinweisen auf Probleme beim Extrapolieren zeigt die Untersuchung von Pereira-Mendoza und Mellor (1991) daher insbesondere auch, dass Lernende erhebliche Probleme haben, einmal formulierte Hypothesen über Zusammenhänge in Diagrammen zu revidieren. Diese Erkenntnis ist insbesondere für die Analyse der in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten empirischen Untersuchung überaus relevant (siehe insbesondere Abschnitt 7.6.3).

Pereira-Mendoza und Mellor (1991) variierten aufbauend auf ihren Erkenntnissen ihr Testdesign und überprüften zusätzlich, ob die Lernenden auch dann mithilfe perzeptueller Muster argumentieren, wenn die Daten keinerlei Muster zeigen. Dabei zeigte sich zum einen, dass Lernende in einem solchen Fall versuchten, Muster zu erschaffen, und zum anderen, dass Lernende im Alter von 10 bis 12 Jahren ohne geeignete Muster keine Vorhersagen treffen konnten (vgl. ebd.). Auch *Lachmayer (2008)* erfasste in ihren Untersuchungen das Extrapolieren von Graphenverläufen (siehe Abschnitt 4.2.1.3). Anders als in den Untersuchungen von Pereira-Mendoza und Mellor (1991), in denen alltagsnahe Kontexte verwendet wurden, untersuchte Lachmayer das Extrapolieren in Hinblick auf spezifische biologische Sachverhalte. So sollten Lernende beispielsweise anhand eines Räuber-Beute-Diagramms (siehe Abbildung 16) beantworten, wie sich die Populationen von Schildläusen und Marienkäfern nach den 100 im Diagramm dargestellten Monaten weiterentwickelt (vgl. ebd.).

Lachmayer (2008) konnte zeigen, dass das Extrapolieren für Lernende eine anspruchsvolle Tätigkeit ist (siehe Abschnitt 4.2.1.3). Aus ihrer Studie geht allerdings nicht hervor, ob die Lernenden dabei mittels perzeptueller Lösungsstrategien oder durch Anwendung ihres inhaltsspezifischen Vorwissens die jeweiligen Items gelöst haben (vgl. ebd.).

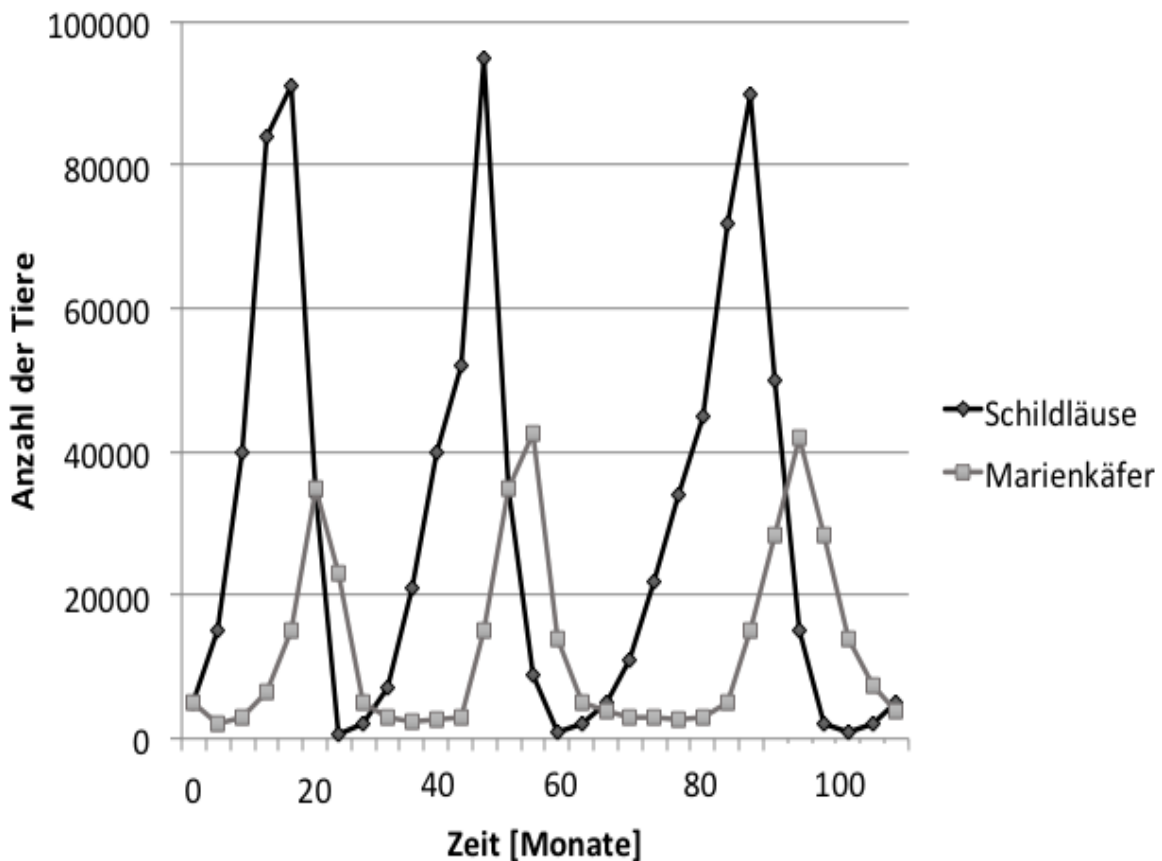


Abbildung 16. Beispielitem aus der Untersuchung von Lachmayer (2008) zur Analyse der Fähigkeit von Lernenden Graphen zu extrapolieren. Dargestellt ist eine Räuber-Beute-Beziehung zwischen Schildläusen und Marienkäfern (in Anlehnung an Lachmayer 2008, S. 35).

Barclay (1986) nutzte für seine Untersuchungen ebenfalls ein Diagramm, das naturwissenschaftliche Inhalte zusammenfasst. Anders als in den zuvor beschriebenen Studien, konnten die Lernenden (Jahrgangsstufe vier) in der Untersuchung von Barclay (1986) den Versuch beobachten, auf dessen Grundlage das Diagramm konstruiert wurde. In dem Versuch wurde eine chemische Substanz auf 80 °C erhitzt und der Temperaturverlauf über 20 Minuten gemessen (siehe Abbildung 17). Nach 20 Minuten war die Temperatur der Substanz immer noch höher als die Raumtemperatur (21 °C). Barclay stellte den Lernenden anschließend verschiedene Fragen zu dem Diagramm und dem Versuch.

Den Lernenden fiel es leicht, Werte aus dem Diagramm abzulesen und einfache inhaltliche Fragen zu beantworten. Schwierigkeiten offenbarten sich erst als sie vorhersagen sollten, wie sich der Graphenverlauf weiterentwickelt, wenn die Substanz weitere 20 Minuten bei Raumtemperatur (ca. 21 °C) abkühlt. Verschiedene Lernende extrapolierten die Temperaturkurve auf null Grad Celsius, anstatt diese der Raumtemperatur anzunähern (vgl. Barclay 1986).

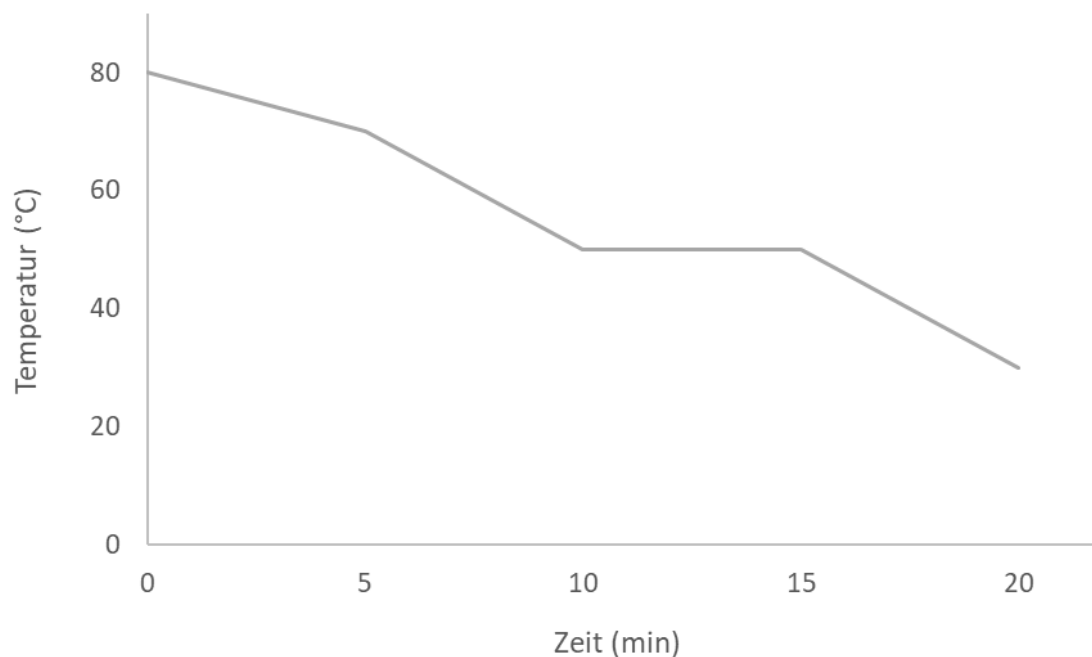


Abbildung 17. Diagramm aus der Untersuchung von Barclay (1986) zur Analyse der Fähigkeit von Lernenden Graphen zu extrapolieren. Dargestellt ist die Abkühlungskurve einer chemischen Substanz bei Raumtemperatur, die zuvor auf 80 °C erhitzt wurde (aus dem Englischen nach Barclay 1986, S. 4).

In Hinblick auf das Extrapolieren von Graphenverläufen lässt sich zusammenfassen, dass Lernende zum Extrapolieren vornehmlich perzeptuelle Lösungsstrategien verwenden und dabei nahezu vollständig im Graphenraum verbleiben. Die Konstruktion des Situationsraums – der für das inhaltliche Vorhersagen notwendige wäre – scheint Lernende selbst dann vor erhebliche Herausforderungen zu stellen, wenn diese mit den jeweiligen Inhalten vertraut sind.

4.3. Defizitorientierte Perspektive

Im vorausgegangenen Abschnitt wurde vornehmlich über Arbeiten berichtet, die auf die Fähigkeiten von Lernenden bei der Informationsentnahme fokussiert haben. Probleme beim Interpretieren wurden in den präsentierten Studien – wenn überhaupt – indirekt untersucht. In der Literatur konnten allerdings auch Studien identifiziert werden, die sich gezielt auf Probleme beim Interpretieren konzentrieren. Diese werden nachfolgend beschrieben (siehe Abschnitt 4.3.1). Häufig wird in diesem Zusammenhang von *Misconceptions*⁴⁵ gesprochen. In dieser Ar-

⁴⁵ Verschiedene Autor*innen verwenden den Begriff *Misconceptions* (vgl. z. B. Clement 1985, Berg & Smith 1994, Garcia & Cox 2010). Mokros und Tinker (1987) kritisieren dagegen die Verwendung des Begriffs *Misconception* im Kontext der hier thematisierten

beit wird allerdings angenommen wird, dass es sich dabei um eine fachlich inkorrekte Konstruktion des Situationsraums handelt, bedingt durch konfundierende bildliche Vorstellungen. Im Folgenden werden daher zur Beschreibung entsprechender Probleme die Begriffe *Missinterpretationen* und *Konfusionen* verwendet. Die in der Literatur am häufigsten diskutierten Missinterpretationen (vgl. Leinhardt et al. 1990), die *Intervall-Punkt-Konfusion*, die *Höhe-Steigungs-Konfusion* und die *ikonische Interpretation*, werden nachfolgend beschrieben, mögliche (kognitionspsychologische) Ursachen werden diskutiert (siehe Abschnitt 4.3.2).

4.3.1. Exemplarische Studien zu Missinterpretationen

4.3.1.1 Intervall-Punkt-Konfusion

Unter Intervall-Punkt-Konfusion wird verstanden, dass Lernende beim Interpretieren von Diagrammen auf einzelne Punkte fokussieren, obwohl die Wahrnehmung von Trends oder Intervallen besser geeignet wäre (vgl. Preece 1983; Bell & Janvier 1981; Bell, Brekke & Swan 1987a, b; Shah & Hoeffner 2002; Nitsch 2015; Leinhardt et al. 1990). Leinhardt et al. (1990) ziehen zur Veranschaulichung dieser Missinterpretation eine Studie von Preece (1983) heran, in der es Lernenden außerordentlich schwerfiel, anhand des Diagrammes in Abbildung 18 (siehe nachfolgende Seite) den Zeitraum zu benennen, in dem Jungen schwerer sind als Mädchen. Lernende fokussierten dabei auf einzelne Punkte, anstatt Intervalle zu betrachten (vgl. Leinhardt et al. 1990).

Probleme und zeigen empirisch auf, dass es sich hier keinesfalls um schwer veränderliche Vorstellungen handle: „they are not resistant to proper instruction“ (ebd., S. 380). Berg und Smith (1994) widersprechen Mokros und Tinker (1987) und weisen darauf hin, dass deren Forschungsdesign ungeeignet gewesen sei, um eine solche Aussage treffen zu können. Andere Autoren wie Pratt (1995) sowie Nemirovsky et al. (1998) sprechen sich ebenfalls gegen die Annahme von Misconceptions aus und interpretieren die Probleme der Lernenden vielmehr als eine unzureichende Vertrautheit mit dem inhaltlichen Referenten (z. B. dem Experiment, aus dem die Daten stammen). Leinhardt et al. 1990 verwenden zur Klassifikation entsprechender Probleme (bewusst) verschiedene Konzepte. Sie sprechen von „error“ (ebd., S. 39), „mistake“ (ebd., S. 40), „intuitions“ (ebd., S. 4), „misconceptions“ (ebd., S. 4), „other difficulties“ (ebd., S. 4), „confusions“ (ebd., S. 37) „misunderstanding“ (ebd., S. 31) oder „‘missed’ concept“ (ebd., S. 31). Zu einer ausführlicheren Diskussion des Für und Wider der jeweiligen Begriffe sei auf Roth und McGinn (1997) verwiesen. In der deutschsprachigen Forschung verwendet Vogel pragmatisch den Begriff „Graph-als-Bild-Fehler“ (vgl. Vogel 2007, S. 4).

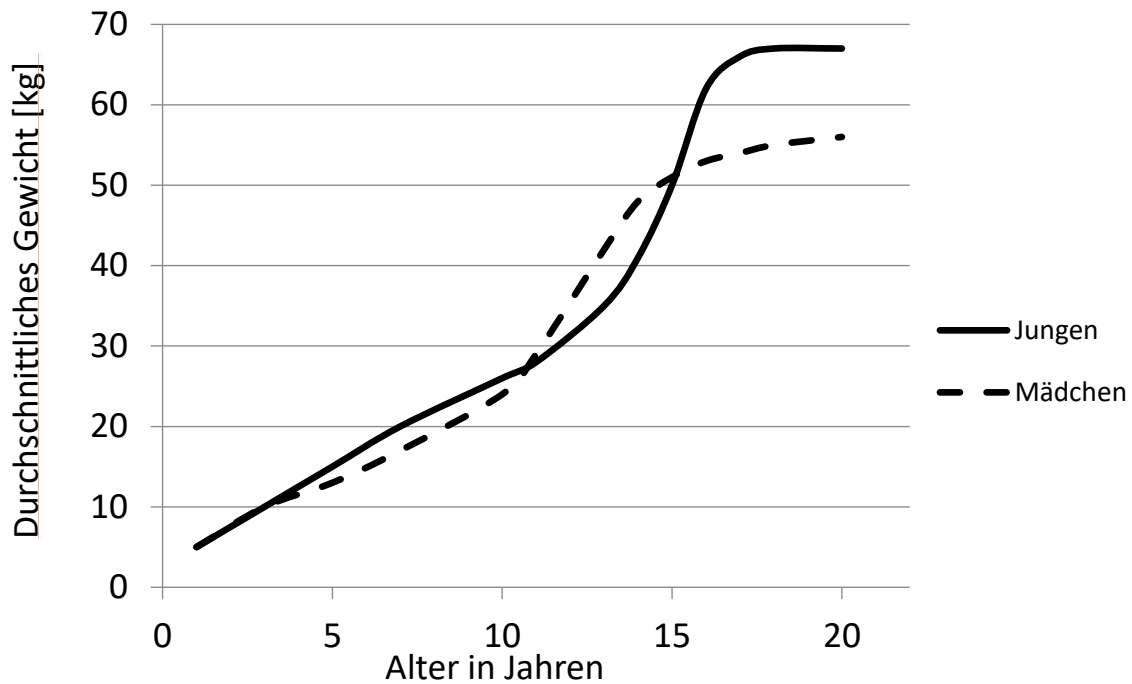


Abbildung 18. Diagramm aus der Untersuchung von Bell und Janvier (1981) zur Analyse der Intervall-Punkt-Konfusion. Dargestellt ist die Veränderung des Körpergewichts im Alter von null bis zwanzig Jahren (aus dem Englischen nach Bell & Janvier 1981, S. 37).

Ogleich die Intervall-Punkt-Konfusion in einzelnen Studien als eigenständiges Problem betrachtet wird (vgl. z. B. Lichti 2018), sind das tatsächliche Ausmaß dieses Problems sowie konkrete Ursachen noch unklar (vgl. Nitsch 2015). So ist insbesondere zu beachten, dass die Lernenden in der Studie von Preece (1983, zitiert nach Leinhardt et al. 1990) gefragt wurden, *wann* Jungen schwerer sind als Mädchen. Leinhardt et al. (1990) räumten hier ein, dass eine solche Frage unklar sei: „Given the ambiguity of the word when, it must be granted that technically these students were correct“ (Leinhardt et al. 1990, S. 37). Es könnte sich daher um eine allgemeine Tendenz von Lernenden handeln, grafische Darstellungen punktweise zu interpretieren (siehe dazu auch Monk 1992) oder beispielsweise um Aspekte des nachfolgend beschriebenen Höhe-Steigungs-Problems (vgl. Nitsch 2015). Ferner finden sich in anderen Untersuchungen (vgl. Mazur & Hickam 1993) Hinweise darauf, dass es ein weiterer Erklärungsansatz sein könnte, dass es Lernenden nicht gelungen ist, das Diagramm angemessen zu strukturieren und dieses in inhaltlich bedeutsame Abschnitte auf der X-Achse einzuteilen. Auf diesen Sachverhalt wird insbesondere in Abschnitt 4.4.1 detaillierter eingegangen.

4.3.1.2 Höhe-Steigungs-Konfusion

Lernende haben Probleme, in Diagrammen zwischen der Höhe und der Steigung von Graphen zu unterscheiden (vgl. z. B. McDermott et al. 1987; Clement, Mokros & Schultz 1986; Clement 1985, 1989; Bell & Janvier 1981; Gattis 2002; Roth 2003; Nitsch 2015; Leinhardt et al. 1990). Entsprechende Probleme werden unter der *Höhe-Steigungs-Konfusion* subsumiert und wurden insbesondere in physikalischen Kontexten bereits intensiv untersucht. Anschaulich wird über dieses Problem beispielsweise bei McDermott et al. (1987) berichtet. McDermott et al. (1987) überprüften in einer mehrjährigen Untersuchung mit Universitätsstudierenden unterschiedlicher Jahrgänge unter anderem, wie sie kinematische Diagramme inhaltlich interpretieren. Sie fragten Lernende dazu beispielsweise, ob in Abbildung 19 die Geschwindigkeit von Objekt A zum Zeitpunkt $t = 2$ größer, kleiner oder gleich der Geschwindigkeit von Objekt B sei.

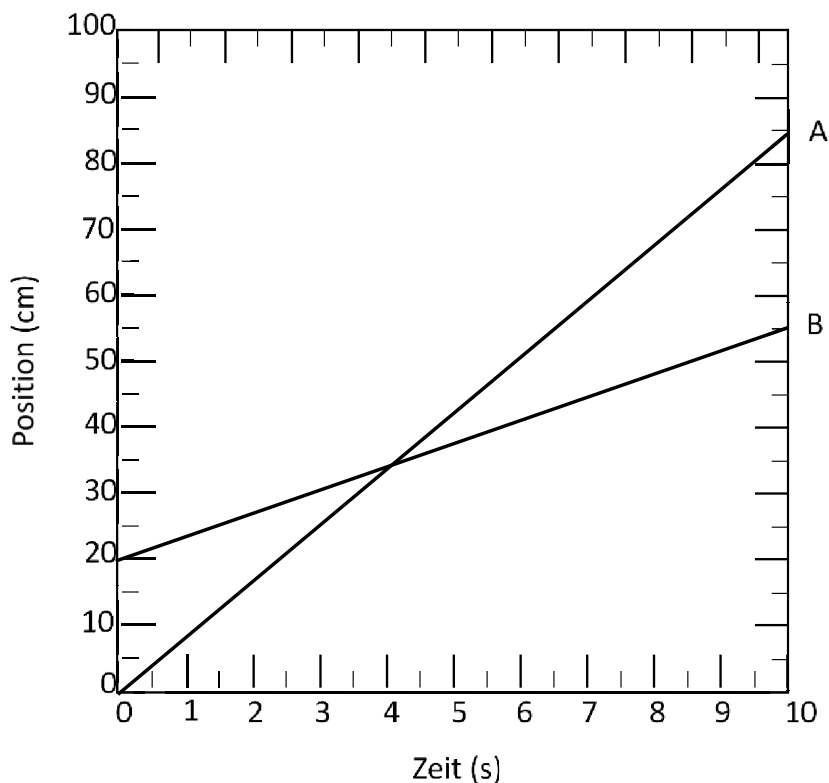


Abbildung 19. Ort-Zeit-Diagramm aus der Untersuchung von McDermott et al. (1987) zur Analyse der der Höhe-Steigungs-Konfusion (aus dem Englischen nach McDermott et al. 1987, S. 504)

Die meisten Lernenden antworten auf diese Frage fachlich inkorrekt, dass die Geschwindigkeit von Objekt A kleiner als die von Objekt B bzw. die von Objekt B größer als die von Objekt A sei. Ihre Schlussfolgerung basiert auf der perceptuellen Beobachtung, dass Graph A zum Zeitpunkt $t = 2$ Sekunden visuell unter

Graph B liegt. Die Lernenden fokussierten folglich auf den Unterschied in der Höhe der beiden Graphen, anstatt die Steigung zu vergleichen, und mappten die implizit dargestellte Variable Geschwindigkeit (Steigung) inkorrekt auf die Y-Achse. Entsprechend erkannten solche Lernende auch nicht, dass die beiden Objekte A und B niemals die gleiche Geschwindigkeit haben; stattdessen interpretierten sie den Schnittpunkt $t = 4 \text{ s}$ als Punkt gleicher Geschwindigkeit. Noch deutlicher traten diese Probleme hervor, wenn die Lernenden statt linearer Graphen Kurven interpretieren mussten (vgl. ebd.).

Prinzipiell wäre hier zu vermuten, dass es den Lernenden an mathematischem Wissen über funktionale Zusammenhänge oder Vorwissen über kinematische Konzepte mangelte. Erstaunlich ist allerdings, dass die Universitätsstudierenden der unterschiedlichen Jahrgänge sehr ähnliche Probleme beim Interpretieren zeigten: „The errors we identified did not seem to be idiosyncratic to any particular group but were evident among different populations and across different levels of sophistication“ (McDermott et al. 1987, S. 511). Die Autor*innen vermuten daher, dass es sich hier um generische Probleme beim Interpretieren von Diagrammen und nicht um unzureichendes domänenspezifisches Vorwissen handeln müsse (vgl. McDermott et al. 1987).

Vor dem Hintergrund der theoretischen Ausführungen in dieser Arbeit (siehe dazu insbesondere Ausführungen zur Translation in Abschnitt 3.7) wäre daher zu vermuten, dass es den Lernenden nicht möglich war, die beiden Objekte A und B beziehungsweise deren Geschwindigkeit im Situationsraum zu (re-)konstruieren und/oder zwischen dem Funktions-, Situations- und Graphenraum angemessen hin und her zu wechseln.

4.3.1.3 Ikonische Konfusion

Eine ikonische Konfusion liegt vor, wenn Lernende Diagramme mit ikonischen Darstellungen verwechseln (vgl. z. B. Janvier 1981; Bell & Janvier 1981; Kerslake 1977, 1981; McDermott et al. 1987; Clement et al. 1986; Clement 1985; Leinhardt et al. 1990; Hadjidemetriou & Williams 2002; Li 2006; Monk 1992; Parmar & Signer 2005; Berg & Smith 1994; Vogel 2007). Hinsichtlich der Beschreibung von Lernerproblemen beim Diagrammverstehen handelt es sich bei der ikonischen Konfusion um das am häufigsten beschriebene Problem. Anschauliche Ausführungen zu dieser Missinterpretation finden sich bei Kerslake (1981, siehe dazu auch Kerslake 1977).

Kerslake (1981) untersuchte eine sehr große Stichprobe von Lernenden im Alter von 13 ($N = 459$), 14 ($N = 755$) und 15 Jahren ($N = 584$) zu ihrem Verständnis von Diagrammen. Sie fokussierte dabei vornehmlich auf Kompetenzen, die für den Mathematikunterricht relevant sind. Empirisch konnte sie – in Übereinstimmung mit den in Abschnitt 4.2 beschriebenen Studien zur Informationsentnahme – zeigen, dass es Lernenden vergleichsweise leichtfiel explizit dargestellte Informationen aus Diagrammen zu entnehmen.

Die Lernenden zeigten allerdings erhebliche Probleme, wenn sie Weg-Zeit-Diagramme (siehe Abbildung 20) inhaltlich interpretieren sollten. Kerslake (1981) schlussfolgert daher: „There appears to be a large gap between the relatively simple reading of information from a graph and the appreciation of an algebraic relationship“ (ebd., S. 135).

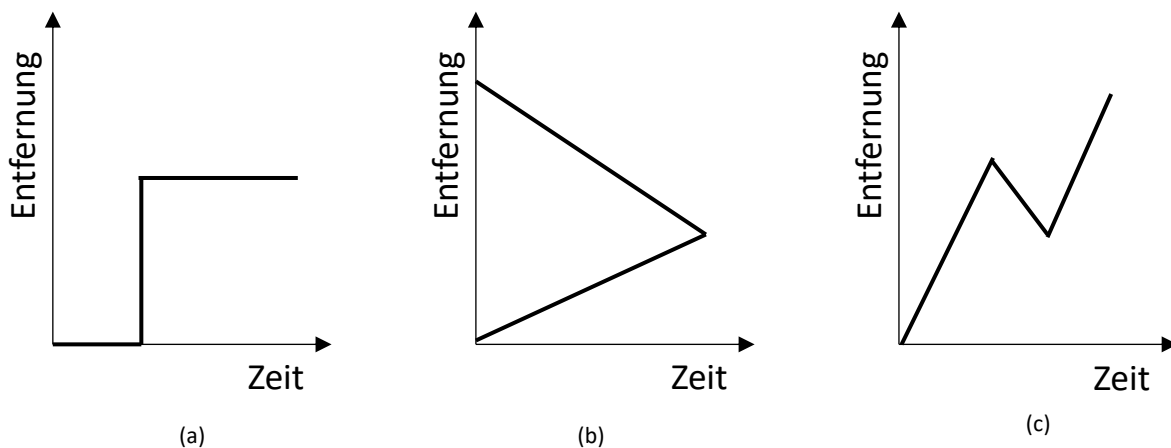


Abbildung 20. Weg-Zeit-Diagramme aus der Untersuchung von Kerslake (1981) zur Analyse der ikonischen Konfusion (aus dem Englischen nach Kerslake 1981, S. 128).

Zwischen 5 % und 20 % der Lernenden äußern beim Beschreiben der Weg-Zeit-Diagramme Vorstellungen über die grafisch referierte Situation, die Kerslake als „misconceptions“ (Kerslake 1981, S. 129), „incorrect spatial interpretations“ (ebd., S. 129) oder „incorrect visual impressions“ (ebd., S. 129) bezeichnet. Beispielsweise beschrieben verschiedene Lernende die in Abbildung 20 dargestellten Diagramme wie eine Wegbeschreibungen. Zu Diagramm (a) tätigten sie beispielsweise Aussagen wie *man geht nach Osten, dann nach Norden und dann wieder nach Osten* (ebd., S. 129). Von der ikonischen Konfusion betroffene Lernende scheinen daher zwar aufbauend auf dem Diagramm einen Situationsraum zu konstruieren, allerdings entspricht dieser Situationsraum nicht dem tatsächlich referierten Sachverhalt.

Janvier (1998) beschreibt ähnliche Probleme von Lernenden in Zusammenhang mit der Interpretation eines Diagramms (siehe Abbildung 21), das biologische Inhalte zusammenfasst. Das Diagramm zeigt Ergebnisse aus fünf Versuchen. In diesen wurden Bakterienpopulationen derselben Bakterienart bei unterschiedlichen Temperaturen kultiviert. Die maximale Populationsgröße wurde jeweils ermittelt. Es ergaben sich folglich fünf Populationsgrößen bei fünf unterschiedlichen Temperaturen. Die Lernenden sollten die Datenpunkte zunächst in ein leeres Koordinatensystem eintragen (siehe Abbildung 21a), sie dann zu einem vollständigen Liniendiagramm verbinden (siehe Abbildung 21b) und letztendlich das so konstruierte Liniendiagramm interpretieren.

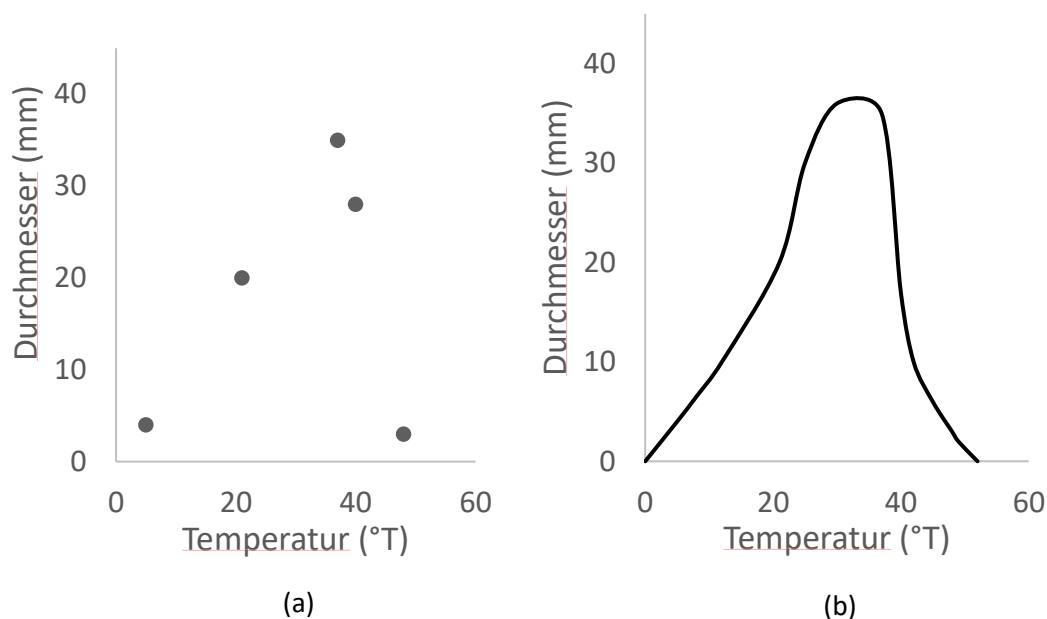


Abbildung 21. Diagramm aus der Untersuchung von Janvier (1998) zur Analyse der Fähigkeit von Lernenden Diagramme zu interpretieren. Dargestellt ist der Durchmesser von Bakterienkulturen, die bei unterschiedlichen Temperaturen kultiviert wurden (aus dem Englischen nach Janvier 1998, S. 83).

In einer fachlich korrekten Interpretation würden Diagrammleser*innen den Graphen in Abbildung 21b als Darstellung der Ergebnisse einer potenziell unendlichen Anzahl von Experimenten interpretieren, in denen jeweils die Entwicklung verschiedener Bakterienpopulationen derselben Bakterienart bei verschiedenen Temperaturen gemessen wurde (vgl. Lumer et al. 2017). Stattdessen interpretierten viele Lernende, obwohl sie mit dem Kontext und der Konstruktion des Diagramms vertraut waren, das Versuchsdiagramm als einen einzelnen Versuch (vgl. Janvier 1998, siehe dazu auch Ausführungen von Padilla et al. 1986 und Keller 2008 in Abschnitt 4.2.3.1). Die Kurve deuteten sie als Wachstumskurve

einer einzelnen Bakterienpopulation (statt vieler einzelner Populationen) in Abhängigkeit von der Zeit (statt von der Temperatur). Entsprechend gelang es den Lernenden zwar den Maximalwert des Graphen inhaltlich korrekt zu interpretieren („the population is high“, Janvier 1998, S. 83), die Graphenabschnitte links und rechts davon wurden aber nur von einem Teil der Lernenden fachlich korrekt interpretiert. Anstatt die unterschiedlichen Populationsgrößen auf unterschiedliche Temperaturen zurückzuführen, interpretierten sie die jeweiligen Abschnitte als Wachstum und Absterben einer einzigen Population („The students [...] tell the sad story of the population“, ebd., S. 83). Die Lernenden führten sogar kausale Erklärungen für die (missinterpretierte) vermeintliche Abnahme der Populationsgröße an. Beispielsweise nannten sie einen Mangel an zur Verfügung stehender Nahrung als potenzielle Ursache für das Absterben (vgl. ebd.).

Janvier (1998) erklärt die Missinterpretation insbesondere damit, dass die häufige Interpretation von Wachstumskurven in Schulbüchern mit der Variable Zeit auf der X-Achse die Lernenden in eine Art Bias⁴⁶ versetze (Janvier 1998 spricht hier von „an easily ‚imaginable‘ interpretation“, ebd., S. 83). Dieser Bias⁴⁷ erschwere es den Lernenden, Diagramme mit einer anderen X-Variable als der Zeit zu interpretieren (vgl. ebd.). Zu einer Analyse dieses Problems im Themenbereich Enzymatik sei auf Abschnitt 7.3.3 verwiesen.

Bell und Janvier (1981) unterscheiden bezüglich vergleichbarer Interpretationsprobleme zwischen situationaler Distraction (*situational distraction*) und bildlicher Distraction (*pictorial distraction*). Die von ihnen beschriebene *situationale Distraction* entspricht einer Störung der Diagramminterpretation durch bestehendes Vorwissen oder Vorerfahrungen. So missinterpretierten Lernende beispielsweise das in Abbildung 22 dargestellte Populationsdiagramm, welches das Wachstum zweier Bakterienpopulationen im Verlauf der Zeit zeigt, als eine Art ‚Hunger-Diagramm‘ und deuteten den Anstieg der Graphen als Verzehr von Nahrung und nicht als Wachstum der jeweiligen Populationen durch Zweiteilung der Bakterien (vgl. ebd.).

⁴⁶ Janvier (1998) bezeichnet dies als *chronicle*: „A chronicle is a frame of interpretation or solution of a graph, that proves confusing to students or workers when they interpret, draw, or deal with a temporal emphasis“ (ebd., S. 79).

⁴⁷ In der biologiedidaktischen Forschung sind verschiedene kognitive Verzerrungen und Bestätigungstendenzen (z. B. Experimentier-Bias, Confirmation-Bias und Expectation-Bias) bekannt, die beispielsweise dazu führen, dass Lernende Informationen fehlinterpretieren oder Hypothesen unsystematisch testen (vgl. z. B. Knöner 2017).

Eine *bildliche Distraction* tritt dagegen auf, wenn das Diagramm eine hohe perzeptuelle, aber eine geringe konzeptuelle Ähnlichkeit mit einer für die Interpretation relevanten Situation besitzt („when the shape of the graph is confused with that of the hill being climbed or the race track being traversed“, ebd., S. 37). Die von Kerslake (1981) beschriebenen Missinterpretationen von Weg-Zeit-Diagrammen wären demnach als bildliche Distractionen zu verstehen.

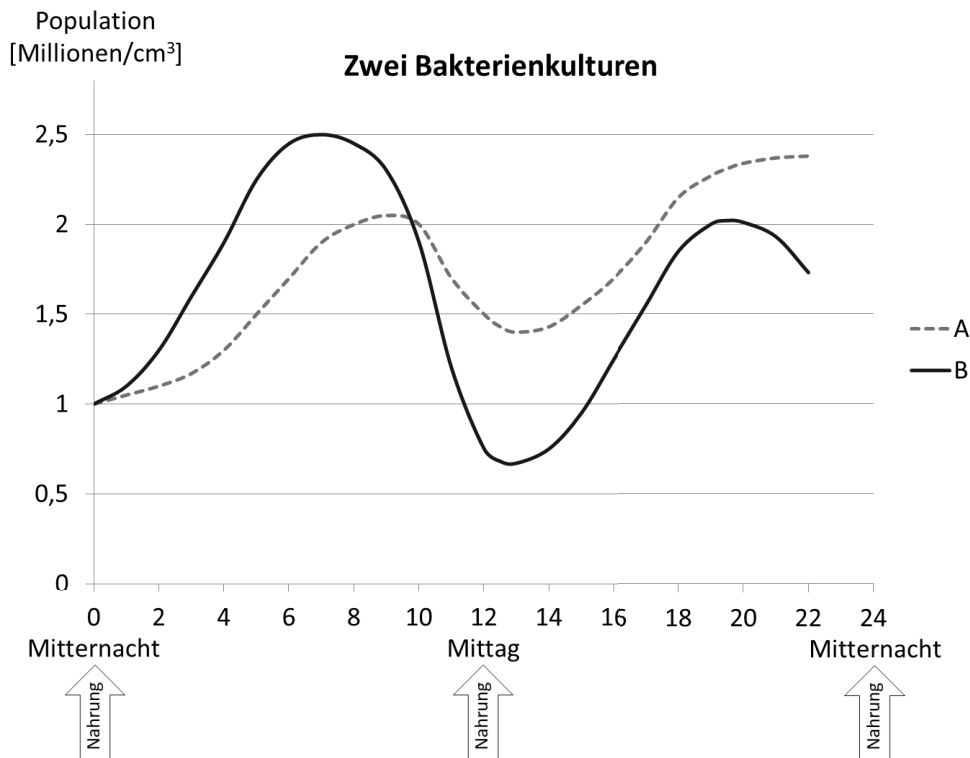
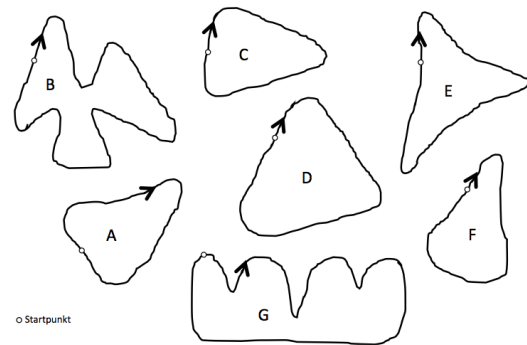
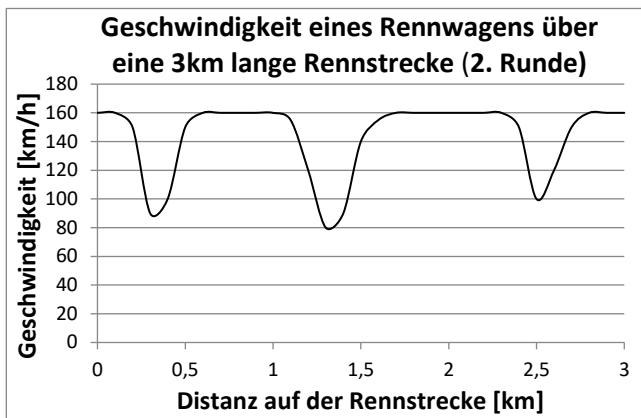


Abbildung 22. Diagramm aus der Untersuchung von Bell und Janvier (1981) zur Analyse der situationalen Distraction. Dargestellt ist die Entwicklung von zwei Bakterienpopulationen im Verlauf der Zeit (aus dem Englischen nach Bell & Janvier 1981, S. 37).

Bell und Janvier (1981) verwenden zur Beschreibung der bildlichen Distraction das Diagramm in Abbildung 23 (siehe dazu auch Janvier 1981). Die Lernenden sollten aus den vorgegebenen sieben Rennabschnitten (siehe Abbildung 23b) den Rennabschnitt auswählen, welcher inhaltlich am besten zu dem Diagramm (siehe Abbildung 23a) passt.

Rennabschnitt G besitzt eine hohe perzeptuelle Ähnlichkeit mit dem Diagramm, aber eine geringe inhaltliche Ähnlichkeit. Die Wahl von Abschnitt G als passendem Rennabschnitt für das in Abbildung 23 dargestellte Geschwindigkeits-Weg-Diagramm wäre demnach eine bildliche Distraction (vgl. Bell & Janvier 1981). Eine ausführliche, kontextspezifische Analyse der Probleme von Lernenden, die in Zusammenhang mit dieser Aufgabe auftreten können, findet sich bei Janvier (1981).



(a)

(b)

Abbildung 23. Diagramm aus der Untersuchung von Bell & Janvier (1981) zur Analyse der bildlichen Distraction. Diagramm a zeigt die Geschwindigkeit eines Rennwagens auf einer Rennstrecke, Diagramm b zeigt den möglichen Rennstreckenverlauf (aus dem Englischen nach Bell & Janvier 1981, S. 38; siehe dazu auch Janvier 1981).

4.3.2. kognitionspsychologische Erklärungsansätze für Missinterpretationen

Da sich die soeben beschriebenen ikonischen Konfusionen in zahlreichen Studien gezeigt haben (vgl. z. B. Bell & Janvier 1981; Janvier 1989; Keller 2008), werden im Folgenden potenzielle Ursachen dieser Missinterpretationen detaillierter analysiert. Zudem sei vorweggenommen, dass vergleichbare Missinterpretationen auch in der hier durchgeführten Untersuchung beobachtet werden konnten (siehe Abschnitt 7.6.3). Zur Erklärung sind insbesondere die zuvor in Abschnitt 3.8.1 beschriebenen Vorstellungsbilder von Relevanz. So betonen beispielsweise Leinhardt et al. (1990): „Interpretation actions are subject [...] to confusion or confounding with pictorial events of a similar nature” (Leinhardt et al. 1990, S. 9). Das Modell des Text- und Bildverstehens nach Schnotz und Bannert (1999, 2003) liefert einen ersten Ansatz, um den Einfluss von Vorstellungen bzw. Vorstellungsbildern auf die Diagramminterpretation zu erläutern. Das Modell wird im Folgenden beschrieben und anschließend verwendet, um mögliche Erklärungsansätze für die Missinterpretation von Diagrammen zu entwickeln.

4.3.2.1 Modell des Text- und Bildverstehens

Das *Modell des Text- und Bildverstehens* (vgl. Schnotz & Bannert 1999, 2003; siehe dazu auch Bannert & Schnotz 2006; Schnotz 2001, 2005, 2014a) wurde bereits in verschiedenen biomedizinischen Studien eingesetzt, um das Verstehen grafischer Darstellungen, die naturwissenschaftliche Inhalte transportieren, zu analysieren (vgl. Von Kotzebue 2014; Lachmayer 2008; Brandstetter-Korinth

2017; Beck 2017). Das Modell (siehe Abbildung 24) wurde aufbauend auf der Theorie der dualen Kodierung entwickelt, um die kognitive Verarbeitung von gleichzeitig dargebotenen Texten und Bildern zu erklären.

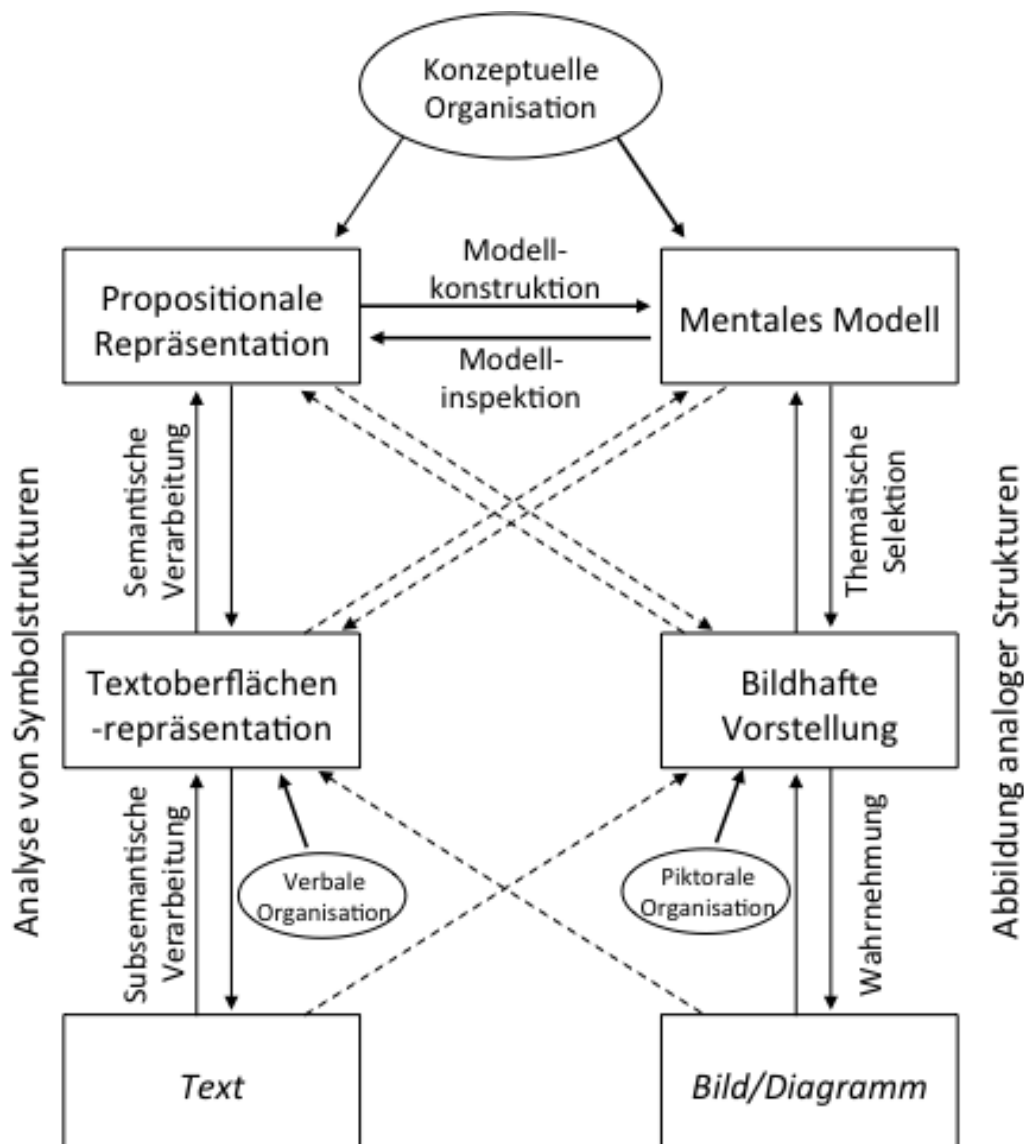


Abbildung 24. Modell des Text- und Bildverstehens (nach Bannert & Schnotz 2006, S. 76; siehe dazu auch Schnotz & Bannert 1999, 2003).

Obgleich ursprünglich für das Lesen von Text-Bild-Kombinationen entwickelt, lassen sich die Erkenntnisse aus dem Modell auch auf das Lesen von Diagrammen übertragen⁴⁸ (vgl. Von Kotzebue 2014). Schnotz und Bannert (1999, 2003) gehen davon aus, dass Leser*innen, aufbauend auf external dargebotenen Texten, multiple internale (mentale) Repräsentationen der äußeren und inneren Re-

⁴⁸ Aufgrund des großen Textanteils betrachten einzelne Autor*innen Diagramme ohnehin eher als multiple externe Repräsentationen (vgl. Brandstetter-Korinth 2017, S. 18; siehe Abschnitt 3.1).

alität konstruieren (vgl. ebd.; siehe dazu auch Schnotz 2014b). Dabei sind analoge Struktur-Mapping-Prozesse⁴⁹ von besonderer Bedeutung, bei denen visuelle Einheiten auf mentalen Einheiten und räumliche Beziehungen auf semantischen Beziehungen abgebildet werden (vgl. Schnotz & Bannert 2003).

Nach dem Modell des Text- und Bildverstehens werden auf der Grundlage von kontinuierlichen *Texten* zunächst vornehmlich (siehe durchgezogene und gestrichelte Linien in Abbildung 24) *Textoberflächenrepräsentationen* und darauf aufbauend *propositionale Repräsentationen* (siehe Abschnitt 3.8.1.2) konstruiert. Auf der Grundlage von Bildern werden dagegen vornehmlich *bildhafte Vorstellungen* bzw. *Vorstellungsbilder* (siehe Abschnitt 3.8.1.4) konstruiert. Sowohl die propositionalen Repräsentationen als auch die bildhaften Vorstellungen können genutzt werden, um ein *mentales Modell* (siehe Abschnitt 3.8.1.3) zu konstruieren. Die *Konstruktion* des mentalen Modells kann durch Schemata organisiert und strukturiert werden (vgl. Schnotz & Bannert 2003; Schnotz 2001). Schemata sind im Langzeitgedächtnis gespeicherte konzeptuelle Anleitungen, die den Leser anleiten, Informationen aus Texten oder Bildern zu entnehmen (vgl. Pinker 1990; Simkin & Hastie 1987; siehe Ausführungen zu Diagrammschemata in Abschnitt 3.8.2.1).

Das von den Leser*innen konstruierte mentale Modell kann von ihnen verwendet werden, um im Rahmen der *Modellinspektionen* Schlussfolgerungen aufzustellen. Letztere haben die Form propositionaler Repräsentationen und können durch Verschriftlichung externalisiert werden (vgl. Schnotz 2001; Schnotz & Bannert 2003). Gleichzeitig kann das mentale Modell aber auch, durch Prozesse *thematischer Selektion*, zur Konstruktion bzw. Auswahl bildhafter Vorstellungen bzw. Vorstellungsbildern dienen (vgl. Bannert & Schnotz 2006; siehe Ausführungen von Dutke 1994 in Abschnitt 3.8.1.4). Analog zu den propositionalen Repräsentationen können auch diese, z. B. durch Konstruktion eines Diagramms, externalisiert werden (vgl. Schnotz & Bannert 1999, 2003; Schnotz 2001; Von Kotzebue & Nerdel 2012, 2015; Kotzebue, Gerstl & Nerdel 2015). Ebenso wird in dem Modell angedeutet – was für die Interpretation der Lernerantworten in Abschnitt 7.6.3 von hoher Relevanz ist –, dass auch Vorstellungsbilder als Grundlage für die schlussfolgerungsbasierte Produktion internaler Propositionen verwendet werden können (vgl. Bannert & Schnotz 2006; Schnotz 2014b).

⁴⁹ Spezifische Hinweise zum Mapping im Kontext von Diagrammen finden sich z. B. bei Gattis und Holyoak (1996).

4.3.2.2 Einfluss von Vorstellungen auf das Diagrammverstehen

Basierend auf dem im vorausgegangenen Kapitel beschriebenen Modell des Text- und Bildverstehens nach Schnotz & Bannert (1999, 2003) wird angenommen, dass es insbesondere dann zur Missinterpretationen eines Diagramms kommt, wenn Lernende bildhafte Vorstellungen zur Interpretation eines Diagramms verwenden, die in keiner inhaltlichen Relation zu den im Diagramm referierten Inhalt stehen. Ein solcher Fall sei zum leichteren Verständnis der nachfolgenden Ausführungen beispielhaft anhand des in Abbildung 25 dargestellten Weg-Zeit-Diagramms „The Country Walk“ (Swan 1985, S. 211) aufgezeigt. Lernende tendieren hier dazu, ähnlich wie bereits in Abschnitt 4.3.1.3 in Zusammenhang mit der Studie von Kerslake (1981) beschrieben, das Diagramm bzw. die referierte Situation ikonisch mit der Vorstellung einer *Bergbesteigung* (siehe Text rechts in Abbildung 25) zu konfundieren (vgl. Swan 1985).

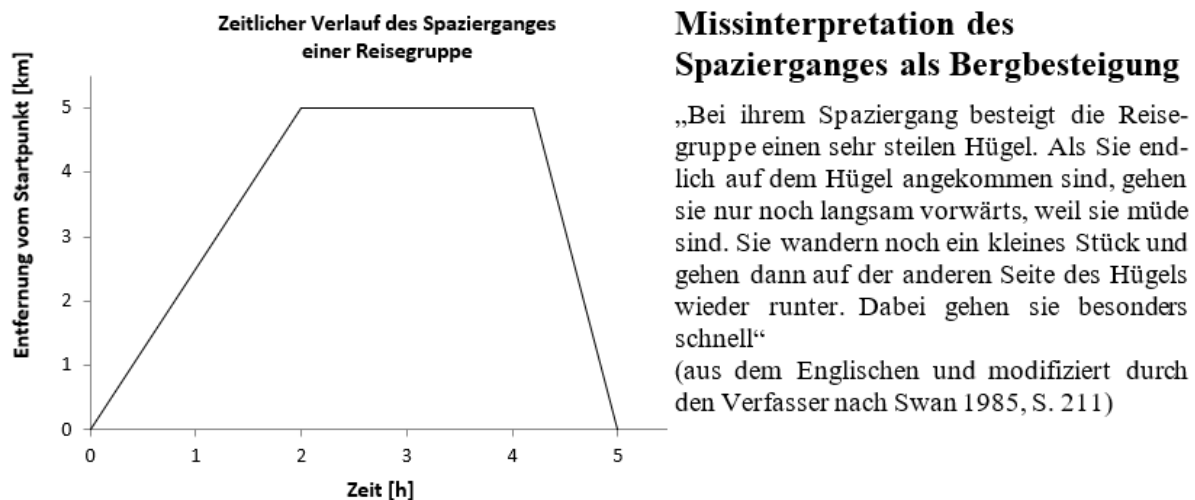


Abbildung 25. Diagramm, das den zeitlichen Verlauf des Spazierganges einer Reisegruppe zeigt, sowie eine mögliche (ikonische) Missinterpretation des Diagramms (siehe Text rechts, aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Swan 1985, S. 211).

Inhaltlich angemessen wäre hier jedoch die Interpretation der Inhalte im Sinne eines Spazierganges, bei dem die Reisegruppe zunächst *relativ langsam* an einem bestimmten *Ort* wandert, der *5 km vom Startpunkt entfernt* ist, dort für etwas mehr als *2 Stunden pausiert* und anschließend *relativ schnell von dort ausgehend wieder zum Startpunkt zurückkehrt*.

Ein kognitionspsychologischer Erklärungsansatz für die oben dargestellte Missinterpretation, aufbauend auf dem Modell des Text- und Bildverstehens, wird im Folgenden gegeben (siehe Abbildung 26): Es wird angenommen, dass bei der

Betrachtung des Diagramms in Kontext 1 ein bereits bestehendes mentales Modell, das in einem anderen Kontext, Kontext 2, konstruiert wurde, aktiviert wird (Pfeil 1). Aus Kontext 2 bzw. aus dem zugehörigen mentalen Modell wird dann ein Vorstellungsbild abgerufen (Pfeil 2), das dann wiederum zum Schlussfolgern oder zur Konstruktion propositionaler Repräsentationen in Kontext 1 verwendet wird (Pfeile 3 und 4). Ohne eine Kontrollinstanz zu durchlaufen, werden die jeweiligen Erkenntnisse in Schriftform (Pfeil 5) oder bildlich (zur Vereinfachung hier nicht dargestellt) externalisiert.

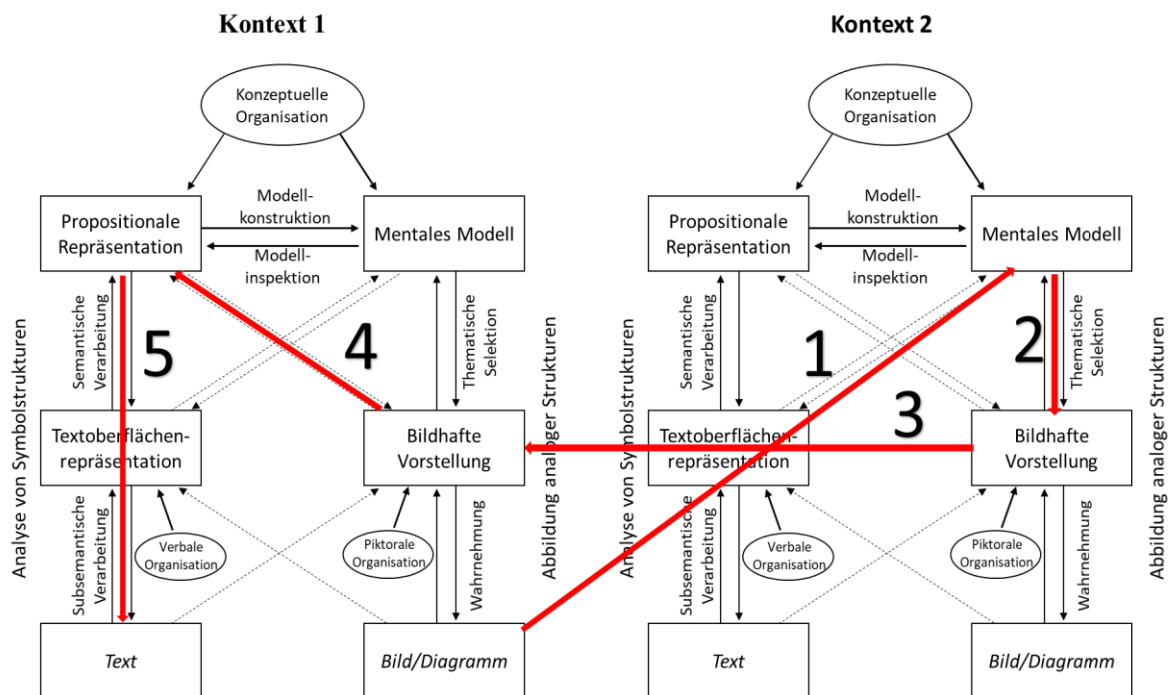


Abbildung 26. Erläuterung der konfundierenden Wirkung von Vorstellungsbildern auf das Interpretieren von Diagrammen (modifiziert durch den Verfasser nach Bannert & Schnotz 2006, S. 76)

Je nachdem, wie weit Kontext 2 inhaltlich von Kontext 1 entfernt ist, kann es daher zu erheblichen Fehlinterpretationen kommen. Zhang (1997) trifft ähnliche Annahmen und spricht diesbezüglich von perzeptuellen und kognitiven Verzerrungen, welche weitere Lernhandlungen unter Umständen erheblich erschweren können:

„The directly perceived information from external representations and the directly retrieved information from internal representations may elicit perceptual and cognitive biases, respectively, on the selection of actions. If the biases are consistent with the task, they can guide actions towards the goal. If the biases are inconsistent with the task, however, they can also misguide actions away from the goal” (Zhang 1997, S. 186).

Während sich die vorherigen Ausführungen vornehmlich auf eine Konfusion mit Vorstellungsbildern aus anderen Kontexten beziehen (ikonische Konfusion, vgl. Leinhardt et al. 1990), lassen sich mithilfe des Modells des Text- und Bildverstehens auch Erklärungen für die in den Abschnitten 4.2.3.1.2 und 4.3.1.3 beschriebenen Probleme beim Interpretieren von Wachstumskurven entwickeln (vgl. dazu insbesondere Janvier 1998 und Keller 2008). Zunächst sei dazu auf die Ausführungen von Paivio (1990) verwiesen. Dieser nutzt zur Analyse von Interpretationsprozessen das von Spurgeon (1935, zitiert nach Paivio 1990) geprägte Konzept der *dominating images*, das diese im Rahmen der Analyse literarischer Texte entwickelt hat. Paivio (1990) versteht unter *dominating images* wiederkehrende Motive in (literarischen) Werken, die das Verständnis wie ein vorstellungsbildliches Interpretationsfundament – eine Art Schema⁵⁰ – lenken und organisieren. Paivio (1990) charakterisiert derartige Vorstellung als „the prototypical representations of general categories and ideas, and as conceptual pegs for storage and retrieval of other related information in the poem or story“ (ebd., S. 228). Um im Folgenden Verwechslungen mit Vorstellungsbildern zu vermeiden – und insbesondere, um den schemaartigen Einfluss dieser Vorstellungen zu betonen –, werden diese im Folgenden, angelehnt an Paivio (1990), als *Leitmotiv-Schemata* bezeichnet. Es wird angenommen, dass sich Lernende in einem *Leitmotiv-Bias* befinden, wenn sie ein im vorausgegangenen Unterricht erworbenes *Leitmotiv-Schema* in ungeeigneter Art und Weise zur Interpretation eines neuen Diagramms anwenden.

Das jeweilige Schema hat sich womöglich sogar bereits mehrfach beim Interpretieren von Diagrammen als hilfreich erwiesen und wird daher, bei Konfrontation mit einem perzeptuell ähnlichen Diagramm, automatisch aktiviert (siehe Ausführungen von Pinker (1990) in Abschnitt 3.8.2.1). Ist das Leitmotiv-Schema für die Diagrammanalyse fachlich ungeeignet (siehe Studie von Janvier (1998) in Abschnitt 4.3.1.3), kommt es zu einer systematischen Verzerrung der Diagramminterpretation. Dies fällt Diagrammleser*innen allerdings nur dann auf, wenn sie ihre Interpretation aktiv reflektieren (siehe dazu Ausführungen im nachfolgenden Abschnitt). Anders als im Fall der zuvor anhand des Bergbesteigungsbeispiels beschriebenen *vorstellungsbildlichen Konfusion*, die häufig wie eine

⁵⁰ Hier sind durchaus Interaktionseffekte denkbar, bei denen aktuell unklar ist, inwieweit die beschriebenen Effekte auf mentale Modelle oder Schemata zurückzuführen sind. Die nachfolgenden Ausführungen sind daher als vereinfachte Darstellung hochkomplexer Zusammenhänge zu verstehen.

Verwechslung, bedingt durch das oberflächliche Analysieren eines Diagramms, erscheint, kann es im Fall des Leitmotiv-Bias durchaus zu einer intensiven, aber fachlich inkorrekten, Analyse des Diagramms kommen.

Problematisch ist insbesondere, dass der Kontext, aus dem das Schema stammt, welches zur Interpretation dieser Diagramme ungeeignet ist, der (fachspezifische) Unterricht selbst sein kann. So argumentiert Janvier (1998) beispielsweise, dass die von den Lernenden missinterpretierte Wachstumskurve (siehe Abschnitt 4.3.1.3) perzeptuelle Ähnlichkeit zu Wachstumskurven in verschiedenen Schulbüchern besitze, in denen das Wachstum eines einzelnen Beobachtungsobjektes im Verlauf der Zeit dargestellt sei (vgl. ebd.). Es lässt sich vermuten, dass Lernende beim Analysieren der Schulbuchdiagramme, die durch die Diagramme referierten, inhaltlichen Situationen nicht (vollständig) verstanden haben und daher die im Unterricht besprochene Interpretation als eine Art *prototypische*⁵¹ *Interpretation* verinnerlicht haben. Womöglich erwies sich diese prototypische Interpretation einer Wachstumskurve⁵² sogar in vielen Fällen als erfolgreich und fungierte fortan als spezifisches Interpretationsschema (Leitmotiv-Schema) für perzeptuell ähnliche Wachstumskurven. Womöglich haben die Untersuchungsdiagramme von Janvier (1998) und Keller (2008) ein solches Leitmotiv-Schema aktiviert (4.2.3.1.2 und 4.3.1.3).

Den betroffenen Diagrammleser*innen würde erst im Rahmen einer kognitiv anspruchsvollen Analyse bewusst werden, dass das entsprechende Leitmotiv-Schema für die Interpretation nicht geeignet ist. Anstatt sich aber kognitiv derart stark mental zu involvieren, scheint es zumindest möglich, wenn nicht sogar wahrscheinlich, dass es bei den Diagrammleser*innen zu einer unreflektierten Anwendung des verinnerlichteten Schemas und damit zu einer Reproduktion bereits bekannter Inhalte kommt. Die Diagrammleser*innen geraten dadurch in den bereits mehrfach erwähnten Leitmotiv-Bias. Vergleichbare Probleme, die sich mithilfe der hier geäußerten Annahmen erklären lassen, werden für qualitative Diagramme von Schönborn und Anderson (2006) sowie von Van Mil et al. (2016) im Bereich Zellbiologie beschrieben. Im Folgenden wird dargelegt, welche Faktoren dazu beitragen können, dass Lernende ihr Vorgehen bei der Diagrammanalyse nicht aktiv reflektieren.

⁵¹ Zu einer Diskussion des Prototypen-Ansatzes siehe Hammann (2002).

⁵² Hier sind verschiedene Graphenverläufe vorstellbar, auf die aus Gründen der Vereinfachung nicht weiter eingegangen wird.

4.3.2.3 Einfluss von Analysestrategien auf das Diagrammverstehen

Die Anwendung *intuitiver*⁵³ statt *analytischer Strategien* zur Interpretation von Diagrammen ist ein möglicher Grund für das Missinterpretieren von Diagrammen und Probleme beim Verstehen (vgl. Peeck 1993, 1994; Weidenmann 1989; Cromley et al. 2010; Tang 1991; Schmidt-Weigand et al. 2010; Leinhardt et al. 1990).

Leinhardt et al. (1990) führen beispielsweise die in den vorausgegangenen Abschnitten beschriebenen Missinterpretationen (sie sprechen hier von *misconceptions*) auf die Anwendung intuitiver Strategien zurück: „Some misconceptions can be traced logically to intuitions. For example, students' tendency to interpret graphs iconically may be related to their intuitions regarding picture reading“ (ebd., S. 5). Intuitive Strategien definieren sie als „features of a student's knowledge that arise most commonly from everyday experience; in general, they are seen to exist prior to specific formal instruction“ (ebd., S. 5). Nach Meinung von Leinhardt et al. (1990) lässt sich die Verwendung intuitiver Schlussfolgerungsstrategien insbesondere auf einen Mangel an spezifischen, analytischen Strategien zurückführen. Andere Autor*innen vermuten dagegen, dass Lernende die Verwendung analytischer Strategien vermeiden, weil sie kognitiv besonders anstrengend seien (vgl. Sloman 1996; Kalyuga et al. 2003; Rey & Nieding 2010). Croskerry (2009; siehe dazu auch Croskerry 2014) und Croskerry et al. (2013) diskutieren den Zusammenhang zwischen der Anwendung intuitiver und analytischer Schlussfolgerungsstrategien vor dem Hintergrund ihres Modells des *universellen diagnostischen Schlussfolgerns*. Intuitive und analytische Schlussfolgerungsprozesse werden in dem Modell einander gegenüberstellt.

Croskerry (2009) und Croskerry et al. (2013) unterscheiden dabei zwei Entscheidungssysteme: ein intuitives System, das durch Typ-1-Prozesse (kurz *System 1*) gekennzeichnet ist, und ein analytisches System aus Typ-2-Prozessen (kurz *System 2*) (siehe Abbildung 27; siehe dazu auch Kahnemann 2011). Beide Systeme stellen Pole eines kognitiven Kontinuums dar.

Das intuitive *System 1* basiert vornehmlich auf Vorerfahrungen des Entscheiders und auf induktiver Logik. Dieses automatische, eher passive System verwendet häufig oberflächliche Heuristiken⁵⁴ oder andere breit einsetzbare, kognitiv wenig

⁵³ Zu einer Diskussion von *Intuition* und *intuitiven Vorstellungen* im Biologieunterricht siehe Gebhard und Oschatz (2019).

⁵⁴ Unter *Heuristiken* werden generelle, auf unterschiedliche Problemstellungen anwendbare induktive Problemlöseverfahren verstanden (vgl. Rollett 2008).

anstrengende induktive Prozesse zum Problemlösen (siehe dazu auch Abschnitt 3.6). Die Überprüfung und die Korrektur von fehlerhaften, widersprüchlichen oder unzureichenden Schlussfolgerungen erfolgen dabei selten. Das intuitive System 1 wird insbesondere durch die (perzeptuelle) *Wiedererkennung* zuvor erlernter Muster – z. B. aus dem Unterricht bekannter Diagramme (siehe vorausgegangene Argumentation zum Leitmotiv-Bias) – getriggert und ist außerordentlich anfällig für kognitive Verzerrungen: „System 1 is characterized by heuristics and other mental shortcuts. [...] The system is fast, frugal, requires little effort, and frequently gets the right answer. But occasionally it fails, sometimes catastrophically“ (Croskerry 2009, S. 1023). Es erscheint schlüssig, dass Lernende, die zur Prozessierung eines ihnen unbekanntes, komplexen Diagramms das kognitiv wenig(er) anstrengende, aber dafür fehleranfällige(re) System 1 verwenden, Missinterpretation unterliegen können.

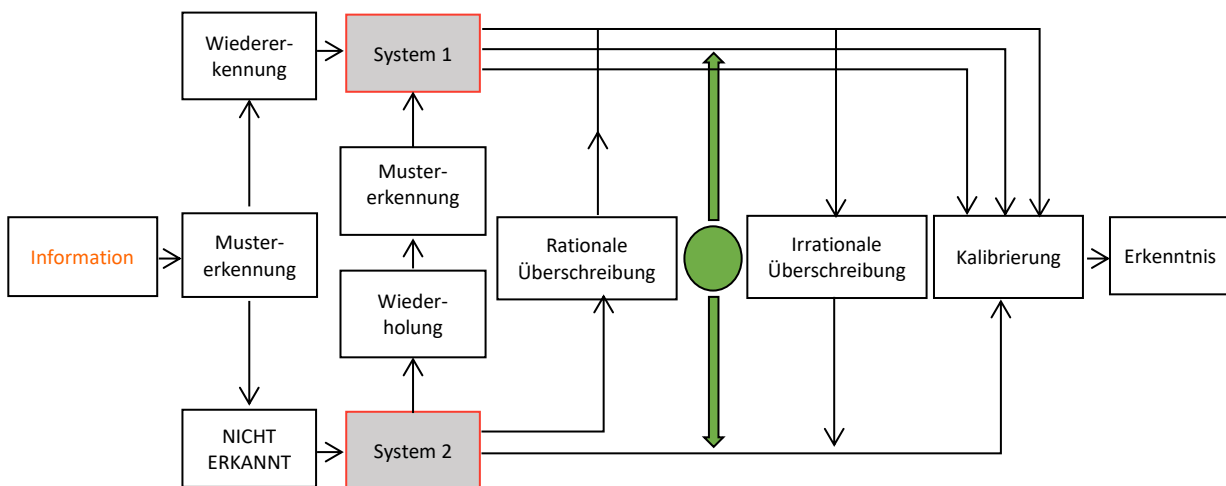


Abbildung 27. Prozessmodell des universellen diagnostischen Schlussfolgerns (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Croskerry et al. 2013, S. 60 und Croskerry 2009, S. 175)

System 2 ist das kognitiv anspruchsvollere, wissenschaftlich-analytische System. Dieses System tritt in Aktion, wenn die Daten nicht direkt interpretiert werden können. Die Nutzung der durch System 2 gesteuerten analytischen Schlussfolgerungsprozesse erfordert allerdings Vorwissen über geeignete Schlussfolgerungsstrategien (vgl. Croskerry 2009, Croskerry et al. 2013).

Die beiden Systeme können einander überschreiben: Je nach Ausgangsvoraussetzung der Problemlöserin*innen (Müdigkeit, Motivation, Konzentration etc.) kann es zu *Überschreibungen* von System 2 durch System 1 (*irrationale Überschreibung*) oder, z. B. im Fall von offensichtlichen Widersprüchen zwischen Daten und Interpretation, zu einer Überschreibung von System 1 durch System 2

(*rationale Überschreibung*) kommen. Ebenso kann eine *wiederholte Prozessierung* vergleichbarer Informationen mittels System 2 dazu führen, dass auch nachfolgende, perzeptuell ähnliche Informationen automatisiert mittels System 1 prozessiert werden (vgl. Croskerry 2009; siehe dazu auch Bransford et al. 2000). Die zuvor beschriebenen theoretischen Ausführungen lassen sich wie folgt auf das Diagrammverstehen: Ist Diagrammleserin*innen das Diagramm unbekannt, handelt es sich um ein echtes Problem (vgl. z. B. Funke 2003). Ein solches Diagramm muss dann aufwendig mittels System 2 analytisch erschlossen werden. Denken Problemlöserin*innen bzw. Diagrammleserin*innen, dass ihnen das Diagramm oder die vermeintlich referierten Inhalte bekannt seien – und irren dabei –, so kommt es trotzdem zwar zu einer schnellen, dafür aber fehlerhaften Problemlösung mittels System 1. Letzteres könnte die im vorausgegangenen Abschnitt (4.3.2.2) beschriebene vorstellungsbildliche Distraction sowie den Leitmotiv-Bias erklären.

Die von Croskerry (2009) beschriebene irrationale Überschreibung des analytischen Systems 2 durch das intuitive System 1 wurde in vergleichbarer Art und Weise in Hinblick auf die Informationsentnahme aus Diagrammen und Tabellen in verschiedenen Studien analysiert. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden zur *Cognitive-Fit-Theorie* (kurz: CFT) synthetisiert (vgl. Vessey 1991; Vessey 1994; Vessey & Galletta 1991; Sinha & Vessey 1992; Shaft & Vessey 2006; zu ähnlichen Annahmen siehe Jarvenpaa 1989). Die Cognitive-Fit-Theorie besagt, dass Problemlöserin*innen bei einer als zu hoch empfundenen kognitiven Belastung (bewusst oder unbewusst) von einer analytischen Problemlösestrategie zu einer kognitiv weniger anspruchsvollen, oberflächlicheren, vornehmlich perzeptuellen Problemlösestrategie wechseln (vgl. insbesondere Speier 2006; Vessey 2006; Bassler 2010; siehe dazu auch Chi et al. 1981; Chi, Glaser & Rees 1982). Vor dem Hintergrund der Ausführungen zum universellen diagnostischen Schlussfolgern, zur Cognitive-Fit-Theorie (CFT) und zur Cognitive-Load-Theorie (CLT) (siehe Abschnitt 3.8.3) lässt sich vermuten, dass Lernende beim Analysieren von Diagrammen insbesondere dann – im Sinne einer irrationalen Überschreibung – analytische Schlussfolgerungsprozesse (System 2) durch intuitive, perzeptuell-induktive Schlussfolgerungsprozesse (System 1) ersetzen, wenn sie kognitiv überfordert werden (Cognitive Overload, vgl. Mayer & Moreno 2003). Der beschriebene Zusammenhang ist in Abbildung 28 dargestellt.

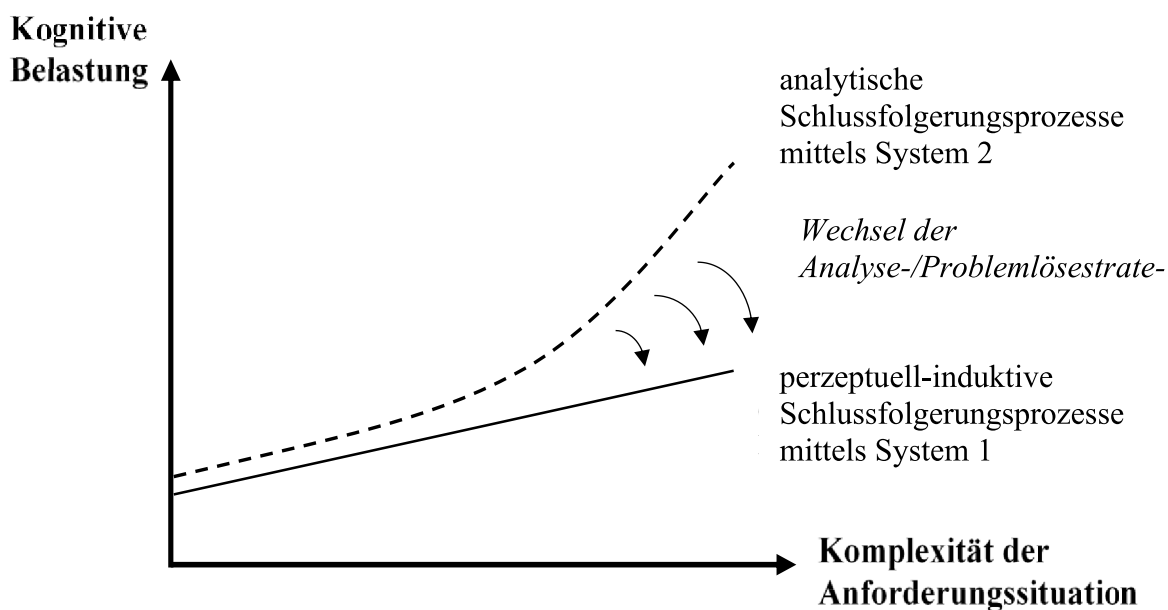


Abbildung 28. Zusammenhang zwischen kognitiver Belastung und Komplexität der Anforderungssituation bei Anwendung unterschiedlicher Problemlösestrategien (modifiziert durch den Verfasser nach Bassler 2010, S. 73)

Es ist daher anzunehmen, dass Lernende, die beim Analysieren eines Diagramms kognitiv überfordert werden, anstatt auf Grundlage des dargebotenen Diagramms eine vergleichsweise tiefe und korrekte Problemrepräsentation im Situationsraum zu konstruieren, eine eher ungeeignete, oberflächliche Problemrepräsentation im Graphenraum konstruieren. Entsprechende Lernende könnten dazu tendieren, das Diagramm zu beschreiben, anstatt es zu interpretieren, einen ungeeigneten Situationsraum zu konstruieren (Missinterpretation) oder induktiv, vorwärtsgerichtet Schlussfolgerungen aus der grafischen Darstellung abzuleiten, anstatt die in dem Diagramm referierten Inhalte rückwärtsgerichtet unter Einbindung von kausal-erklärendem Vorwissen mental zu (re-)konstruieren (siehe dazu auch Abschnitt 3.6). Die kognitive Belastung von Lernenden, die sie beim Analysieren eines Diagrammes empfinden, hat folglich – mediiert über die Wahl der Problemlösestrategie – einen erheblichen Einfluss auf das Diagrammverstehen.

4.4. Prozessorientierte Perspektive

Die bisherigen theoretischen Ausführungen fokussierten insbesondere auf die Modellierung einfacher Tätigkeiten beim Diagrammverstehen, auf die Beschreibung der Kompetenzen von Lernenden und auf die (kognitionspsychologische) Analyse spezifischer Probleme. Im Folgenden wird insbesondere der Interpretationsprozess an sich stärker in den Fokus der Analyse gerückt. Dazu erfolgt zunächst eine Einführung in das semiotische Diagrammverstehen (siehe Abschnitt

4.4.1). Darauf aufbauend werden verschiedene empirische Studien vorgestellt, in denen analysiert wurde, wie Lernende auf der Grundlage von Diagrammen Bedeutung konstruieren (siehe Abschnitt 4.4.2).

4.4.1. Diagrammverstehen als semiotischer Prozess

4.4.1.1 Einführung in das semiotische Diagrammverstehen

Semiose wird im Kontext des Diagrammverstehens als ein triadischer Interpretationsprozess der Identifikation relevanter Zeichen (z. B. Graphen in einem Diagramm) und des Herstellens einer Beziehung zwischen Zeichen und Referenten durch Elaboration eines Interpretanten – dem Produkt des Interpretationsprozesses – verstanden (vgl. z. B. Roth 2003). Das Diagramm (inklusive seiner einzelnen Elemente) ist somit als *Zeichen* bzw. als Summe einzelner Zeichen zu verstehen, das einen Zusammenhang zwischen *Referenten*, den grafisch referierten Inhalten, zusammenfasst und so den interpretativen Zugang zu den Referenten mediiert (siehe Abbildung 29).

Das Produkt der Interpretation des Diagramms ist der *Interpretant*. Interpretanten sind verbale oder bildliche Interpretationen oder Erläuterungen (selten Erklärungen), die unter Berücksichtigung von Konventionen auf der Grundlage der Zeichen konstruiert werden (vgl. Roth & Bowen 2003). Sie können als Produkte der Interpretation der Beziehung zwischen Zeichen und Referenten zugleich im weiteren Interpretationsprozess als neue Zeichen fungieren (siehe dazu insbesondere Abschnitt 4.4.1.3.2).

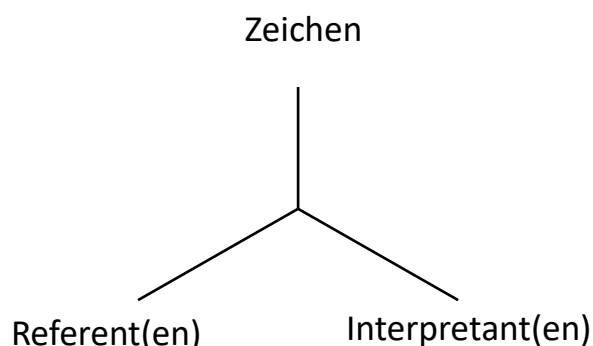


Abbildung 29. Semiotische Triade nach Charles Sanders Peirce (1839-1914) (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Seeger 2005, S. 72)

Der Interpretant steht somit mit dem oder den Referenten in Verbindung, ist allerdings nie endgültig deckungsgleich mit diesem, weil in die Konstruktion des Interpretanten immer auch Vorwissen und subjektive Wahrnehmung der/des Interpretierenden einfließen. Entsprechend kann der Interpretant auch nur dann

sinnvoll konstruiert werden, wenn bereits eine grundlegende Vorstellung des Referenten im Kopf der Diagrammleser*innen existiert (vgl. Seeger 2005; Roth & Bowen 2001).

Es sei insbesondere darauf hingewiesen, dass der Interpretationsprozess in semiotische Ausführungen zum Diagrammverstehen vornehmlich als (sozial-)konstruktivistischer Prozess⁵⁵ betrachtet wird. Die im vorherigen Kapitel intensiv thematisierten kognitionspsychologischen Aspekte treten dabei in den Hintergrund. So führen Roth und McGinn (1998) beispielsweise aus: „the social practices of inscription users came into focus, and individual mental activity was de-emphasized“ (ebd., S. 35). Nach Roth (2002) biete ein solcher (sozial-)konstruktivistischer Ansatz „a more viable account not only of individual experiences, familiarity and socio-cultural factors during graph reading, but also of errors committed by students and ‘experts’ alike“ (ebd., S. 1). Ferner kritisieren⁵⁶ die Autoren explizit, dass kognitionswissenschaftliche Arbeiten, wie die, die in Abschnitt 4.3.1 beschrieben wurden, sich vornehmlich auf (kognitive) Defizite der Lernenden konzentrieren würden (vgl. Roth et al. 1999, Roth 2002, Roth & McGinn 1997, 1998): „research in this tradition focuses on what students *cannot* do“ (Roth & McGinn 1997, S. 93). Roth et al. (1999) argumentieren daher:

„Cognitive research on graphing has proven useful to some extent, but it does not take into account the relationship between people and their settings and practices [some authors]. It also fails to consider graphing in relation to individuals’ motives, goals of the graphing activity, and operations involved in graphing. Traditional and cognitively oriented studies have a disciplinary blind spot that makes them overlook the social, political, and rhetorical nature of graphs [...] we focus [in a semiotic sense] on those aspects of graphing that constitute the blind spots of cognitive research on the topic“ (Roth et al. 1999, S. 979).

⁵⁵ Die soziale Komponente des semiotischen Prozesses sehen die genannten Autor*innen insbesondere in der kommunikativen Funktion grafischer Darstellungen und dem (indirekten) Kommunikationsprozess zwischen Diagrammkonstruent*innen und Informationsempfänger*innen (vgl. z. B. Roth & McGinn 1998). In Abschnitt 3.1 wurde dies als pragmatische Ebene von Diagrammen beschrieben (vgl. Kosslyn 1989). Im Unterricht erlangt dieser Prozess häufig durch die Lehrkraft und die Diskussion im Klassenraum eine weitere soziale Komponente (vgl. z. B. Roth & McGinn 1998).

⁵⁶ Kritische Anmerkungen zu kognitionswissenschaftlichen Ansätzen sollten nicht despektierlich verstanden werden. Es sei angemerkt, dass der Autor Wolff-Michael Roth selbst seit 1997 Professor für Angewandte Kognitionswissenschaften an der University of Victoria ist.

Ogleich sich Roth & Kollegen von einzelnen kognitionspsychologischen Ansätzen distanzieren, beziehen sie beispielsweise das in Abschnitt 3.7 beschriebene Translationskonzept aus der kognitionspsychologisch geprägten Arbeit von Leinhardt et al. 1990 aktiv in ihre Überlegungen ein (Roth & McGinn 1997). Das Translationskonzept erweist sich somit als theoretischer Ansatz, der geeignet erscheint, verschiedene Forschungsrichtungen und -perspektiven miteinander zu vereinen.

4.4.1.2 Semiose und hypostatische Abstraktion

Neben dem Translationskonzept wird in semiotischen Arbeiten zur theoretischen Fundierung des Diagrammverstehens häufig auf Ausführungen von Eco (z. B. 1976), Ricœur (z. B. 1991), Vygotsky (z. B. 1980) und Peirce (z. B. 1931) Bezug genommen (vgl. z. B. Roth & McGinn 1997; Roth, Bowen & McGinn 1999; Roth & Barton 2004; Roth 2002; Roth & Bowen 2001; Roth et al. 2005; Arteaga & Batanero 2011; Radford 2009; Hoffmann 1999; Hoffmann & Roth 2005, 2007; Roth & Bowen 2001, 2003; Bakker & Hoffmann 2005; Mariotti 2009).

Nach Eco (1976) besitzen Zeichen beispielsweise immer dann eine semiotische Funktion, wenn das Zeichen und der durch das Zeichen repräsentierte Referent in einem korrelativen Zusammenhang stehen (vgl. ebd.). Liniendiagramme entsprechen in besonderem Maße einer solchen Beziehung. Sie fassen den Referenten im Sinne einer Analogiebeziehung reduktiv-organisierend in Form von Zeichen zusammen (siehe Abschnitt 3.1).

Die *hypostatische Abstraktion* nach Peirce ist ein möglicher zeichentheoretischer Ansatz, mit dem sich die Entfaltung der in Liniendiagrammen reduktiv-organisierten Inhalte systematisch analysieren lässt (vgl. z. B. Hoffmann 2005; Bakker 2007; Bakker & Hoffmann 2005). Die hypostatische Abstraktion beschreibt, dass bei der Interpretation eines Diagramms den einzelnen Diagrammelementen in einem Elaborationsprozess sukzessive Bedeutung beigemessen wird. Die Konstruktion von Bedeutung ist dabei theoretisch bis ins Unendliche möglich, da prinzipiell jedes Merkmal des Diagramms (z. B. die Steigung eines Graphen) und damit letztendlich auch jedes Merkmal der referierten inhaltlichen Situation wieder Objekt eines nachfolgenden Erkenntnisprozesses werden kann (vgl. Hoffmann 2005; Bakker 2007; Bakker & Hoffmann 2005).

Bakker und Hoffmann (2005) erläutern dies, basierend auf Peirce, anschaulich anhand der Aussage *Honig ist süß*, die durch Abstraktion in die Aussage *Honig*

besitzt Süße transformiert werden kann. Das Attribut *Süße* wird dadurch zu einem eigenen (abstrakten) Objekt des Erkenntnisinteresses, das mittels weiterer interpretativer Schlussfolgerungen ergründet werden kann (vgl. ebd.):

„If we change ‘honey is sweet’ into ‘honey possesses sweetness’ (CP 4.235) and consider ‘sweetness’ as an object that we can talk about, we have a simple example of hypostatic abstraction. In the first sentence, ‘sweet’ is a predicate of something, but in the second sentence, ‘sweetness’ is considered as an object in itself“ (Peirce, CP 5.534, zitiert nach Bakker & Hoffmann 2005, S. 342).

Die Relevanz der hypostatischen Abstraktion für das Interpretieren von Zeichen fasst Pape (2004) wie folgt zusammen: „Die hypostatische Abstraktion ist nicht ein unverzichtbares Instrument des Denkens – sie ist die einzige Operation, die interpretierendes Denken ermöglicht“ (ebd., S. 27).

Die oberflächlichen bildlichen bzw. perzeptuellen Diagrammbeschreibungen, die Lernende beispielsweise in der Untersuchung von Swatton und Taylor (1994) gezeigt haben (siehe Abschnitt 4.2.3.1), können mithilfe der hypostatischen Abstraktion analysiert werden. So erkennen Lernende zwar beim Interpretieren von Liniendiagrammen perzeptuell, wenn eine Linie bzw. ein Graph seine Steigung verändert; Lernende, denen die hypostatische Abstraktion misslingt, können die perzeptuelle Informationen aber lediglich in die Proposition transformieren, dass der Graph seinen Verlauf verändert (vgl. dazu insbesondere Moore & Thompson 2015). Die Verlauf der Graphen wird für solche Lernende nicht zu einem eigenen Objekt des Erkenntnisinteresses, sondern verbleibt – wie im Fall des süßen Honigs – als eine Eigenschaft des Graphen (vgl. Moore & Thompson 2015; Roth & Bowen 1999a,b; Swatton & Taylor 1994; Preece & Janvier 1992, 1993).

Aus semiotischer Perspektive gilt ein Diagramm folglich dann als verstanden, wenn es den jeweiligen Leser*innen gelingt, aufbauend auf einer Vielzahl an Abstraktions- und Elaborationsschritten, die grafischen Elemente des Diagramms so mit den inhaltlichen Referenten in Verbindung bzw. in Übereinstimmung zu bringen, dass sie durch die Zeichen unmittelbar auf die Referenten schließen können (siehe dazu insbesondere Ausführungen zur Translation in Abschnitt 3.7). Ainley (2000) nutzt zur Beschreibung dieses Zustands das auf Lave und Wenger (1991) basierende Konzept der *Transparenz* und erklärt dies anschaulich mithilfe der Metapher eines *Fensters*. Sie führt aus, dass ein Diagramm für Diagrammleser*innen dann *transparent* (geworden) sei, wenn es ihnen möglich ist, dem Diagramm explizit dargestellte Informationen zu entnehmen, und

sie sich gleichzeitig auf Grundlage der implizit und explizit gegebenen Informationen die repräsentierte inhaltliche Situation ohne zusätzliche Anstrengung mental vorstellen können (vgl. Ainley 2000):

„Transparency is illustrated by the metaphor of a window, which is both invisible as we look at the view beyond it, and highly visible in contrast to the wall that contains it. In the same way, a graph may be considered as transparent for a particular user if it is both visible to inspection for extracting detailed information, and invisible in giving access to features of the phenomenon it represents“ (ebd., S. 366).

Roth und Kollegen (vgl. z. B. Roth 2002; Roth et al. 2005; Roth 2003; Roth & Bowen 2003; Hoffmann & Roth 2007) berichten von Interviewstudien, in denen Proband*innen eine Situation bzw. einen Sachverhalt auf der Grundlage eines ‚transparenten‘ Diagramms so beschrieben haben, als würde er sich direkt vor ihnen abspielen beziehungsweise als ob Diagramm und zugehöriger Inhalt (Referent) identisch wären (vgl. ebd.). Auch sie nutzen die Metapher eines Fensters:

„Individuals look at graphs and, without hesitation, see in each wiggle - or change in height, change in slope, width of a peak, and so on - a corresponding state in the world. In fact, it is overstated to say that these individuals `see [something] in` a sign. Often, the scientists, engineers and technicians in my studies did not even point to specific features of a graph; they simply described a situation and expected listeners to see in the graph what they talked about. Familiar graphs provided them with a transparent window onto a familiar world, in the same way that a paragraph about portables, schoolyards, trustees and finances provided a look at a familiar school-related world“ (Roth 2002, S. 4).

Dabei ist den Leser*innen grundsätzlich bewusst, dass es sich hier (lediglich) um eine Korrespondenzbeziehung zwischen Zeichen und Inhalt handelt. Zu einer expliziten Thematisierung bzw. einer aktiven Reflexion dieser Korrespondenzbeziehung kommt es aber erst dann, wenn das Zeichen nicht direkt interpretiert werden kann oder die im Rahmen der Interpretation konstruierte Beziehung zwischen Zeichen und Referent fragwürdig erscheint (vgl. Nemirovsky 2005; Roth 2002; zur Unterscheidung zwischen intuitiven und analytischen Strategien siehe Abschnitt 4.3.2.3). Bezugnehmend auf Meira (1998) betont Ainley (2000) daher

auch, dass die Transparenz⁵⁷ von Diagrammen keine den Diagrammen inhärente Eigenschaft sei, sondern kontextspezifisch und häufig auch erst durch intensive Auseinandersetzungen mit dem Diagramm aktiv konstruiert werden müsse. Die in Abschnitt 3.7 beschriebenen Translationsprozesse scheinen dazu von besonderer Relevanz zu sein.

4.4.1.3 Modell des semiotischen Diagrammlesens

Roth & Kollegen (Roth & Bowen 2001, 2003; Roth, Bowen & Masciotra 2002) erweitern die in Abschnitt 4.4.1.1 beschriebene semiotische Triade, aufbauend auf zahlreichen empirischen Untersuchungen, die sie insbesondere an Liniendiagrammen durchgeführt haben, zu einem *zweistufigen, semiotischen Prozessmodell des Diagrammlesens*. Obgleich die Autoren hier den Begriff „lesen“ (*reading*) verwenden, entsprechen ihre Ausführungen eher dem deutschen ‚interpretieren‘ (vgl. Roth & Bowen 2001; siehe Abschnitt 3.4.2)⁵⁸.

Den Interpretationsprozess teilen sie in einen *Strukturierungs-* und einen *Grounding-Prozess* ein (siehe Abbildung 30). In dem *Strukturierungsprozess* werden *Zeichen* gebildet (oberes Dreieck), die dann im *Groundingprozess* (unteres Dreieck) – von Roth & Bowen (1999a) als eigentliche Semiose bezeichnet – interpretiert werden können.

Die Interpretation der Zeichen im Groundingprozess erfolgt im *Kontext* der jeweils anderen Diagrammelemente bzw. Zeichen, der zuvor konstruierten Interpretanten (die dann als Zeichen fungieren) oder ganz allgemein vor dem Hintergrund weiterer Informationen. Diese potenziellen Konstituenten beeinflussen und formen die Interpretation der Zeichen. Das Produkt des Groundingprozesses sind neue mentale oder externalisierte Zeichen, die als *Interpretanten* bezeichnet

⁵⁷ Nemirovsky (2005) spricht hier von einem facettenreichen, sich sukzessive entwickelnden Prozess der „Fusion“ (ebd., S. 58 vgl. dazu auch Nemirovsky & Monk 2000; Nemirovsky et al. 1998). Fusion definieren Nemirovsky et al. (1998) als „merging qualities of symbols with qualities of the signified events situations, that is, talking, gesturing, and envisioning in ways that do not distinguish between symbols and referents“ (ebd., S. 141). Das Produkt dieser Fusion entspricht somit dem von anderen Autoren (vgl. Ainley 2000, Roth 2002) als Transparenz bezeichneten Zustand.

⁵⁸ Roth & Bowen (2001) rekurren hier beispielsweise explizit auf Leinhardt et al. (1990) und formulieren: „The activity of reading graphs has traditionally been framed as interpretation, which is taken to be the ‘action by which a student makes sense or gains meaning from a graph (or portion of a graph)’ (Leinhardt et al., 1990, p. 8)“ (Roth & Bowen 2001, S. 161).

werden (siehe Abschnitt 4.4.1.1). Die Beziehung zwischen den durch Strukturierung gebildeten Zeichen und den durch Grounding gebildeten Interpretanten entspricht in den Grundzügen der Relation zwischen den Zeichen und den Referenten. Der potenziell unendliche Interpretationsraum wird dabei lediglich durch die (*Diagramm-*)*Konventionen* und das Vorwissen eingeschränkt. Wesentlich ist beim semiotischen Modell des Diagrammlesens, dass es sich sowohl beim Strukturieren als auch beim Grounding um dialektische Prozesse handelt. So kann einerseits der Referent ausgehend von dem Zeichen erschlossen werden ebenso wie andererseits das Zeichen ausgehend vom Referenten erschlossen werden kann (vgl. insbesondere Roth et al. 2002). Da die hier nur kurz angedeuteten Prozesse *Strukturierung* und *Grounding* für diese Arbeit von hoher Relevanz sind, werden sie im Folgenden ausführlicher beschrieben.

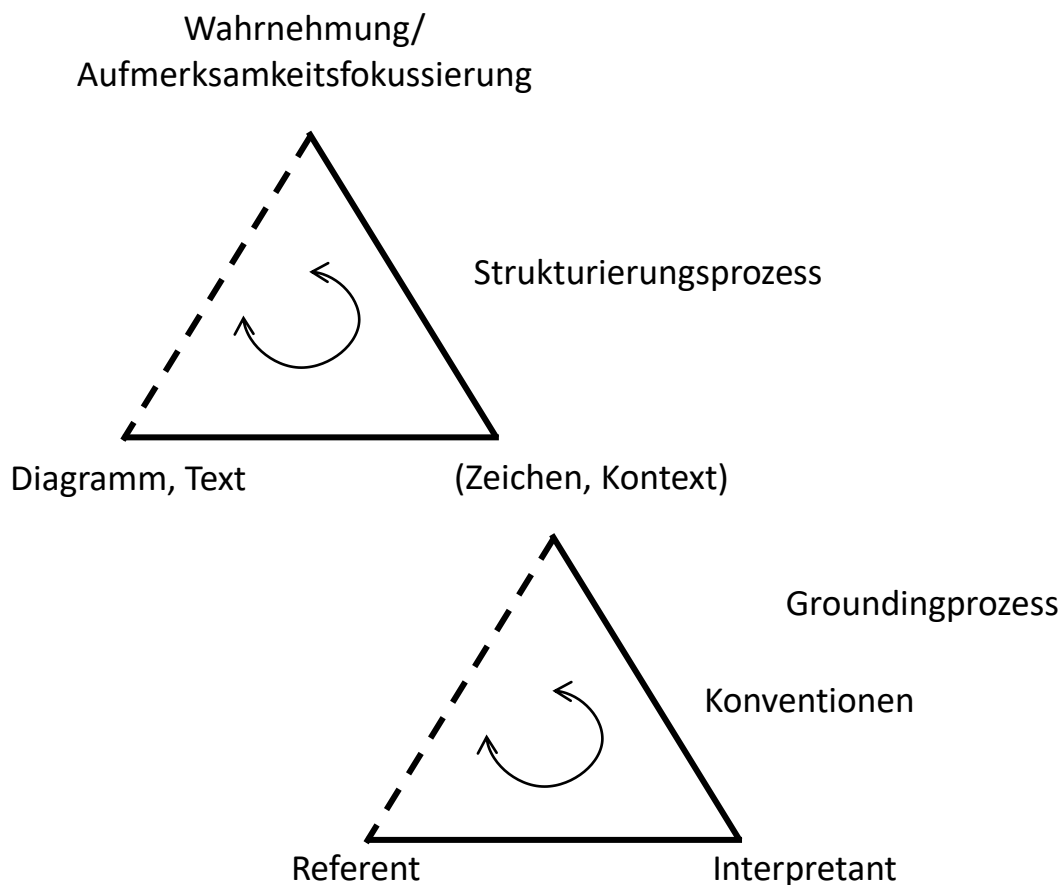


Abbildung 30. Semiotisches Modell des Interpretierens von Diagrammen (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Roth et al. 2002, S. 333; siehe dazu auch Roth & Bowen 2001, 2003)

4.4.1.3.1. Strukturierungsprozess

Im *Strukturierungsprozess* werden die relevanten Zeichen eines Diagramms von den Diagrammler*innen ‚entdeckt‘. Dabei konstruieren sie durch aktives Strukturieren aus den geometrischen Figuren des Diagramms potenziell bedeutsame Zeichen (vgl. insbesondere Roth & Bowen 2001, 2003; Roth et al. 2002). Beim Strukturieren beginnen die Leser*innen folglich, sich von der grafischen Darstellung zu lösen. Dazu müssen sie die für diesen Problemlöseprozess notwendigen Informationen selbstständig selektieren und abstrahieren (vgl. Roth & Bowen 2001, 2003; zur Relevanz von Abstraktionsprozessen siehe auch Guthrie et al. 1993; Stefanelli & Ramoni 1992; Ramoni et al. 1992; Janvier 1981 sowie Abschnitt 4.4.1.2).

Expert*innen setzen zur Strukturierung bzw. zur Abstraktion inhaltliches, strategisches und diagrammspezifisches Vorwissen ein. So berichten Roth und Kollegen zum Beispiel von Expert*innen, die ein Diagramm mittels Lesestrategien in Abschnitte einteilen⁵⁹ (vgl. Roth et al. 2005; Hoffmann & Roth 2005; Roth 2003, Roth 2011; siehe Abschnitt 4.4.2.1.1).⁶⁰

Der Prozess der Strukturierung und damit die Konstruktion der Zeichen ist außerordentlich subjektiv und hängt stark vom Vorwissen der Leser*innen bzw. deren Fähigkeiten ab, sich die referierte Situation mental vorstellen zu können:

„Even among scientists there is variation in how they perceptually structure a graphical display, and therefore what they read into the graph. Furthermore, the processes are interconnected so that the structuring of a graph is influenced by the reader’s familiarity with biological situations and vice versa“ (Roth et al. 2005, S. 18).

Roth (2002) betont sogar, dass der Strukturierungsprozess derart subjektiv ist, dass sogar Unterschiede innerhalb von Individuen auftreten können. Ein und dieselbe Person kann – unter ansonsten gleichen Bedingungen – dasselbe Diagramm zu unterschiedlichen Zeitpunkten unterschiedlich interpretieren (vgl. ebd.). Zudem sei darauf hingewiesen, dass sich Strukturierungs- und Groundingprozesse nicht trennscharf voneinander abgrenzen lassen. So konnten Roth und Bowen

⁵⁹ Die Strukturierung besitzt in dieser Hinsicht Parallelen zum kognitionswissenschaftlichen Konzept des Chunkings. Zu einer Diskussion von Ähnlichkeiten und Unterschieden dieser beiden Konzepte sei auf Abschnitt 5.3.2 verwiesen.

⁶⁰ Weitere Aktivitäten mit dem Ziel der Zeichenbildung sind zum Beispiel Hervorhebungen, Unterstreichungen und Zusammenfassungen (vgl. Roth et al. 2005).

(2003) anhand von Interviewstudien (siehe zu einer ausführlichen Analyse Abschnitt 4.4.2.1) beispielsweise zeigen, dass Leser*innen bereits während der Strukturierung testen, ob das, was sie als Zeichen identifiziert haben, tatsächlich eine sinnvolle inhaltliche Bedeutung haben kann. Immer dann, wenn die Interpretation für sie unzufriedenstellend ist, überdenken sie bereits konstruierte Zeichen und stoßen neue Strukturierungsprozesse an (vgl. ebd.).

4.4.1.3.2. Groundingprozess

Im *Groundingprozess* findet die eigentliche Übersetzung der durch Strukturierung gebildeten Zeichen in Interpretanten statt. Es finden sich Hinweise dafür, dass die im Strukturierungsprozess gebildeten Zeichen dabei sequenziell verarbeitet werden (vgl. Carpenter & Shah 1998; Shah et al. 2005; Katz et al. 2002). Ein zu Beginn des Groundingprozesses neu konstruierter Interpretant kann in nachfolgenden Interpretationsprozessen entweder selbst als neues Zeichen fungieren, das weiter interpretiert wird, oder als konstituierendes Zeichen beziehungsweise als epistemisches Werkzeug, das die Interpretation eines anderen Zeichens beeinflusst oder erst ermöglicht (vgl. Roth 2005, 2014; Hoffmann & Roth 2005, 2007; Seeger 2005; Vygotsky 1980). Die Diagramminterpretation endet folglich nicht mit der Produktion eines einzelnen, bestimmten Interpretanten, sondern es kommt im Sinne der hypostatischen Abstraktion (siehe Abschnitt 4.4.1.2) zu einer Verschiebung bzw. kontextgebundenen Fortpflanzung der semiotischen Triade (siehe Abbildung 31). Letztendlich entsteht so ein *Interpretationsnetzwerk*⁶¹, das lediglich durch Diagrammkonvention in seiner potenziellen Unendlichkeit eingeschränkt wird (vgl. Roth & Bowen 2001; Roth et al. 2002, 2005; Seeger 2005; Bakker & Hoffmann 2005).

Roth & Bowen (2001) bezeichnen die Interpretation daher als „unlimited process“ (ebd., S. 164) bzw. „unlimited semiosis“ (ebd., S. 164) und betonen in Hinblick auf Diagramme: „The meaningfulness of graphs arises out of these multifarious connections to a network of familiar sign relations“ (ebd., S. 182). Ähn-

⁶¹ Seeger (2005) spricht in diesem Zusammenhang von einer rhizomartigen Struktur (ebd., S. 73).

lich wie im Fall der Beziehung zwischen Strukturierungs- und Groundingprozessen ist auch das Interpretationsnetzwerk dialektischer Natur⁶² (vgl. Roth & Bowen 1999, 2001, 2003). Während Leser*innen die durch die Zeichen referierte Situation auf Grundlage des Diagramms bzw. der Zeichen rekonstruieren, reduzieren sie gleichzeitig die rekonstruierte Situation in Zeichen. Roth & Bowen (2001) führen diesbezüglich – mit starken Parallelen zu den Ausführungen von Janvier (1978) in Abschnitt 3.7.1 – aus: „In the dialectic production of these types of statements as reading unfolds, individuals reify both sign and referent and thereby disclose meaning and unfold understanding“ (Roth & Bowen 2001, S. 164).

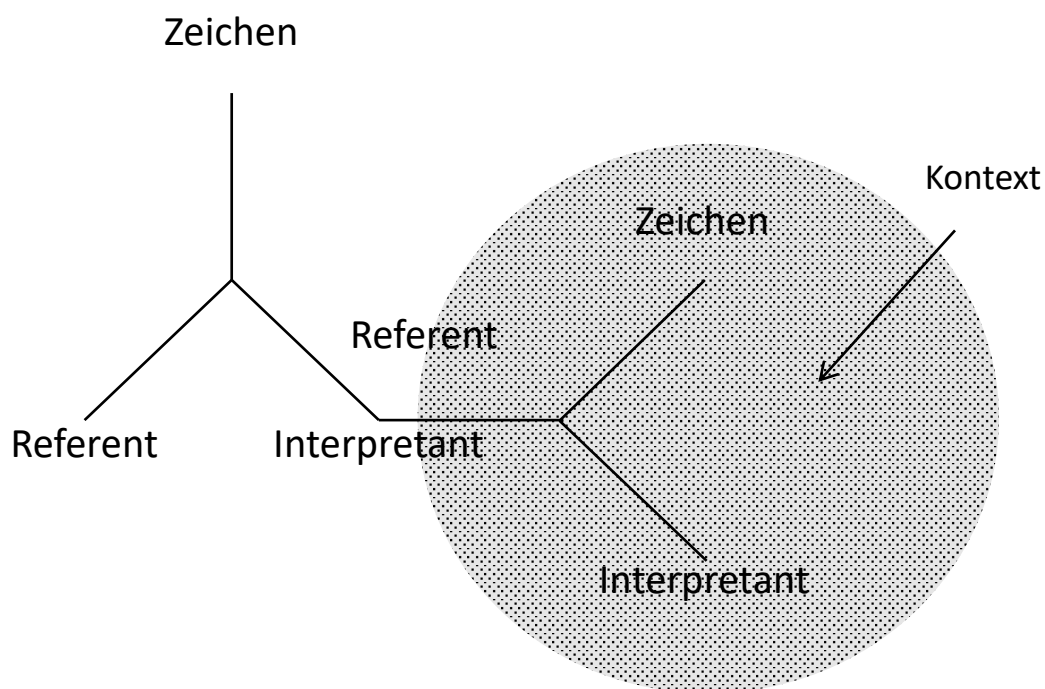


Abbildung 31. Netzwerk aus semiotischen Triaden (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Seeger 2005, S. 72)

Ogleich die Autoren (vgl. insbesondere Roth & Bowen 1999b, 2001, 2003; Roth et al. 2005) die dialektische Beziehung zwischen Zeichen und Referenten herausstellen, steht im Fokus semiotischer Ausführungen zum Diagrammverstehen insbesondere der Prozess der Interpretation vom Zeichen zum Referenten.

⁶² Die dialektische Natur ist nach Roth et al. (2005) deshalb von besonderer Bedeutung, da nach Meinung der Autoren semiotische Forschungsarbeiten häufig nur auf Verstehensprozesse fokussieren würden, bei denen vom Zeichen zum Referenten gewechselt wird. Roth und Kollegen berücksichtigen hier aber sowohl die Beziehung vom Zeichen zum Referenten als auch vom Referenten zum Zeichen. Erst durch diesen dialektischen Prozess kommt es zur Konstruktion von Kohärenz (vgl. ebd).

Auch Roth et al. 2005 merken an, dass für die semiotische Forschung im Allgemeinen gelte: „Semiotic research generally considers only sign-to-referent interpretative processes” (ebd., S. 4.). Studien, die darüber hinaus auch auf die Translation von der mental konstruierten Situation zum grafischen Zeichen konzentrieren (damit ist nicht die mechanische Konstruktion von Diagrammen gemeint!), konnten im Rahmen der hier durchgeführten Literaturanalyse – abgesehen von den Arbeiten von Roth & Kollegen – nicht identifiziert werden.

4.4.2. Exemplarische Studien zum Vorgehen beim Interpretieren

Bisher wurden die semiotischen Prozesse, insbesondere das Strukturieren und das Grounding, nur theoretisch beschrieben. Im Folgenden werden empirische Studien präsentiert und vor dem Hintergrund der beschriebenen semiotischen Ausführungen analysiert. Fokussiert wird insbesondere darauf, wie Noviz*innen und Expert*innen beim Interpretieren von Diagrammen vorgehen (Abschnitt 4.4.2.1) und welchen Einfluss das domänen- und diagrammspezifische Vorwissen auf die jeweiligen Interpretationsprozesse haben kann (Abschnitt 4.4.2.2).

4.4.2.1 Ausgewählte Studien zum Vorgehen von Expert*innen und Noviz*innen

4.4.2.1.1. Noviz*innen vs. Expert*innen

Roth und Kollegen (vgl. Roth & Bowen 1999a, b, 2001, 2003; Roth 2003, 2012, 2014; Bowen, Roth & McGinn 1999) untersuchten wie Noviz*innen (High-School- oder College-Studierende) und Expert*innen (Fachwissenschaftler*innen aus den Bereichen Biologie und Physik) bei der Interpretation naturwissenschaftlicher Diagramme vorgehen. Zu den Fachwissenschaftler*innen gehörten Professor*innen, Postdocs und Promotionsstudierende mit zum Teil langer Berufs- und Lehrerfahrung. Die Diagramme, die in den Untersuchungen verwendet wurden, stammten aus Universitätslehrwerken für Einführungsvorlesungen in die Themenbereiche Ökologie und Physik. Die Autor*innen nutzten die in Abschnitt 4.4.1 beschriebenen semiotischen Ansätze, um das Verhalten der Diagrammleser*innen zu analysieren.

Die Noviz*innen waren in ihren Untersuchungen nur selten in der Lage, inhaltliche Schlussfolgerungen aufzustellen. Stattdessen konzentrierten sie auf perzept-

tuell auffällige Elemente der Diagramme: „Students' readings of graphs were literal and, in this way, referentially isolated from anything that these graphs could stand for“ (Roth & Bowen 1999b, S. 193; siehe dazu auch die Untersuchung von Swatton & Taylor 1994 in Abschnitt 4.2.3.1.3). Zudem zeigten die Noviz*innen Probleme mit mathematisch-abstrakten Konstrukten. Es fiel ihnen beispielsweise schwer, zwischen dem als Steigung implizit dargestellten Konstrukt Rate bzw. Wachstumsrate (Ableitung einer Funktion zur Zeit) und der abhängigen Variable auf der Y-Achse zu unterscheiden (vgl. Roth & Bowen 1999b, 2003; Roth 2003; Roth 2009; siehe Ausführungen zu Translationsräumen in Abschnitt 3.7.1). Die Autor*innen (vgl. z. B. Roth & Bowen 1999b, 2003; Roth 2003; Roth 2009) argumentieren, dass das größte Problem der Noviz*innen darin bestehe, dass ihnen das domänenspezifische Hintergrundwissen – und in einzelnen Fällen auch das Wissen über spezifische Konventionen – fehle, um die komplexen Diagramme fachlich korrekt zu interpretieren.

Expert*innen zeigten ebenfalls erhebliche Schwierigkeiten beim Lesen ihnen unbekannter Diagramme (vgl. Roth & Bowen 2003; Roth et al. 2005; Roth 2003, 2009; 2012). Ähnlich wie die Noviz*innen konnten auch einzelne Expert*innen die Diagramme nur oberflächlich beschreiben, fokussierten beim Ziehen von Schlussfolgerungen auf Aspekte, die nicht unbedingt Teil einer fachlich korrekten Interpretation waren, und machten sogar konkrete Fehler (vgl. Roth 2003, 2009, 2012; Roth & Bowen 2003; Roth et al. 2005): „[...] even highly trained individuals may find themselves in situations in which they get stuck in perceptually dissecting the graph without ever connecting it to some external referent“ (Roth et al. 2005, S. 15). Vergleichbares beobachteten auch Carpenter und Shah (1998): „College students and even graduate students with significant research experience can have a remarkably incomplete understanding of the functional relations in relatively simple line graphs“ (ebd., S. 75).

Im Kontrast zu der teils unzureichenden Leistung beim Interpretieren ihnen unbekannter Diagramme erwiesen sich die Expert*innen dagegen als sehr kompetent, wenn sie über ihnen vertraute Diagramme sprachen, die sie selbst auf Grundlage ihnen bekannter Daten konzipiert hatten oder die zumindest aus einer Domäne stammten, mit deren Inhalten sie intensiv vertraut waren (vgl. Roth & Bowen 2002; Roth 2003, 2009).

Aufbauend auf diesen und anderen Ergebnissen schlussfolgern die Autoren (vgl. Roth & Bowen 2002; Roth 2003, 2009), dass es sich bei der Kompetenz, Dia-

gramme zu interpretieren, nicht um eine bereichsübergreifende, kontextunabhängige, generelle oder kognitive Fähigkeit handelt, sondern um eine „highly contextual skill, requiring tremendous knowledgeability about the phenomenon, experimentation, data generation and transformation, and theoretical background“ (Roth 2009, S. 143).

Ogleich Roth und Kollegen die Kontextgebundenheit von Diagramminterpretationen und die Relevanz des Vorwissens betonen, finden sich in ihren Arbeiten auch Hinweise auf diagrammübergreifende, strategische Fähigkeiten, welche Leser*innen den Zugang zu Diagrammen erleichtern (vgl. Roth & Bowen 2003; Roth et al. 2012). So zeigte sich beispielsweise, dass universitäre Fachwissenschaftler*innen, die aufgrund ihrer Lehrtätigkeit viel Erfahrung im strategischen Vorgehen beim Interpretieren von Diagrammen hatten, verschiedene Diagramme mit biologischen Inhalten besser interpretieren konnten als Fachwissenschaftler*innen aus nicht-universitären, öffentlichen Bereichen. Diese verfügten – nach Meinung der Autor*innen – zwar über ein vergleichbar großes inhaltliches Vorwissen, hatten aber weniger Erfahrung mit der strategischen Planung ihrer Diagramminterpretation (vgl. Roth & Bowen 2003; Roth et al. 2012). Die Autor*innen vermuten daher, dass sich die Erfahrung der Universitätswissenschaftler*innen mit dem Interpretieren von Diagrammen insbesondere auf den *Strukturierungsprozess* auswirkt, der in dem semiotischen Modell des Diagrammlesens (siehe Abschnitt 4.4.1.3) den ersten Schritt beim Interpretieren eines Diagramms darstellt und damit die nachfolgende Interpretation vorbereitet und lenkt. In diesem Zusammenhang berichtet Roth (2003, 2011) beispielsweise über den Interpretationserfolg eines Biologieprofessors, der seine Analyse systematisch strukturierte, indem er das ihm vorliegende Diagramm durch Interaktion mit der Grafik (siehe Verstehensmodell von Hegarty 2011 in Abschnitt 3.8.2.4) in Abschnitte strukturierte und die Abschnitte nacheinander und in Relation zueinander interpretierte (vgl. Roth 2003, 2011).

4.4.2.1.2. Konventions-Noviz*innen vs. Konventions-Expert*innen

Die Studie von Maichle (1994) liefert weitere Einblicke in das Vorgehen von Noviz*innen und Expert*innen beim Interpretieren von Diagrammen. Maichle (1994) differenzierte Expert*innen und Noviz*innen bezüglich ihres diagrammspezifischen Vorwissens. Mithilfe des DaT-Tests (Diagrams and Tables-Test) – einem Test zur Messung der Fähigkeit, Diagramme und Tabellen lesen zu können – teilte Maichle (1994) ihre Stichprobe (N = 33) von Lernenden im Alter von

ca. 18 Jahren zunächst in leistungsstarke und leistungsschwache Diagrammleser*innen ein. Anschließend präsentierte sie den acht leistungsstärksten (Expert*innen) und -schwächsten (Noviz*innen) Diagrammleser*innen verschiedene Diagramme mit medizinisch-biologischen Inhalten (siehe Abbildung 32). In einem Zeitraum von 10 Minuten sollten die Lernenden so viele Aussagen wie möglich über die dargestellten Inhalte formulieren.

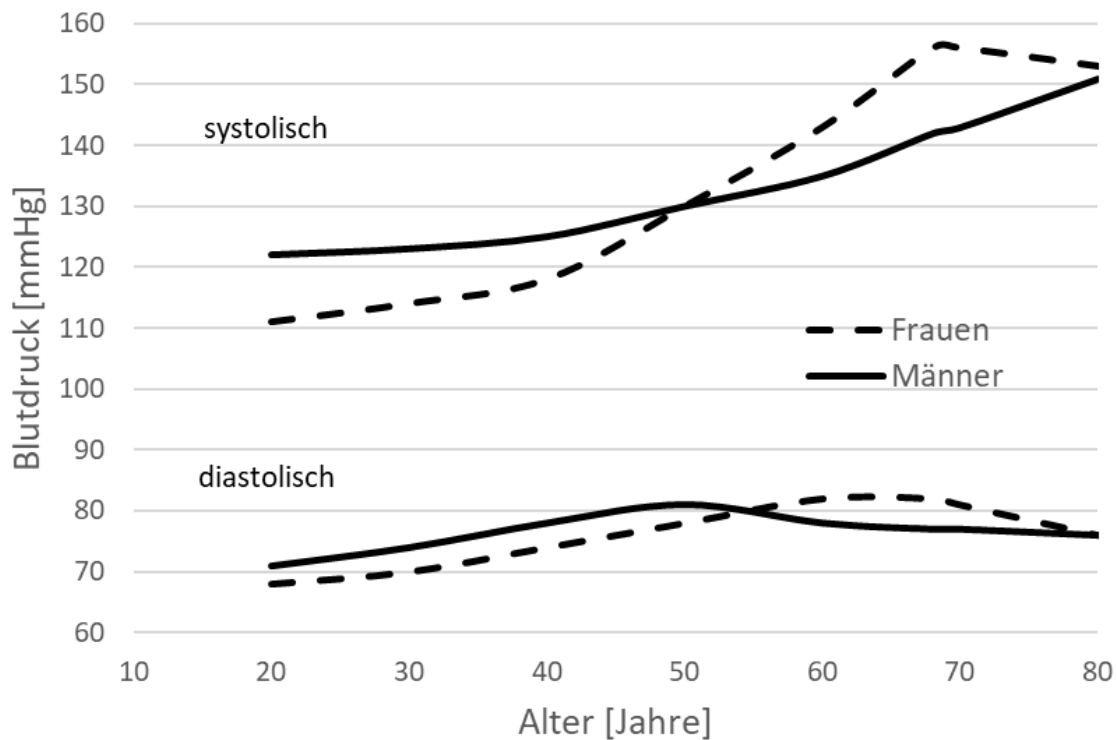


Abbildung 32. Liniendiagramm aus der Untersuchung von Maichle (1994) zur Analyse der Fähigkeiten von Lernenden eigenständig Diagramme zu interpretieren. Dargestellt ist der Zusammenhang zwischen Blutdruck und Lebensalter, differenziert in Männer und Frauen (aus dem Englischen nach Maichle 1994, S. 209).

Maichle (1994) konnte zeigen, dass sich die Noviz*innen vornehmlich darauf konzentrierten, Diagrammen explizit dargestellte und leicht zugängliche Informationen zu entnehmen, z. B. beschrieben sie statistisch signifikant häufiger als Expert*innen perzeptuell auffällige Trends. Expert*innen konzentrierten sich dagegen stärker auf das Vergleichen von Trends und zogen automatisch erste Schlussfolgerungen über implizit dargestellte Zusammenhänge. Insbesondere verglichen sie häufiger als Noviz*innen Abschnitte zwischen Graphen (Querschnittvergleiche) und sogar statistisch signifikant häufiger Abschnitte innerhalb einzelner Graphen miteinander (Längsschnittvergleiche, siehe dazu auch Ausführungen von Schnotz (1994) in Abschnitt 4.2.1.1). Noviz*innen tätigten zwar einzelne Vergleiche zwischen Graphen (Querschnittvergleiche), nahmen aber

praktisch keine Vergleiche innerhalb von Graphen (Längsschnittvergleiche) vor. Maichle (1994) schlussfolgert daher, dass Expert*innen Informationen auf einem höheren „level of complexity“ (ebd., z. B. S. 216) entnehmen als Noviz*innen (vgl. ebd.).

Zudem beobachtete Maichle (1994), dass Expert*innen das Diagramm frühzeitig in visuelle Informationseinheiten strukturierten (siehe Abschnitt 4.4.1.3). Im Verlauf des Leseprozesses erweitern sie diese Informationseinheiten dann sukzessive (vgl. Maichle 1994). Es sei in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass Maichle (1994) nicht auf semiotische Theorien zurückgreift, um die Strukturierungsprozesse der Expert*innen zu beschreiben, sondern auf kognitionspsychologische Theorien zum Chunken von Informationen (siehe dazu auch Ausführungen von Carpenter und Shah 1998 in Abschnitt 3.8.2.2).

In einer zweiten Teilstudie knüpfte Maichle (1994) an ihre Erkenntnisse über das unterschiedliche Vorgehen von Expert*innen und Noviz*innen beim Vergleichen von Trends und Punktwerten an. Sie ließ beide Gruppen vorgegebene Statements zu verschiedenen Diagrammen evaluieren. Die zu evaluierenden Statements gaben die Diagramminformationen zum Teil korrekt und zum Teil inkorrekt wieder und waren unterschiedlich komplex. Die Anzahl der bei der Evaluation dieser Statements getätigten Aussagen wertete Maichle (1994) als Maß für die kognitive Anstrengung der Expert*innen und Noviz*innen: Eine hohe Anzahl an Aussagen interpretierte sie als großen kognitiven Aufwand, eine geringe Anzahl an Aussagen als niedrigen kognitiven Aufwand (vgl. ebd.; siehe dazu insbesondere auch Abschnitt 4.3.2).

Maichle (1994) konnte so zeigen, dass Expert*innen, bevor sie mit der eigentlichen Evaluation der vorgegebenen Statements beginnen und ohne dass dies explizit Teil der Aufgabenstellung war, zunächst viel kognitive Aktivität darauf verwendeten, sich mit dem Rahmen des Diagramms und dem inhaltlichen Kontext vertraut zu machen. Die Expert*innen identifizierten in einer Strukturierungsphase zunächst die Variablen auf der X- und Y-Achse, die Einheiten, die Skalenreichweite und die Z-Variablen (Legende). Maichle (1994) vermutet daher, dass Expert*innen im Rahmen dieser Strukturierung zunächst „higher-order perceptual patterns“ (ebd. S. 223) konstruieren. Insbesondere zeigt sie auf, dass Expert*innen nach dieser Strukturierung die vorgegebenen Statements schneller als die Noviz*innen evaluieren konnten. Sie vermutet daher, dass Expert*innen weniger kognitiven Aufwand in die Evaluation investieren mussten als die Noviz*innen. Darüber hinaus zeigt sie, dass Noviz*innen, wenn es ihnen nicht

gelingt, das Diagramm sinnvoll zu strukturieren, dazu tendieren, leicht zugängliche, oberflächliche Informationen aus dem Diagramm abzulesen, anstatt das Diagramm inhaltlich zu interpretieren (vgl. ebd.; siehe dazu auch Preece & Janvier 1992, 1993; Tsuji 2011; Ratwani & Trafton 2004; Swatton & Taylor 1994; Janvier 1981).

4.4.2.1.3. Inhalts-Noviz*innen vs. Inhalts-Expert*innen

Lowe (1993) analysierte, wie Expert*innen und Noviz*innen beim Interpretieren von Wetterkarten vorgehen. Verschiedene Autor*innen betrachten das Lesen von Diagrammen und Wetterkarten als vergleichbare Tätigkeiten und nehmen an, dass Erkenntnisse aus den jeweiligen Bereichen aufeinander übertragbar seien (vgl. Winn 1991; Canham & Hegarty 2010; Lowe 1993; Trickett & Trafton 2006). Lowe (1993) differenziert Expert*innen und Noviz*innen vornehmlich hinsichtlich des domänenspezifischen Vorwissens und unterscheidet sich damit von Maichle (1994), die Expert*innen und Noviz*innen in Hinblick auf ihr diagrammspezifisches Vorwissen differenzierte. Als Expert*innen betrachtete Lowe (1993) Meteorolog*innen, die viel Erfahrung mit dem Lesen von Wetterkarten hatten, als Noviz*innen Nicht-Meteorolog*innen, die sich lediglich beim Fernsehen oder beim Lesen der Tageszeitung mit Wetterkarten befassten. Die Noviz*innen verfügten somit zwar über das notwendige diagrammspezifische Vorwissen, um Wetterkarten lesen zu können, nicht aber über umfangreiches domänenspezifisches, inhaltliches Vorwissen.

Ähnlich wie Maichle (1994) konnte auch Lowe (1993) zeigen, dass die Expert*innen Wetterkarten in inhaltlich bedeutsamere Informationsabschnitte strukturierten als die Noviz*innen (auch Lowe 1993 spricht hier von *chunking*). Lowe (1993) schlussfolgert daher, dass Expert*innen ausgeprägte mentale Repräsentation konstruieren, in denen sie Informationen strukturell-semantic verknüpfen. Noviz*innen strukturierten die Wetterkarten dagegen – sofern sie dies überhaupt taten – vornehmlich auf Grundlage perzeptueller, visuell-räumlicher Merkmale, wie Nähe und Form der dargestellten Elemente. Lowe (1993) schlussfolgert daher, dass Noviz*innen im Vergleich zu Expert*innen oberflächlichere mentale Repräsentationen konstruieren (vgl. ebd.).

4.4.2.2 Ausgewählte Studien zum Einfluss des Vorwissens

4.4.2.2.1. Relevanz domänenspezifischen Vorwissens

Hinweise auf die Relevanz des domänenspezifischen Vorwissens finden sich insbesondere in der Untersuchung von Ainley (1995). Ainley (1995) ging davon aus, dass Probleme bei der Entnahme von Informationen aus Diagrammen nicht kognitiver Natur sind, sondern die Konsequenz ungeeigneter pädagogischer Ansätze. Insbesondere kritisierte sie in diesem Zusammenhang den häufig gewählten Ansatz, Lernenden den Zugang zu Liniendiagrammen über den Weg der händischen Konstruktion des Diagramms zu ermöglichen. Ein solcher mechanischer Zugang würde es den Lernenden eher erschweren, einen Bezug zum Kontext herzustellen und das Diagramm aktiv zu nutzen. Ein derartiges Vorgehen führe nach Ainley (1995) nur dazu, dass Lernende die Wahrnehmung von Inhalt und Zweck des Diagramms vernachlässigen und kognitive Ressourcen verbrauchen, die ihnen dann wiederum für die eigentliche Interpretation fehlen (vgl. ebd.).

Ihre Vermutungen untersuchte Ainley (1995) explorativ. Dazu verglich sie qualitativ zwei Gruppen von Lernenden im Alter von acht bis zehn Jahren in Hinblick darauf, wie sie Liniendiagrammen Informationen entnehmen und den jeweiligen Inhalten Bedeutung beimessen. Die eine Gruppe der Lernenden konstruierte die Diagramme mechanisch per Hand, die andere Gruppe vereinfacht mithilfe eines Computers (vgl. Ainley 1995). Widererwarten konnte Ainley (1995) keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Gruppen feststellen. Lernende beider Gruppen waren in der Lage, die Liniendiagramme intuitiv zu durchdringen (vgl. ebd.). Vergleichbares konnte auch Pratt (1995) beobachten.

Ainley (1995) erklärt den Lernerfolg beider Gruppen mithilfe der von ihr gewählten Diagramminhalte. Sie nutzte als Datengrundlage die Körpergröße von Kindern. Ainley betont, dass es sich dabei um ein für Lernende in diesem Alter überaus interessantes Thema handelt und spricht von „*hot data*“ (ebd., S. 16). Sie argumentiert, dass die Lernenden ausgehend von diesen Inhalten (bzw. dem domänenspezifischen Vorwissen) einen Zugang zu dem Diagramm gefunden hätten. Dieser Zugang habe es ihnen ermöglicht, das Diagramm zu durchdringen (vgl. ebd.).

4.4.2.2.2. Bildliches und inhaltliches Interpretieren

Weitere Hinweise auf die Relevanz des domänenspezifischen Vorwissens liefern Preece und Janvier (1992; vgl. insbesondere Preece & Janvier 1993). Preece und Janvier (1992, 1993) interviewten Lernende (N = 23) im Alter von 14 bis 15

Jahren dazu, wie sie Diagramme mit vergleichbarem Aufbau (Syntax), aber unterschiedlichen Kontexten aus dem Themenbereich Ökologie interpretierten (vgl. Preece & Janvier 1992, 1993). Ähnlich wie Ainley (1995) konnten auch sie zeigen, dass es förderlich für das Diagrammverstehen ist, wenn Lernende über ihr domänenspezifisches Vorwissen einen Zugang zu dem Diagramm finden. Zudem, und wesentlich spezifischer als dies in anderen Studien der Fall war, konnten sie darüber hinaus zeigen, dass das domänenspezifische Vorwissen einen erheblichen Einfluss darauf hat, ob das Diagramm von den Lernenden bildlich beschrieben oder inhaltlich interpretiert wird (vgl. Preece & Janvier 1992, 1993). In ihren Untersuchungen verwendeten sie zwei syntaktisch vergleichbare, aber inhaltlich unterschiedliche Diagramme (siehe Abbildung 33 und Abbildung 34 auf der nachfolgenden Seite).

Das Diagramm in Abbildung 33 zeigt im Verlauf der Monate April bis Juli die Veränderung der Anzahl von Fingerhutpflanzen, die unter einem sehr großen Baum auf einer Obstplantage wachsen, und den Lichteinfall, der durch das Blätterdach bis zu den Fingerhutpflanzen gelangt. Am ersten Mai wurde der Baum beschnitten. Die Lernenden sollten das Diagramm eigenständig interpretieren und wurden dazu befragt.

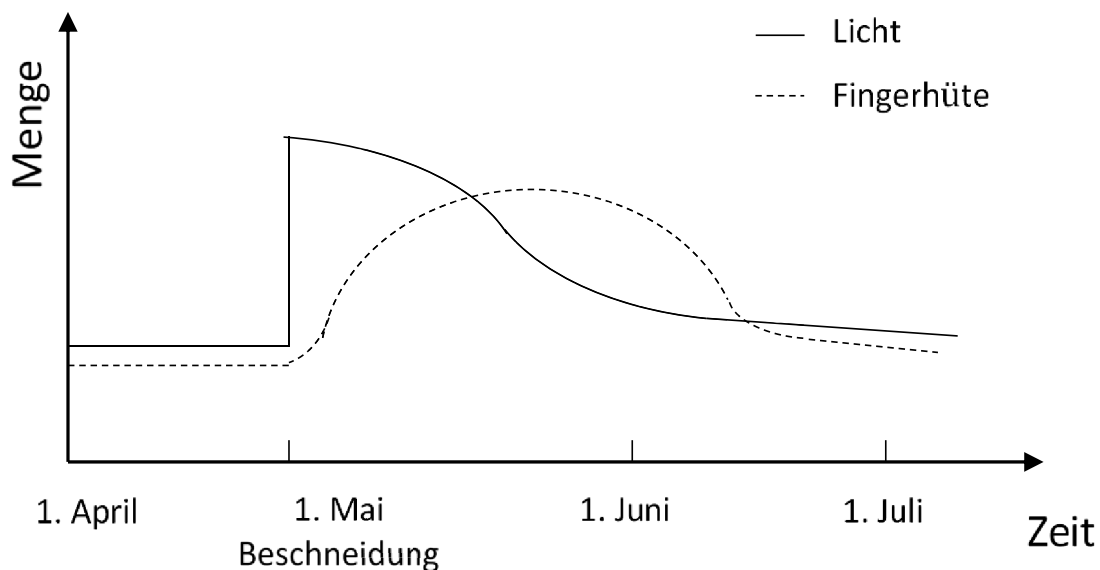


Abbildung 33. Diagramm A aus der Untersuchung von Preece und Janvier (1992, 1993) zur Analyse der Fähigkeit Diagramme zu interpretieren. Dargestellt ist die Veränderung der Lichtmenge und der Anzahl an Fingerhüten unter einem Baum in einem Obstgarten (aus dem Englischen nach Preece & Janvier 1993, S. 199).

Das Diagramm in Abbildung 34 zeigt dagegen die Veränderung der Sauerstoffkonzentration und der Anzahl an Shrimps in einem Fluss. In dem Ort Burton Joyce wurde Abwasser in den Fluss geleitet.

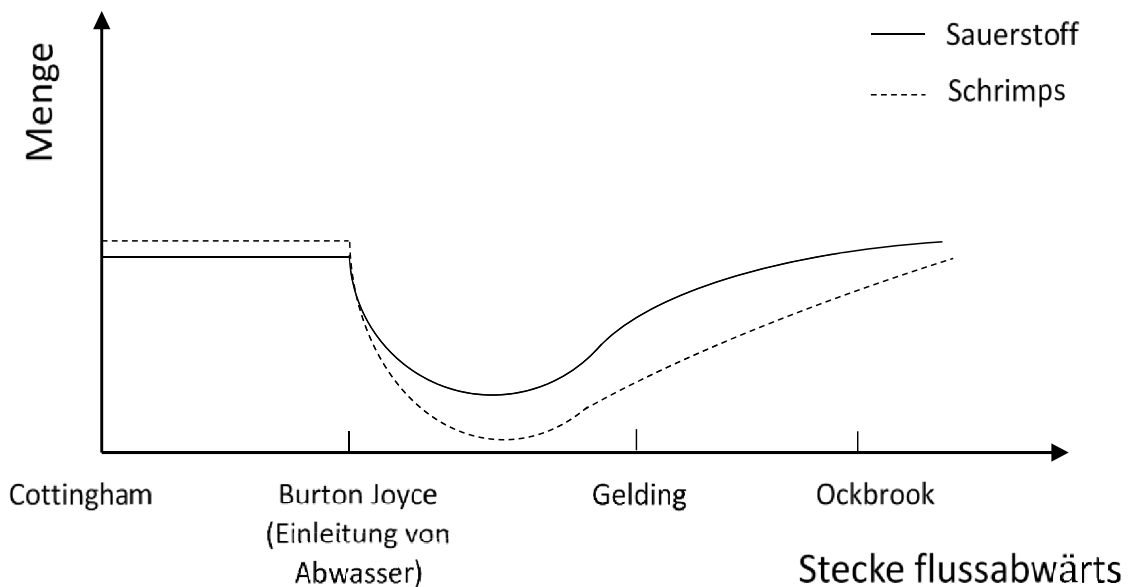


Abbildung 34. Diagramm B aus der Untersuchung von Preece und Janvier (1992, 1993) zur Analyse der Fähigkeit Diagramme zu interpretieren. Dargestellt ist die Veränderung der Sauerstoffkonzentration und der Anzahl an Shrimps in einem Fluss (aus dem Englischen nach Preece & Janvier 1993, S. 199)

Die Ergebnisse von Preece und Janvier (1992, 1993) zeigen, dass die Lernenden, unabhängig von den referierten Inhalten, ihre Interpretation (bzw. ihre Strukturierung) meist nicht orientiert an inhaltlichen Aspekten beginnen, sondern stattdessen an einem für sie besonders auffälligen perzeptuellen Merkmal. Von dort ausgehend versuchten sie dann, das Diagramm zu durchdringen. Perzeptuell auffällige Merkmale sind hier zum Beispiel die Veränderung der Graphenverläufe am Tag der Beschneidung des Baums oder bei der Einleitung von Abwasser in Burton Joyce (vgl. ebd.).

Zudem zeigte sich, dass die Lernenden nur dann in der Lage waren, die Graphenverläufe und die referierten Inhalte im Sinne eines Grounding-Prozesses (siehe Abschnitt 4.4.1.3) miteinander zu verbinden, wenn ihnen die dargestellten Inhalte vertraut waren und sie über ausreichend inhaltliches Vorwissen verfügten (vgl. ebd.). Lernende, die mit den entsprechenden Inhalten vertraut waren, konnten aufbauend auf dem Diagramm ein mentales Modell der Situation konstruieren und sogar – allerdings häufig erst auf Nachfragen durch den Interviewer – Hypothesen aufstellen, die den Graphenverlauf kausal erklärten. Lernende, die mit der referierten Situation nicht vertraut waren, waren dagegen nur in der Lage, den Graphenverlauf bildlich zu beschreiben.

Preece und Janvier (1993) sprechen in diesem Zusammenhang von einer *perzeptuellen Interpretation* (engl. graphical interpretation): „If a pupil is unfamiliar with the context he/she will tend to give a graphical interpretation in which the graphical features are described in detail with little reference to context“ (Preece & Janvier 1993, S. 211). Im Rahmen einer solchen perzeptuellen Interpretation (vgl. ebd.; siehe dazu auch Roth 2003, 2009; Swatton & Taylor 1994; Tsuji 2011; Ratwani & Trafton 2004; Janvier 1981) gaben Lernende beispielsweise an, dass der Sauerstoff zunächst auf den Boden des Flusses absinke und im Verlauf der Zeit wieder nach oben steige (vgl. Preece & Janvier 1993). Auch bei weiterem Nachfragen durch die Interviewer*innen gelang es solchen Lernenden nicht, die dargestellten Diagramme inhaltlich angemessen zu interpretieren. Preece und Janvier (1992, 1993) berichten, dass die Lernenden auf entsprechende Nachfragen reagierten, indem sie den Graphenverlauf erneut und noch detaillierter beschrieben, rieten oder irrelevante Erläuterungen gaben, in die sie Sachverhalte einbezogen, die – wenn überhaupt – lediglich in indirektem Zusammenhang mit dem Diagramm standen (vgl. ebd.).

4.4.2.2.3. Positiver und negativer Einfluss des inhaltlichen Vorwissens

Shah (1995) (unveröffentlichte Dissertation, zitiert nach Shah & Hoeffner 2002) untersuchte ebenfalls den Einfluss des Vorwissens auf die Interpretation von Liniendiagrammen. Sie konnte in Übereinstimmung mit den zuvor zitierten Studien (siehe insbesondere Ainley 1995; Preece & Janvier 1992, 1993) zeigen, dass das inhaltliche Vorwissen Lernenden den Zugang zu Diagrammen erleichtern kann. Dazu präsentierte Shah (1995) Proband*innen (Bachelor-Studierende) Diagramme mit Themen, zu denen sie großes inhaltliches Vorwissen besaßen (Anzahl Verkehrsunfälle in Abhängigkeit vom Abstand zum vorausfahrenden Auto und von der konsumierten Menge Alkohol), und Diagramme, zu denen sie geringes inhaltliches Vorwissen besaßen (Zusammenhang des Verkaufs von Eiscreme in Abhängigkeit von Zucker- und Fettgehalt). Es zeigte sich, in Übereinstimmung zu den zuvor zitierten Studien, dass die Lernenden Trends in Diagrammen dann häufiger beschrieben und Schlussfolgerungen aufstellten, wenn es ihnen möglich war, mithilfe ihres domänenspezifischen Vorwissens einen inhaltlichen Zugang zu den repräsentierten Inhalten zu finden. Fanden die Probanden keinen inhaltlichen Zugang zu den Diagrammen, beschrieben sie inhaltliche Trends seltener und erfassten stattdessen häufiger einzelne, perzeptuell auffällige

Datenpunkte (Shah 1995, zitiert nach Shah 2002; vgl. dazu auch Shah & Hoeffner 2002; Shah et al. 2005).

Ähnlich wie in den zuvor dargestellten Untersuchungen konnte somit auch Shah (1995, zitiert nach Shah 2002) zeigen, dass Diagrammleser*innen ihr Vorwissen nutzen, um sich mittels top-down-gesteuerter Prozesse einen Zugang zu dem Diagramm zu verschaffen und zu einer perzeptuellen Analyse des Diagramms neigen, wenn sie keinen Zugang zu dem Diagramm finden. Shah (2002) sieht in dieser Hinsicht starke Parallelen zum Leseverstehen kontinuierlicher Texte (vgl. ebd.; vgl. zu Ausführungen über das Lesen kontinuierlicher Texte Kintsch & van Dijk 1978; Van Dijk & Kintsch 1983).

Gleichzeitig konnte Shah (1995) empirisch aber auch zeigen, dass der zuvor beschriebene positive Einfluss des Vorwissens sich negativ auswirkt, wenn die grafischen Evidenzen im Widerspruch zum Vorwissen stehen. Der Einfluss des Vorwissens erwies sich bei der Analyse entsprechender Diagramme als so groß, dass die Proband*innen mit ihrem Vorwissen konsistente Zusammenhänge in die Daten hineindeuteten, obwohl die jeweiligen Diagramme solche Zusammenhänge nicht oder sogar gegenteilige Zusammenhänge zeigten (vgl. Shah 1995, zitiert nach Shah & Hoeffner 2002). Freedman und Shah (2002) sprechen daher mit Bezug auf diese und andere Ergebnisse die folgende Warnung aus: „[...] domain knowledge can lead to systematic biases and errors during the interpretation of graphs“ (Freedman & Shah 2002, S. 24). Vor dem Hintergrund der Ausführungen zu intuitiven und analytischen Analysestrategien in Abschnitt 4.3.2.3 wäre hier jedoch einschränkend zu ergänzen, dass eine solche Warnungen nur dann zutrifft, wenn sichergestellt ist, dass die Lernenden nicht bereit sind, ausreichend kognitive Energie in die Analyse des Diagramms zu investieren, um dieses beispielsweise angemessen zu strukturieren.

4.5. Beantwortung von Forschungsfrage 1

Zur Beantwortung der theoretisch-explorativen Forschungsfrage 1 (*Welche Probleme und Förderbedarfe zeigen Lernende im Umgang mit Liniendiagrammen?*) wurden ausgewählte Forschungsarbeiten in Hinblick auf das Diagrammverstehen intensiv analysiert und detailliert beschrieben.⁶³ Im Folgenden werden die aus dieser Analyse gewonnenen Erkenntnisse synthetisiert. Dazu wurden zunächst, im Rahmen der Beantwortung der Unterfrage *Wie lassen sich die analysierten empirischen Forschungsarbeiten zum Diagrammverstehen strukturieren, um übergeordnete Probleme zu identifizieren und Förderbedarfe zu explizieren?* drei Forschungsperspektiven unterschieden. Es wird angenommen, dass die Forschungsarbeiten (bzw. die jeweiligen Forscher*innen) aus diesen drei Perspektiven auf die in Abschnitt 3.4 beschriebenen Dimensionen des Diagrammverstehens *Informationsentnahme*, *Interpretation* und *Erklären* blicken.

Als Forschungsperspektiven werden unterschieden: die *kompetenzorientierte Perspektive*, die vornehmlich auf bereits bestehende Kompetenzen von Lernenden in Hinblick auf das Diagrammverstehen fokussiert; die *defizitorientierte Perspektive*, aus der nach (kognitionspsychologischen) Erklärungen für Missinterpretationen der Lernenden gesucht wird; und die *prozessorientierte Perspektive*, aus der das Vorgehen der Lernenden beim Interpretieren von Diagrammen analysiert wird.⁶⁴ Abbildung 35 veranschaulicht grafisch die Beziehung zwischen den drei Forschungsperspektiven und den drei Dimensionen des Diagrammverstehens. Anhand der Abbildung soll insbesondere zum Ausdruck gebracht werden, dass es aktuell noch nicht möglich ist, Diagrammverstehen erschöpfend zu analysieren und dass im Rahmen der Literaturstudie zur Beantwortung von Forschungsfrage 1 keine Arbeiten identifiziert werden konnten, die einen holistischen, multiperspektivischen Ansatz verfolgen. Zudem lassen sich die drei Dimensionen nicht umfassend aus einer einzelnen Forschungsperspektive analysieren. Ferner wurde anhand der Abbildung bewusst betont, dass die Di-

⁶³ Es sei an dieser Stelle betont, dass die hier durchgeführte Literaturrecherche nicht als vollständig erschöpfend betrachtet werden kann, aber durchaus ein langjähriger intensiver Rechercheprozess durchgeführt wurde, der einen weitreichenden Überblick über die aktuell bestehende Forschungslandschaft ermöglicht.

⁶⁴ Die drei genannten Forschungsperspektiven, *kompetenz-*, *defizit-* und *prozessorientierte Perspektive*, wurden induktiv gebildet (siehe dazu auch Ausführungen in Abschnitt 4.1). Alternative Perspektiven bzw. Kategorien erscheinen möglich.

mension Erklären bisher noch weitgehend unerforscht ist. Ein theoretischer Ansatz, der geeignet erscheint, diese Forschungslücke zu schließen, wird in Abschnitt 7.2 zur Vorbereitung der empirischen Untersuchung präsentiert.

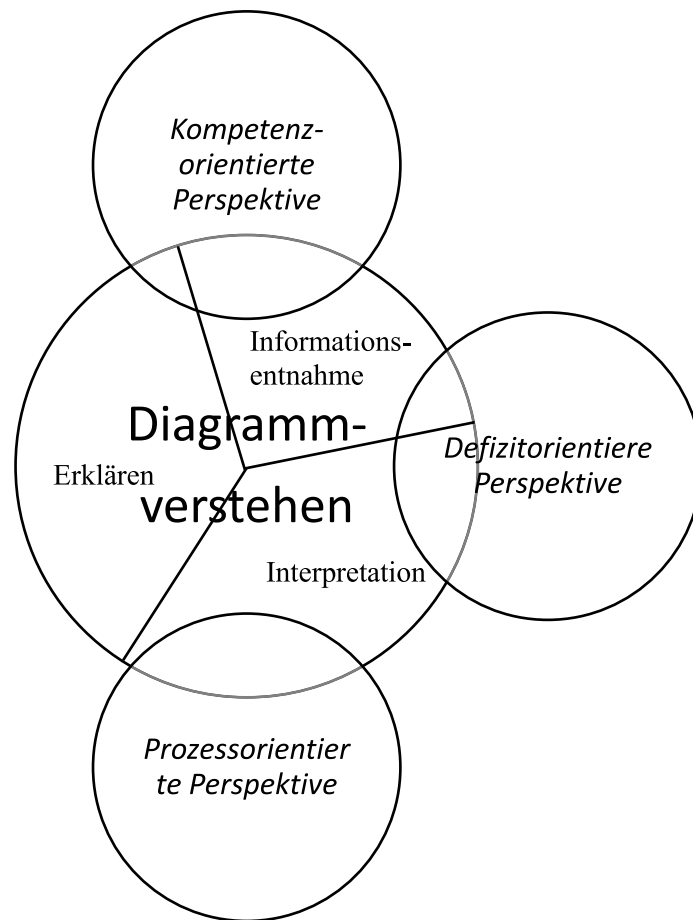


Abbildung 35. Analyse der Studien zum Diagrammverstehen aus kompetenzorientierter, defizitorientierter und prozessorientierter Forschungsperspektive (eigene Darstellung).

Bevor im Folgenden auf Probleme und Förderbedarfe von Lernenden eingegangen wird, werden die drei Perspektiven unter Bezug auf die ihnen zugeordneten empirischen Studien zunächst beschrieben.

Studien, die unter der *kompetenzorientierten Perspektive* subsumiert werden, messen Fähigkeiten und Fertigkeiten von Lernenden. Im Fokus dieser Studien steht fast ausschließlich die Dimension Informationsentnahme (die Studien von Aoyama & Stephens 2003 bzw. Aoyama 2006, 2007 stellen hier eine Ausnahme dar). Die theoretische Basis dieser Arbeiten bilden insbesondere die Ausführungen von Bertin (1983) sowie die empirischen Studien von Curcio (1987, 1989). Die jeweiligen Autor*innen verwenden in ihren empirischen Untersuchungen vornehmlich geschlossene Aufgaben sowie Diagramme mit einfacher Syntax

und Inhalten aus alltagsnahen Kontexten.⁶⁵ Die Lernenden agieren in diese Studien fast vollständig im Graphenraum. Ihr inhaltliches Vorwissen ist zum Lösen der jeweiligen Aufgaben von geringer Relevanz; mathematisches und diagrammspezifisches Vorwissen sind dagegen von hoher Relevanz.

Im Fokus von Studien, die sich der *defizitorientierten Perspektive* zuordnen lassen, steht die Analyse von Problemen, die Lernende beim Entnehmen von Informationen aus Diagrammen und insbesondere beim Interpretieren von Diagrammen zeigen. Es werden geschlossene und offene Aufgaben verwendet. Ähnlich wie im Fall der kompetenzorientierten Perspektive sind auch die in diesen Studien verwendeten Diagramme hinsichtlich ihrer Syntax wenig komplex und veranschaulichen Situationen aus alltagsnahen Kontexten. Anders als in den Arbeiten der kompetenzorientierten Perspektive, in denen Fähigkeiten von Lernenden gemessen wurden, wurde in Studien zur defizitorientierten Perspektive gezielt nach Defiziten und Fehlvorstellungen in Zusammenhang mit dem Diagrammverstehen gesucht. Entsprechende Probleme werden in den jeweiligen Studien ausführlich beschrieben. Kognitionspsychologische Theorien und Modelle werden bevorzugt verwendet, um die Probleme zu erklären. In der Literatur werden in diesem Zusammenhang häufig drei Kategorien von Missinterpretationen unterschieden: Intervall-Punkt-Konfusion, Höhe-Steigungs-Konfusion und ikonische Konfusion. Das domänenspezifische, inhaltliche Vorwissen über die grafisch referierten Inhalte, das sich in den Studien der kompetenzorientierten Perspektive als wenig relevant erwies, wird in Studien der defizitorientierten Perspektive häufig als Quelle für die Missinterpretationen betrachtet. Dem inhaltlichen Vorwissen und insbesondere den daraus abgeleiteten Vorstellungsbildern wird eine konfundierende Wirkung zugeschrieben.

Studien, die sich der *prozessorientierten Perspektive* zuordnen lassen, fokussieren – ähnlich wie Studien der defizitorientierten Perspektive – ausschließlich auf die Dimension Interpretieren. Anders als die defizitorientierten Studien, in denen fachwissenschaftlich ungeeignete Interpretationen beschrieben und ex post nach Ursachen gesucht wird, wird in Studien zur prozessorientierten Perspektive analysiert, welche Lernhandlungen ex ante, d. h. vor Beginn der eigentlichen Inter-

⁶⁵ Die biologiespezifische Untersuchung von Lachmayer (2008) stellt hier eine Ausnahme dar. Allerdings besitzen auch die hier verwendeten Diagramme, verglichen mit Diagrammen aus Forschungsarbeiten der prozessorientierten Perspektive, eine einfache Syntax. Ferner sind die gewählten Inhalte zwar fachspezifisch, aber nicht alltagsfern.

pretation (siehe Ausführungen zum Grounding in Abschnitt 4.4.1.3), zu Missinterpretationen und Problemen führen können. Die jeweiligen Autor*innen fokussieren dabei in hohem Maße auf das Vorgehen von Lernenden beim Interpretieren von Diagrammen. Studien der prozessorientierten Perspektive ergänzen in dieser Hinsicht die Studien der defizitorientierten Perspektive komplementär. In Studien zur prozessorientierten Perspektive wurden daher auch ausschließlich offene Aufgaben und komplexe Diagramme mit anspruchsvoller Syntax, die häufig fachspezifische Inhalte zusammenfassen, verwendet. Expert*innen-Noviz*innen-Vergleiche stellen hier eine häufig verwendete Untersuchungsmethode dar. Kognitionswissenschaftliche Theorien werden in diese Arbeiten um semiotische Ansätze und Theorien ergänzt. Das Vorwissen hat in diesen Studien – im Sinne eines konstruktivistischen Ansatzes – eine positive Bedeutung.⁶⁶ Inhaltliches Vorwissen wird als notwendig betrachtet, um ausgehend von der grafischen Darstellung den Situationsraum bzw. die referierten Inhalte (semiotisch) zu (re-)konstruieren.

Die drei Dimensionen des Diagrammverstehens lassen sich mit den drei Perspektiven, aus denen auf die drei Dimensionen geblickt wird, zu einem zweidimensionalen Analyseraster kombinieren (siehe Tabelle 3). Die Forschungslandschaft zum Diagrammverstehen lässt sich auf diese Weise systematisch strukturieren. Die analysierten Studien lassen sich weitgehend überschneidungsfrei in das Raster einordnen. In Übereinstimmung mit Abbildung 35 zeigt auch Tabelle 3 das Forschungsdefizit in Hinblick auf die Dimension Erklären auf und betont den hohen Fokus auf die Messung von Kompetenzen bei der Informationsentnahme und die Analyse von Problemen beim Interpretieren.

Vor dem Hintergrund der Strukturierung der Forschungslandschaft zum Diagrammverstehen in Dimensionen und Forschungsperspektiven wird im Folgenden – zur eigentlichen Beantwortung von Forschungsfrage 1 – zusammengefasst, *welche Probleme und Förderbedarfe Lernende im Umgang mit Liniendiagrammen zeigen.*

Aus *kompetenzorientierter Perspektive* (siehe Abschnitt 4.2) lässt sich festhalten, dass Lernende in der Lage sind, explizit dargestellte Informationen aus Diagrammen abzulesen und Graphenverläufe zu beschreiben. Förderbedarfe in Hin-

⁶⁶ Die in Abschnitt 4.4.2 zitierte Untersuchung von Shah (1995) wird daher hier auch bewusst der defizitorientierten Perspektive zugeordnet.

blick auf die Dimension Informationsentnahme bestehen daher nicht. Das Interpretieren von Diagrammen fällt den Lernenden dagegen bereits deutlich schwerer. Erheblicher Förderbedarf konnte zudem in Hinblick auf die Dimension Erklären identifiziert werden. Lernende scheinen praktisch nicht in der Lage zu sein, kausale Erklärungen für Graphenverläufe zu entwickeln. Entsprechende Untersuchungen sind allerdings selten. Lediglich Aoyama und Stephens (2003) bzw. Aoyama (2006, 2007) untersuchten im Rahmen der kompetenzorientierten Perspektive, zusätzlich zur Informationsentnahme aus Diagrammen, inwieweit es den Lernenden gelingt, Graphenverläufe kausal zu erklären (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3. Kategorisierung der in Kapitel 1 beschriebenen empirischen Studien, geordnet nach Forschungsperspektiven und Dimensionen des Diagrammverstehens

		Dimensionen des Diagrammverstehens		
		Informationsentnahme	Interpretation	Erklären
Forschungsperspektiven	Kompetenzorientierte Perspektive	Curcio (1987,1989); Lachmayer (2008); Aoyama & Stephens (2003); Aoyama (2006, 2007); Padilla, McKenzie & Shaw (1986); Keller (2008); Swatton & Taylor (1994); Pereira-Mendoza & Mellor (1991); Baumert et al. (1998); Barclay (1986)	Swatton & Taylor (1994); Padilla, McKenzie und Shaw (1986); Wu (2004); Wu & Wong (2007, 2009)	Aoyama & Stephens (2003) bzw. Aoyama (2006, 2007)
	Defizitorientierte Perspektive	Pereira-Mendoza & Mellor (1991); Barclay (1986)	McDermott et al. (1987); Kerslake (1977, 1981); Janvier (1998); Shah (1995); Bell & Janvier (1981); Preece (1983); Swatton & Taylor (1994);	Im Rahmen der Analyse konnten keine Forschungsarbeiten identifiziert werden.
	Prozessorientierte Perspektive	wurde in dieser Arbeit nicht explizit untersucht	Roth & Kollegen ⁶⁷ ; Maichle (1994); Lowe (1993); Ainley (1995); Pratt (1995); Preece & Janvier (1992, 1993)	Im Rahmen der Analyse konnten keine Forschungsarbeiten identifiziert werden.

⁶⁷ Roth und Bowen (1999, 2003); Roth et al. (2007); Roth (2003, 2009, 2012).

Aus *defizitorientierter Perspektive* (siehe Abschnitt 4.3) lässt sich festhalten, dass Lernende erhebliche Probleme zeigen, von einer grafischen Darstellung zu abstrahieren und auf Basis des Diagramms einen geeigneten, (fachlich) korrekten Situationsraum zu konstruieren. So beschrieben Lernende in verschiedenen Untersuchungen (siehe Abschnitt 4.3.1) auf der Grundlage von Diagrammen beispielsweise inhaltliche Situationen, die in keiner Verbindung zu den in den Diagrammen tatsächlich referierten Situationen bzw. Inhalten standen. Ebenfalls zeigten Lernenden erheblichen Probleme dahingehend, Graphenverläufe inhaltlich zu extrapolieren. Bildliche Vorstellungen oder ungeeignete Interpretations-schemata, die insbesondere durch perzeptuell auffällige Muster in den Diagrammen getriggert werden können, scheinen die Interpretationen der Lernenden bzw. die Konstruktion des Situationsraums – insbesondere bei Verwendung einer intuitiven statt einer analytischen Analysestrategie – zu konfundieren (siehe Abschnitt 4.3.2). Förderbedarf besteht folglich darin, Lernende beim Interpretieren des Diagramms anzuleiten, ihnen die Anwendung einer (kognitiv anstrengenden) analytischen Strategie zu erleichtern und sie beim Rekonstruieren des von der Diagrammverfasserin bzw. des Diagrammverfassers intendierten Situationsraums zu unterstützen.

Aus *prozessorientierter Perspektive* (siehe Abschnitt 4.4) zeigt sich – was hinsichtlich der Entwicklung von Förderkonzepten besonders relevant ist –, dass es Lernenden (zum Teil sogar auch Expert*innen) beim Interpretieren schwerfällt, ihnen unbekannte Diagramme zu strukturieren. Ziel eines erfolgreichen Strukturierungsprozesses ist es, ein Diagramm in inhaltlich bedeutsame und leichter zu verarbeitende Abschnitte oder Zeichen einzuteilen. Diesen Zeichen wird dann im nachfolgenden Interpretationsprozess – unter Verwendung des diagrammspezifischen und domänenspezifischen Vorwissens – Bedeutung zugemessen (siehe Abschnitte 4.4.1 und 4.4.2.1). Misslingt dieser zeichenbildende Strukturierungsprozess, so finden die Lernenden keinen Zugang zum Diagramm. Es gelingt ihnen nicht, aufbauend auf der grafischen Darstellung einen rudimentären Situationsraum zu konstruieren, den sie zur weiteren Analyse des Diagramms nutzen können (siehe zur Konstruktion eines ungeeigneten Situationsraums die zuvor beschriebenen Ausführungen zur defizitorientierten Perspektive). Lernende, die von derartigen Problemen beim Analysieren betroffen sind, können keinen Bezug zum referierten inhaltlichen Sachverhalt herstellen. Sie verbleiben bei ihrer

Analyse im Graphenraum und analysieren das Diagramm perceptuell. Entsprechende Lernende beschreiben das Diagramm dann so, als ob es sich um ein zweidimensionales Bild von Linien handeln würde (siehe Abschnitt 4.4.2.2.2).

Verfügen die Lernenden über hohes domänenspezifisches Vorwissen, so fällt ihnen das Strukturieren und damit insbesondere auch das Konstruieren eines geeigneten Situationsraums häufig leichter (siehe Abschnitte 4.4.2.1.3 und 4.4.2.2). Allerdings zeigt sich, dass sich das inhaltliche Vorwissen nur dann als lern- und verstehensförderlich erweist, wenn Lernende dies in Kombination mit einer analytischen, strukturierenden Strategie (siehe Abschnitt 4.3.2.3) zur Anwendung bringen. Andernfalls kann hohes Vorwissen sogar dazu führen, dass dem Vorwissen widersprechende Informationen nicht oder zumindest unzureichend beim Strukturieren berücksichtigt werden (siehe Abschnitt 4.4.2.2.3). Lernende sollten daher sowohl bei der Aktivierung ihres Vorwissens als auch bei der (analytischen) Strukturierung des Diagramms gefördert werden, um ihnen so die systematische Konstruktion eines fachlich korrekten bzw. eines zur Interpretation geeigneten Situationsraums zu erleichtern.

5. Identifikation von Förderkonzepten (F2)

5.1. Herleitung von Forschungsfrage 2

In den vorausgegangenen Kapiteln 3 und 4 dieser Arbeit wurde das Konstrukt Diagrammverstehen (vorläufig) definiert und Probleme von Lernenden beim Verstehen von Diagrammen analysiert. Erste Ansätze zur Erklärung von Problemen wurden formuliert und Förderbedarfe benannt. Als wesentlicher Förderbedarf wurde die Unterstützung von Lernenden bei der systematischen Konstruktion eines geeigneten Situationsraums erkannt. Konkrete Förderkonzepte zur Überwindung der jeweiligen Probleme wurden bisher allerdings noch nicht geliefert. Aus diesem Forschungsdesiderat ergibt sich Forschungsfrage 2:

Wie lässt sich das Diagrammverstehen von Lernenden, aufbauend auf den identifizierten Förderbedarfen, fördern?

Um die Frage nach dem *WIE fördern* zielgerichtet beantworten zu können, ist zunächst zu klären, *WAS* und *WANN* genau gefördert werden sollen (vgl. Friedrich & Mandl 2006). In Abschnitt 3.8.1 wurde beispielsweise bereits diskutiert, dass sich die Konstruktion von Vorstellungsbildern und das logische Schlussfolgern gegenseitig behindern können und daher zeitlich voneinander getrennt erfolgen sollten. Die Betrachtung von Diagrammverstehen als einen sequenziellen Verstehensprozess erscheint vor diesem Hintergrund hilfreich, um das Diagrammverstehen von Lernenden systematisch zu fördern. Zur Klärung des *WAS* wird Diagrammverstehen zunächst als Prozess aus verschiedenen Phasen betrachtet; das *WANN* bezieht sich dann auf konkrete Phasen in diesem Prozess, von denen angenommen wird, dass sie einer zeitlichen Abfolge unterliegen. Es ergeben sich entsprechend zwei Unterfragen, die Forschungsfrage 2 vorweggestellt und nacheinander beantwortet werden (siehe Abbildung 36).

Im Rahmen der ersten Unterfrage (U 1) *Wie lässt sich Diagrammverstehen als Prozess beschreiben?* wird zunächst theoretisch geklärt, inwieweit sich die drei Dimensionen des Diagrammverstehens Informationsentnahme, Interpretieren und Erklären zu einem Verstehensprozess kombinieren lassen. In Abschnitt 3.4 wurde hier bisher lediglich angedeutet, dass die Informationsentnahme der Interpretation vorausgeht und die Interpretation das Erklären vorbereitet. Diese zeitliche Abfolge soll nun detaillierter analysiert werden. Dazu wird in Abschnitt 5.2.4, aufbauend auf dem dreistufigen Modell des Bildverstehens bzw. der

Bildinterpretation nach Panofsky (1975), ein sequenzielles (vorläufiges)⁶⁸ Prozessmodell des Diagrammverstehens postuliert (siehe Abbildung 37 auf Seite 146). Im Rahmen der zweiten Unterfrage (U 2) wird dann aufbauend auf diesem Prozessmodell ebenfalls theoretisch ermittelt, *in welcher Phase des Diagrammverstehensprozesses eine Förderung besonders effektiv erscheint*. Insbesondere die Verortung der Konstruktion des Situationsraums in den zeitlichen Verlauf des Verstehensprozesses erscheint dabei von hoher Relevanz.

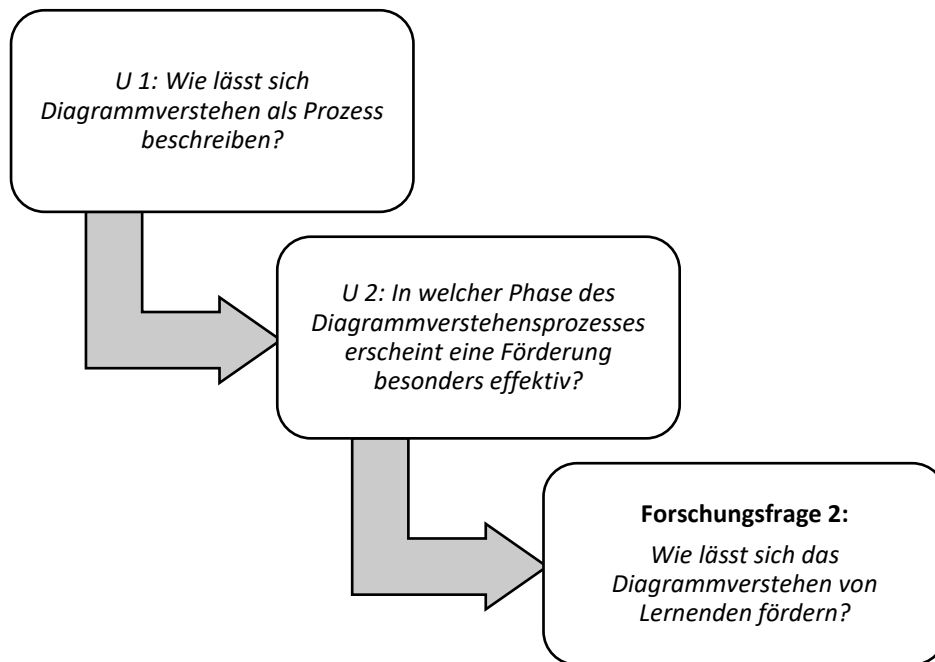


Abbildung 36. Forschungsfrage 2 und die Forschungsfrage vorbereitende Unterfragen (eigene Darstellung)

Der Beantwortung von Forschungsfrage 2 wird somit zunächst durch Beantwortung der beiden Unterfragen U 1 und U 2 theoretisch vorbereitet (siehe Abschnitt 5.2). Die eigentliche Beantwortung von Forschungsfrage 2 erfolgt dann vor dem Hintergrund der hierdurch gewonnenen Erkenntnisse sowie durch Deduktion möglicher Förderkonzepte aus der Literatur (Abschnitt 5.3), gefolgt von einer empirischen Spezifikation der deduzierten Förderkonzepte anhand von drei qualitativer Vorstudien (Abschnitt 5.4.). Die aus den theoretischen Überlegungen und den empirischen Vorstudien gewonnenen Erkenntnisse werden in Abschnitt 5.5 zur Beantwortung von Forschungsfrage 2 synthetisiert.

⁶⁸ Es sei hier bereits darauf hingewiesen, dass auf Grundlage der empirischen Befunde dieser Arbeit ein sehr viel umfassenderes Prozessmodell des Diagrammverstehens entwickelt werden konnte, in dem Diagrammverstehen unter Einbettung der empirisch gewonnenen Erkenntnisse als zyklisch-progressiver Verstehensprozess beschrieben wird (siehe dazu insbesondere Abschnitt 9.2).

5.2. Diagrammverstehen als Prozess

Zur Klärung der Unterfrage 1 *Wie lässt sich Diagrammverstehen als Prozess beschreiben?* wird explorativ vorgegangen. In der Literatur finden sich zwar Hinweise auf eine Stufung bzw. eine zeitliche Staffelung komplexer Lese- oder Interpretationstätigkeiten (vgl. z. B. Bertin 1983; Maichle 1994; Curcio 1987, 1989; Lai et al. 2016; Shah & Hoeffner 2002), ein spezifisches Prozessmodell, das die relevanten Vorgänge umfassend beschreibt und alle drei der in Abschnitt 3.4 beschriebenen Dimensionen des Diagrammverstehens berücksichtigt, konnte allerdings nicht identifiziert werden. Prozessbeschreibungen enden häufig mit dem interpretativen Wechsel aus dem Graphen- in den Situationsraum (vgl. Lai et al. 2016; Shah & Hoeffner 2002). Übertragen auf die in dieser Arbeit verwendete Terminologie (siehe Abschnitt 3.4.2) würde dadurch ausschließlich die Informationsentnahme und die Interpretation des Diagramms erfasst werden. Erklärende Prozesse, in denen der Situationsraum funktional zur Suche nach kausalen Erklärungshypothesen verwendet wird, wurden in entsprechenden Arbeiten nicht explizit beschrieben. Da kein geeigneter Ansatz zur Systematisierung des Prozesses Diagrammverstehen identifiziert werden konnte, wird im Folgenden, analog zur Entwicklung einer Arbeitsdefinition für das Diagrammverstehen in Abschnitt 3.2, zunächst erneut auf das Bildverstehen Bezug genommen. Eine Spezifikation dieser eher generischen Ausführungen in Hinblick auf das Diagrammverstehen erfolgt, insbesondere aufbauend auf den empirischen Erkenntnissen der Hauptuntersuchung, in Kapitel 9.

Panofsky (1975) liefert mit seinem dreistufigen Modell des Bildverstehens bzw. der Bildinterpretation einen Ansatz, der geeignet erscheint, um damit auch das Diagrammverstehen zu strukturieren.⁶⁹ Panofskys Ansatz stellt zumindest in der Kunstgeschichte „die wohl prominenteste Methodologie der Bildinterpretation“ (Bohnsack, Nentwig-Gesemann & Nohl 2013, S. 23) dar. Sein Ansatz erscheint zur Strukturierung des Diagrammverstehens insbesondere deshalb als hilfreich, weil er 1. das Bildverstehen als einen zeitlich strukturierten Prozess aus prinzipiell sukzessive aufeinander aufbauender Phasen bzw. Stufen des Verstehens betrachtet und 2. weil er den interpretativen Wechsel von der grafischen Darstellung zu den referierten Inhalten lediglich als einen Zwischenschritt in diesem

⁶⁹ Zur Differenzierung des Lesens kontinuierlicher Texte in Phasen siehe z. B. Kintsch und Van Dijk (1978); Van Dijk und Kintsch (1983); Artelt et al. (2007); Christmann (2015a, 2015b).

Prozess ansieht. Die inhaltliche und tiefergehende ‚Interpretation‘ des Bildes, in die Panofsky insbesondere auch epistemische Aspekte und das kausale Erklären von Bildaspekten einbezieht, stellen den eigentlichen Schwerpunkt und gleichzeitig die höchste Anforderung des Verstehensprozesses dar (vgl. ebd.).

Panofsky (1975) beschreibt die Interpretation bzw. das Verstehen realistischer Bilder als einen sequenziellen⁷⁰ Prozess aus drei Phasen: *vorikonografische*, *ikonografische* und *ikonologische Phase*. Die drei Phasen bauen aufeinander auf und werden zunächst sukzessive und mit voranschreitender Analyse re-iterativ durchlaufen. Die von Panofsky geschaffene Dreiteilung wird vor dem Hintergrund hermeneutischer, ikonografischer/ikonologischer Überlegungen zwar als starke Vereinfachung eines holistischen Verstehensprozesses kritisiert (zu einer Diskussion siehe Büttner & Gottdang 2006; Przyborski & Slunecko 2012; Thaler 2015), allerdings ergibt sich gerade aus dieser Komplexitätsreduktion ein für Lernende, Lehrende und auch Forscher*innen wertvolles Strukturierungsinstrument – was vor allem aus Sicht der Kunst- und Kommunikationswissenschaften betont wird (vgl. Bering & Bering 2014; Geise & Rössler 2012, 2013; Thaler 2015).

Die drei Phasen nach Panofsky (1975) lassen sich unter drei Leitfragen subsumieren: 1. *Was ist dargestellt?* (*vorikonografische Beschreibung*), 2. *Was bedeutet das Dargestellte?* (*ikonografische Analyse*) und 3. *Welche Zusammenhänge bestehen zwischen Darstellung und Kontext?* (*ikonologische Interpretation*) (vgl. ebd.). Die drei Phasen werden im Folgenden vorgestellt und es werden jeweils Ähnlichkeiten mit dem Diagrammverstehen aufgezeigt.

5.2.1. Vorikonografische Beschreibung

In der *vorikonografischen Beschreibung* nach Panofsky (1975) werden Elemente des Bildes sowie oberflächliche Zusammenhänge identifiziert und formal beschrieben, ohne, dass es dabei zur aktiven Anwendung inhaltsrelevanten Vorwissens kommt (vgl. ebd.). Vor dem Hintergrund lebensweltlicher Vorerfahrungen erfolgt in dieser Phase lediglich eine vorbereitende, basale Interpretation der

⁷⁰ Panofsky (1975) spricht hier trotz seiner Sequenzierung von „Aspekte[n] eines Phänomens“ (ebd., S. 49) und expliziert: „[...] wir müssen in Erinnerung behalten, daß die säuberlich geschiedenen Kategorien, [...] sich in Wirklichkeit auf Aspekte eines Phänomens beziehen, nämlich auf das Kunstwerk als Ganzes, so daß bei der eigentlichen Arbeit die Zugangsmethoden, die hier als drei unzusammenhängende Forschungsoperationen erscheinen, miteinander zu einem einzigen organischen und unteilbaren Prozeß verschmelzen“ (ebd., S. 49).

dargestellten Konfiguration von Linien und Farben. Panofsky (1975) spricht daher hier auch von „Tatsachenbedeutung“ (ebd. S. 36). Die vorikonografische Beschreibung ähnelt in dieser Hinsicht insbesondere den Forschungsarbeiten zum Diagrammverstehen, die im vorausgegangenen Kapitel der Dimension Informationsentnahme zugeordnet wurden (siehe dazu insbesondere Abschnitte 3.4.1 und 4.2). Dazu gehören beispielsweise das Ablesen explizit dargestellter Punktwerte und das Beschreiben von Trends. Auch die Informationsentnahme im Kontext des Diagrammverstehens findet, ähnlich wie das vorikonografische Beschreiben im Kontext des Bildverstehens, ohne eine intensive, inhaltliche Auseinandersetzung mit der referierten inhaltlichen Situation statt. Verbindungen zwischen der grafischen Darstellung (Graphenraum) und dem inhaltlichen Kontext (Situationsraum) werden nicht oder nur auf einer oberflächlichen Ebene hergestellt (z. B. durch Verwendung aus dem Informationsmaterial oder der Legende entnommener Begriffe zur grafischen Beschreibung von Graphenverläufen). So sind Diagrammleser*innen unter Anwendung der relevanten Konvention beispielsweise in der Lage, explizit dargestellte Informationen aus dem Diagramm zu entnehmen, implizit dargestellte Informationen können von ihnen zu diesem Zeitpunkt aber noch nicht geschlussfolgert werden.

5.2.2. Ikonografische Analyse

In der *ikonografischen Analyse* werden Bildelemente zueinander in Beziehung gesetzt und mit inhaltsrelevanten Konzepten verbunden. Die Einbindung des Vorwissens und die Zuschreibung von Bedeutung erfolgen jedoch zunächst ohne korrektive Kontrolle. Panofsky (1975) betont daher für diese Phase die Gefahr von Missinterpretationen. Zur Veranschaulichung dieser Problematik beschreibt er beispielhaft einen „australischen Buschmann“ (ebd. S. 37), dem *Das Abendmahl* von Leonardo da Vinci „die Vorstellung einer erregten Tischgesellschaft“ (ebd., S. 45) vermittele.

Die ikonografische Analyse entspricht daher einerseits den in Abschnitt 4.3 unter die defizitorientierte Perspektive subsumierten Forschungserkenntnissen zu Missinterpretationen beim Diagrammverstehen, und andererseits den Forschungserkenntnissen, die der prozessorientierten Perspektive zugeordnet wurden (siehe Abschnitt 4.4). Die ikonografische Analyse ähnelt dem interpretativen Wechsel vom Graphen- in den Situationsraum (siehe Abschnitt 3.7), allerdings ohne, dass Graphen- und Situationsraum durch iterativ stattfindende (korrektive) Translationsprozesse in Übereinstimmung gebracht werden. Ziel des ikonografischen

Analysierens von Diagrammen wäre es demnach, die in dem Diagramm veranschaulichten inhaltlich bedeutsamen Zusammenhänge in einem Prozess der Bildung globaler Kohärenz bestmöglich mental zu rekonstruieren (siehe Abschnitt 3.2). Guthrie et al. 1993 sprechen diesbezüglich von „understanding the full ‚visual argument‘ of a document“ (ebd., S. 189) und betonen, dass dies nur unter Verwendung kognitiv anstrengender Abstraktionsprozesse möglich sei. Entsprechende Prozesse finden beim vorikonografischen Beschreiben noch nicht statt und sind für das ikonologische Interpretieren (siehe nachfolgender Abschnitt) meist nicht mehr in diesem Ausmaß notwendig. Entsprechend sind es diese Prozesse der Abstraktion und der inhaltlichen Rekonstruktion von Zusammenhängen, die das ikonografische Analysieren von quantitativen Diagrammen in besonderem Maße kennzeichnen.

5.2.3. Ikonologisches Interpretieren

In der Phase ikonologischen Interpretation findet eine hermeneutische bzw. epistemische Analyse des Bildes statt (vgl. Panofsky 1975). Kunsttheoretisch wird dadurch eine eigene Neu-Interpretation geschaffen, die weit über die eigentliche Darstellung hinausgeht. Panofsky (1975) betont, dass die interpretierende Person über umfangreiches Vorwissen verfügen und Erklärungen auf verschiedenen Ebenen berücksichtigen muss, um den Kontext sowie alternative Erklärungen aktiv in den Analyseprozess einzubinden.

Übertragen auf das Diagrammverstehen, entspricht die ikonologische Interpretation somit nicht nur dem Wechsel aus dem Graphen- in den Situationsraum, sondern beinhaltet zudem die in Abschnitt 3.7.2 beschriebenen vernetzenden Translationsprozesse zwischen Erklärungsebenen innerhalb des Situationsraums. Vorwissen zu Mechanismen und Theorien wird dabei aktiv in die Interpretation der Inhalte eingebunden. Diagrammleser*innen generieren so, aufbauend auf dem Diagramm, neue qualitative Informationen (siehe Ausführungen zur Konstruktion neuer qualitativer Informationen auf der Grundlage der gegebenen quantitativen Informationen nach Aoyama & Stephens 2003; Aoyama (2006,2007); Shaughnessy et al. 1996; Shaughnessy 2007 in Abschnitt 4.2.2). Die Lernenden modifizieren und erweitern ihr bis dahin konstruiertes mentales Modell. Das ikonologische Interpretieren ist daher in besonderem Maß durch kognitive Prozesse geprägt, die in enger Verbindung mit der Wissensgenese stehen. Der Leser agiert

dabei fast ausschließlich im Situationsraum, der Graphenraum wird nur noch betreten, um einen Bezug zwischen situativer Vorstellung und Diagramm herzustellen.

Es sei allerdings betont, dass es genau diese Prozesse sind, die in der bisherigen Forschung zum Diagrammverstehen noch nicht hinreichend erforscht wurden (siehe zu dieser Problematik auch Ausführungen in den Abschnitten 4.2.2 und 4.5). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit (insbesondere in den Kapiteln 0 und 9) erfolgt daher, aufbauend auf den empirischen Erkenntnissen der durchgeführten Hauptuntersuchung, eine Erweiterung der hier beschriebenen Interpretationsprozesse um korrigierende, revidierende Prozesse, anhand derer die während der ikonologischen Interpretation neu konstruierten qualitativen Informationen aus dem Situationsraum in den Graphenraum zurücktransportiert und dort mit den grafisch gegebenen Informationen abgeglichen werden.

5.2.4. Prozessmodell des Diagrammverstehens

Die in den vorausgegangenen Abschnitten beschriebenen Zusammenhänge sind – als Antwort auf Unterfrage 1 (*Wie lässt sich Diagrammverstehen als Prozess beschreiben?*) – in Abbildung 37 in Form eines Prozessmodells veranschaulicht. Die drei Phasen der Bildinterpretation, *vorikonografisches Beschreiben*, *ikonografisches Analysieren* und *ikonologisches Interpretieren*, werden dabei auf das Diagrammverstehen übertragen und einander hinsichtlich ihrer Lese- bzw. Analyseziele, vornehmlich verwendeter Operatoren, der Relevanz des domänenspezifischen Vorwissens sowie der zur Analyse des Diagramms relevanten Interpretationsräume gegenübergestellt.

Obgleich Abbildung 37 grafisch suggeriert, dass sich die drei Phasen in Hinblick auf die genannten Aspekte trennscharf voneinander unterscheiden lassen, sei betont, dass sie fließend, teilweise sogar (re-)iterativ, ineinander übergehen und rekursiv in einem Abhängigkeitsverhältnis stehen können (vgl. Aoyama & Stephens 2003; Carpenter & Shah 1998). So ist beispielsweise zu erwarten, dass auch in den Phasen des ikonografischen Analysierens und des ikonologischen Interpretierens von Diagrammen erneut Prozesse vorikonografischen Beschreibens (im Sinne der Identifikation und der Informationsentnahme) stattfinden.

Zusätzlich zu der zeitlichen Reihung der drei Phasen impliziert das Prozessmodell auch erste Ansätze zur Förderung des Diagrammverstehens und fungiert damit als Grundlage, um Unterfrage 2 zu beantworten (*In welcher Phase des Diagrammverstehensprozesses erscheint eine Förderung besonders effektiv?*).

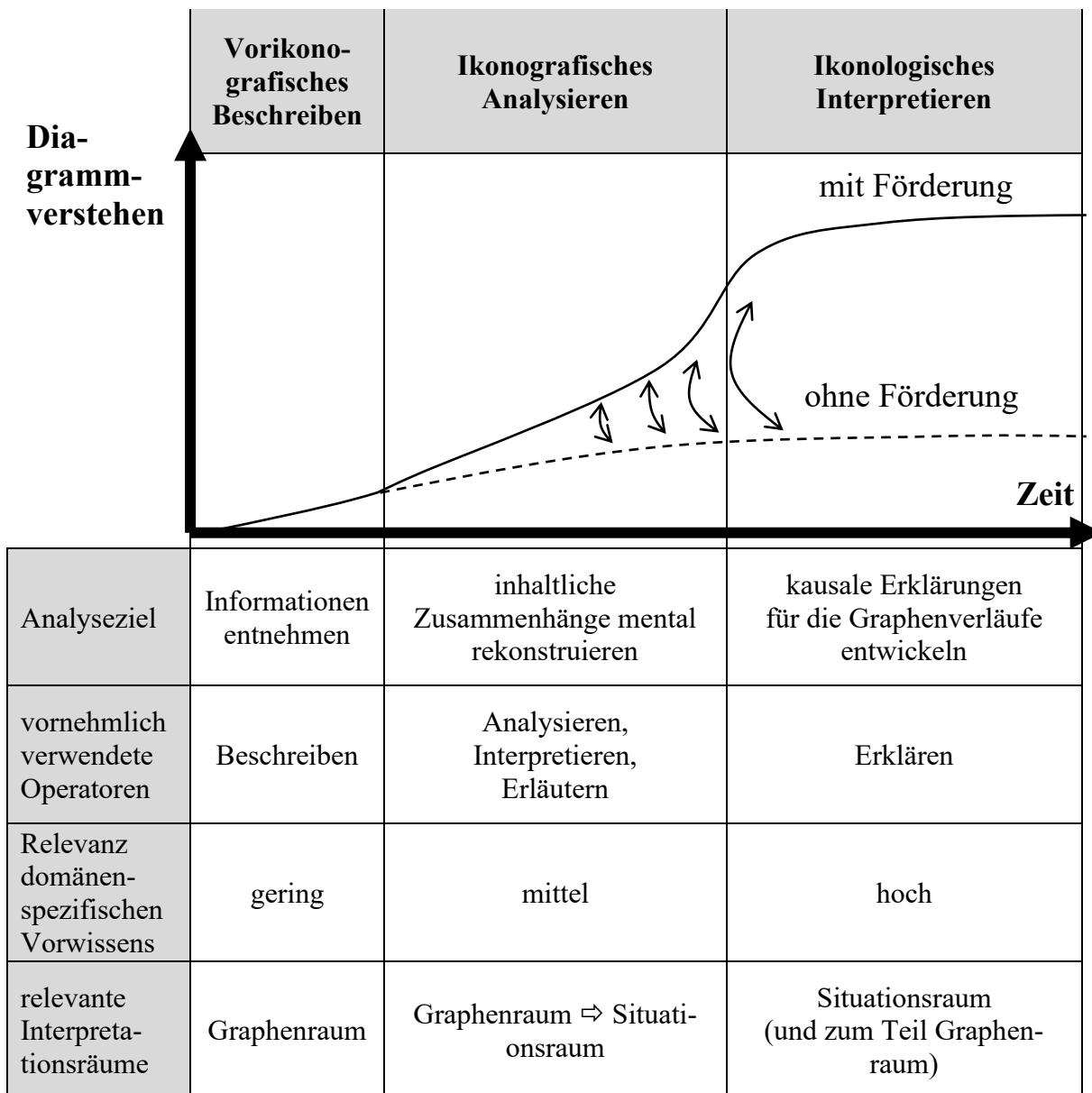


Abbildung 37. Prozessmodell des Diagrammverstehens, gegliedert in vorikonografisches Beschreiben, ikonografisches Analysieren und ikonologisches Interpretieren (eigene Darstellung)

Anhand der Graphenverläufe in Abbildung 37 wird angedeutet, dass es wenig effektiv erscheint, Lernende bei der vorikonografischen Beschreibung des Diagramms zu unterstützen. Lernende haben in empirischen Studien, die sich dieser Phase zuordnen lassen, nahezu keine Probleme gezeigt (siehe Ausführungen zur kompetenzorientierten Perspektive in Abschnitt 4.2). Auch eine unmittelbare und direkte Förderung des ikonologischen Interpretierens (letzte Phase in Abbildung 37) erscheint wenig effektiv. Bevor diese Phase überhaupt sinnvoll gefördert werden kann, ist zunächst zu gewährleisten, dass die Lernenden im Rahmen der ikonografischen Analyse des Diagramms (mittlere Phase in Abbildung 37)

eine fachlich geeignete mentale Repräsentation konstruieren. Erst wenn Lernende über eine solche verfügen, ist es ihnen überhaupt möglich, eine angemessene ikonologische Interpretation des Diagramms bzw. der referierten Inhalte durchzuführen (siehe Ausführungen zur Vorbereitung des Diagrammerklärens durch das Diagramminterpretieren in Abschnitt 3.4 und den Abschnitten 5.2.2 und 5.2.3). Es wird daher angenommen, dass Lernende leichter bzw. auf einem höheren Verstehensniveau in der Phase des ikonologischen Interpretierens – der eigentlichen Genese neuen Wissens – agieren können, je besser es ihnen beim ikonografischen Analysieren gelingt, die grafisch in dem Diagramm referierten Zusammenhänge mental zu rekonstruieren (siehe Pfeile zwischen den Graphen in Abbildung 37).

Vor diesem Hintergrund erscheint es besonders effektiv, Lernende mithilfe von Fördermaßnahmen bereits frühzeitig bei ihrer ikonografischen Analyse, insbesondere bei der Konstruktion eines geeigneten Situationsraums, zu unterstützen, um ihnen auf diese Weise indirekt das ikonologische Interpretieren, und damit insbesondere auch das Erklären des Diagramms, zu erleichtern. Dies deckt sich insbesondere auch mit den Überlegungen von Panofsky (1975). Dieser schreibt der ikonografischen Analyse eine vorbereitende Funktion für die ikonologische Interpretation zu und betrachtet sie als eine „gewissermaßen dienende Disziplin“ (ebd., S. 41) und als „die notwendige Grundlage für jede weitere Interpretation“ (ebd., S. 41).

Obgleich durch das Prozessmodell ein erster Ansatz zur Strukturierung des Diagrammverstehens entwickelt wurde, sei der vorläufige Charakter dieses Ansatzes betont. Die Vorläufigkeit beruht insbesondere darauf, dass es auf Grundlage der bisher beschriebenen Erkenntnisse noch nicht möglich ist, wie in Abschnitt 5.2.3 bereits angedeutet wurde, die überaus komplexe Phase des ikonologischen Bildinterpretierens angemessen auf das Diagrammverstehen zu übertragen.

5.3. Identifikation potenzieller Förderkonzepte

Die eigentliche Beantwortung von Forschungsfrage 2 (*Wie soll gefördert werden?*), die durch die Beantwortung der Unterfragen U1 und U2 vorbereitet wurde, erfolgt nachfolgend in drei Schritten.

In Schritt 1 (siehe Abschnitt 5.3.1) wird zunächst eine Literaturstudie durchgeführt, um Arbeiten zu identifizieren, die vor dem Hintergrund der bereits gewon-

nenen Erkenntnisse Ansätze zur Förderung des Diagrammverstehens liefern. Darauf aufbauend werden in Schritt 2 (siehe Abschnitt 5.3.2) aus der Literatur Förderkonzepte deduziert, die geeignet erscheinen, das Diagrammverstehen der Lernenden, insbesondere vor dem Hintergrund der bereits diskutierten Probleme und Förderbedarfe und mit besonderem Fokus auf die Phase der ikonografischen Analyse, zu fördern. Die deduzierten Förderkonzepte werden nachfolgend in Schritt 3 (siehe Abschnitt 5.4) in verschiedenen Voruntersuchungen empirisch erprobt.

Im Rahmen von Forschungsfrage 3 (siehe Kapitel 0) werden die Förderkonzepte dann zu konkreten Fördermaßnahmen spezifiziert.

5.3.1. Analyse empirischer Studien

In Hinblick auf eine spezifische Förderung des Diagrammverstehens konnten zwei empirische Arbeiten identifiziert werden, deren Erkenntnisse, für das hier durchgeführte Forschungsvorhaben besonders relevant erscheinen: die experimentellen Untersuchungen von Mautone und Mayer 2007 sowie von Tsuji 2011. Die beiden Studien werden im Folgenden intensiv analysiert.

Mautone und Mayer (2007) untersuchten anhand von Diagrammen mit geografischen Inhalten, ob sich die Fähigkeiten von Lernenden, a) Zusammenhänge inhaltlich zu beschreiben und b) Graphenabschnitte kausal zu erklären, mithilfe instruktionaler Maßnahmen fördern lassen. Beide Aktivitäten betrachten sie als essenziell für Lernende, damit diese an der wissenschaftlichen Community partizipieren können:

„Two important goals of scientific communication (including graphs) are to describe and explain how things work – relational statements reflect scientific description, and causal statements reflect scientific explanation” (Mautone & Mayer 2007, S. 640).

Wie in Abbildung 38 dargestellt, nutzten die Autor*innen zur Förderung drei unterschiedliche Arten kognitiver Hilfen, *Signaling-Maßnahmen*, *Structural Graphic Organizer* und *Concrete Graphic Organizer*.

Unter *Signaling* verstehen die Autoren Maßnahmen (z. B. Konstruieren von Überschriften und Nummerierungen), um Schlüsselinformationen im Diagramm und Beziehungen zwischen Informationen explizit hervorzuheben (vgl. dazu auch Mautone & Mayer 2001; Mayer 2003). Die Lernenden müssen die zugehö-

rigen Signaling-Tätigkeiten nicht zwangsläufig selbst durchführen, sondern können die Informationen auch aufbereitet erhalten. Die Autor*innen haben den Lernenden beispielsweise Untersuchungsdiagramme schrittweise dargeboten, anstatt ihnen diese von Anfang an vollständig zu präsentieren. Zudem haben sie mithilfe von Pfeilen relevante Aspekte hervorgehoben (vgl. dazu auch *Segmenting* in Mayer 2005). Sie betonen, dass den Lernenden dadurch keine zusätzlichen Informationen vermittelt wurden, sondern lediglich ihre Aufmerksamkeit gelenkt wurde (vgl. Mautone & Mayer 2007).

Structural Graphic Organizer unterstützen, ähnlich wie Signaling-Maßnahmen, die Lernenden dabei relevante Informationen im Diagramm zu selektieren und zu organisieren. Beispielsweise konnten die Lernenden an einem Diagramm mit vergleichbarer Syntax, aber anderem Inhalt, exemplarisch üben, die in einem Diagramm grafisch dargestellten Zusammenhänge zu identifizieren und das Diagramm zu strukturieren (vgl. ebd.).

Anders als *Signaling*-Maßnahmen und *Structural Graphic Organizer*, die in der Studie von Mautone und Mayer (2007) vornehmlich das inhaltliche Beschreiben des Diagramms erleichtern sollten, dienten *Concrete Graphic Organizer* dazu, das Vorwissen der Lernenden zu aktivieren und/oder geeignetes Vorwissen zu vermitteln. Dazu gehörte beispielsweise grafisches Material, das den Lernenden vorab gegeben wurde und Analogien oder zusätzliche bildliche Informationen über die Variablen des Diagramms enthielt. Ziel war es, durch Aktivierung des Vorwissens die mentale (Re-)Konstruktion der grafisch zusammengefassten Diagramminhalte und deren Integration mit dem Vorwissen zu erleichtern (vgl. ebd.).

Die Effektivität der einzelnen Maßnahmen untersuchten die Autor*innen mithilfe eines Interventions-Kontrollgruppen-Designs. Die Ergebnisse zeigen – entsprechend der Erwartungen –, dass Lernende, die mittels *Signaling*-Maßnahmen oder *Structural Graphic Organizer* unterstützt wurden, bei der Beschreibung des Diagramms mehr inhaltliche Zusammenhangsaussagen verbalisierten als Lernende, die keinerlei Maßnahmen erhielten. Auf das kausale Erklären von Graphenverläufen hatten die beiden organisierenden Maßnahmen dagegen keinen Einfluss (siehe Abbildung 38). Lernende, die vorwissensaktivierende *Concrete Graphic Organizer* erhielten, lieferten dagegen mehr kausal erklärende Aussagen als Lernende der Kontrollgruppe, die keinerlei Maßnahme erhielten; auf das Verbalisieren von Zusammenhangsaussagen hatten *Concrete Graphic Organizer* dagegen keinen Einfluss (vgl. ebd.).

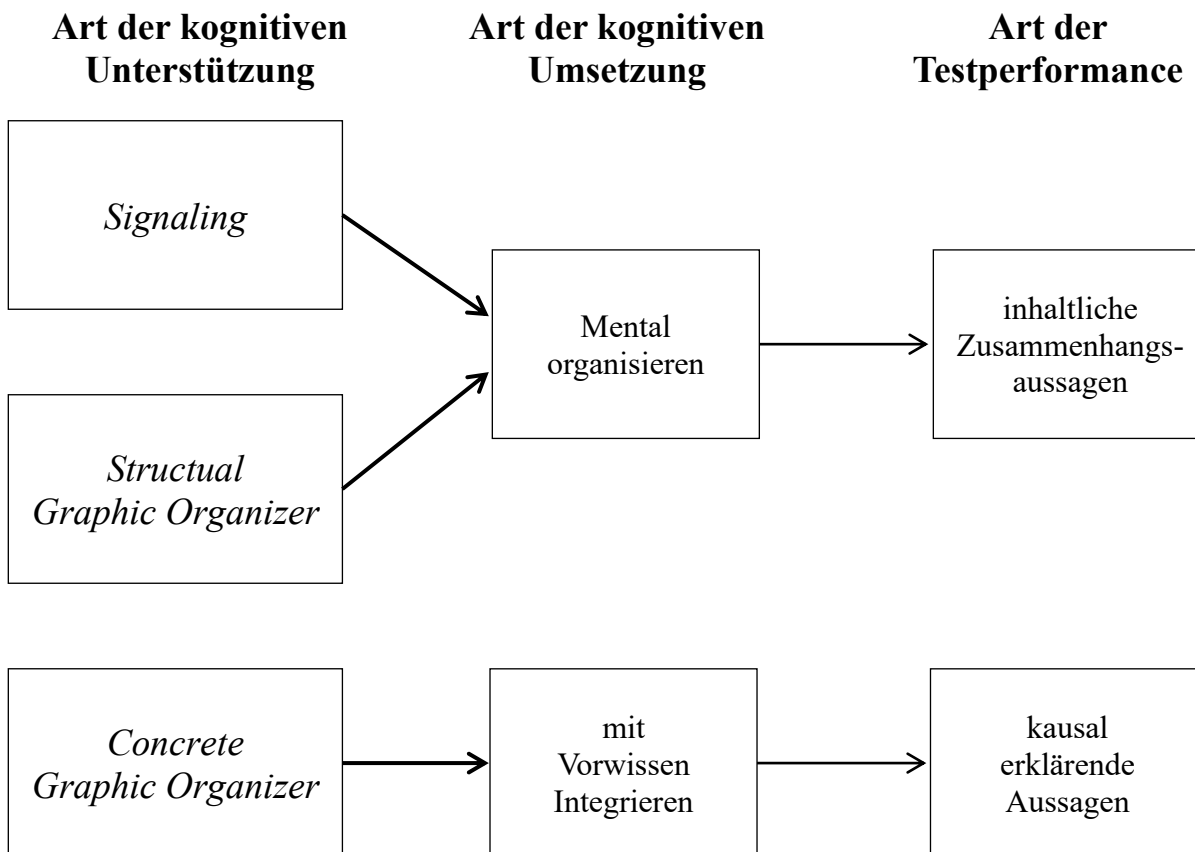


Abbildung 38. Zusammenhang zwischen kognitiven Hilfen und inhaltlichen Zusammenhangaussagen- sowie kausal erklärenden Aussagen (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Mautone & Mayer 2007, S. 641).

Wurden aufmerksamkeitsfokussierende *Signaling*-Maßnahmen und vorwissensaktivierende *Concrete Graphic Organizer* in Kombination eingesetzt, so stiegen sowohl die beschreibenden als auch die kausal erklärenden Aussagen im Vergleich zur Kontrollgruppe statistisch signifikant an (ebd., S. 643). Eine Kombination von *Structural Graphic Organizern* und vorwissensaktivierenden Maßnahmen (*Concrete Graphic Organizer*) wurde von den Autor*innen leider nicht untersucht. Dies wäre insbesondere auch deshalb interessant gewesen, weil unter Verwendung der *Structural Graphic Organizer* ein höherer Effekt auf die Steigerung von Zusammenhangaussagen gemessen werden konnte als unter Verwendung der aufmerksamkeitsfokussierenden *Signaling*-Maßnahmen (vgl. ebd.). Schlussfolgerungen sollten allerdings mit Vorsicht aus der Untersuchung von Mautone und Mayer (2007) abgeleitet werden. Ihre Stichproben waren relativ klein und die Anzahl der von den Lernenden kausal erklärten Diagrammaspekte sehr gering. Trotz erheblichem Instruktionsaufwand waren die Lernenden der Interventionsgruppe im Durchschnitt lediglich in der Lage, etwas mehr als einen von vier möglichen Diagrammaspekten zu erklären. Noch desaströser erscheint

dieses Ergebnis, wenn berücksichtigt wird, dass in die Berechnung auch Erklärungen einbezogen wurden, die nicht unbedingt fachlich korrekt waren:

„Participants received credit for a causal statement if they provided a plausible cause or reason behind the relationship pattern of the variables shown in the graph. In order to receive credit, the reason had to be plausible and correspond in some way to the data presented in the graph (though they did not necessarily have to be accurate, i.e., correspond to science-based explanations of the phenomena depicted in the graph)“ (ebd., S. 646).

Zudem sollte berücksichtigt werden, dass sich der theoretische Ansatz der beiden Autor*innen von dem in dieser Arbeit gewählten Ansatz unterscheidet: Anstatt eine prozessuale Sichtweise auf das Diagrammverstehen einzunehmen, nutzten Mautone & Mayer (2007) zur theoretischen Fundierung das kognitionspsychologische *Selection-, Organisation- und Integration-Modell (SOI-Modell)* nach Mayer (1996).⁷¹

Tsuji (2011) untersuchte in drei Experimenten, wie Expert*innen und Noviz*innen einfache Diagramme mit Inhalten aus den Bereichen Psychologie und Wirtschaft verbal beschreiben und kausal erklären. Als Expert*innen wählte er Promotionsstudierende, als Noviz*innen Studierende im ersten Semester. In Experiment 1 verglich Tsuji die Expert*innen und Noviz*innen dahingehend, ob sie ihnen dargebotene Diagramme als unterschiedlich komplex einstufen. In Experiment 2 untersuchte er, ob sich die Expert*innen und Noviz*innen beim Beschreiben und Erklären⁷² von Diagrammen unterschieden. Dabei ermittelte er insbesondere, welche Strategien und Vorgehensweisen Expert*innen beim Analysieren von Diagrammen nutzten. Die Erkenntnisse nutzte Tsuji (2011), um

⁷¹ Mayer (1996) unterscheidet drei wesentliche kognitive Prozesse: Selektion, Organisation und Integration. Er nimmt an, dass Lernende beim Lernen zunächst Informationen selektieren, mental organisieren und dann mit dem Vorwissen zu einer kohärenten mentalen Repräsentation integrieren (vgl. ebd.).

⁷² Tsuji (2011) bezeichnet in seiner Arbeit die Wiedergabe der in dem Diagramm enthaltenen Informationen allgemein als Erklärung des Diagramms und spricht in Bezug auf das kausale Erklären der Inhalte von *causal inferences* oder *because themes*. Als kausale Erklärungen wertet Tsuji (2011) solche Erklärungen, die auf der Grundlage von Vorwissen gegeben werden, wie beispielsweise „insomniacs apparently have more work problems than controls do, uh probably because they just don't get enough sleep so they have trouble at work“ (ebd., S. 63) oder „don't know whether they've had a change in government or if officials have just gotten a lot more corrupt but ... for whatever reason corruption was really low in 2007“ (ebd., S. 58).

Analysestrategien zu entwickeln und sie den Noviz*innen im Rahmen einer kurzen Intervention (durchschnittlich 3,5 Minuten) zu vermitteln. In Experiment 3 überprüfte er den Erfolg seiner Intervention (vgl. ebd.). Tsuji (2011) nimmt somit eine stärker prozessuale Sichtweise auf das Diagrammverstehen ein als Mautone und Mayer (2007).

Anhand von *Experiment 1* konnte Tsuji (2011) zeigen, dass Noviz*innen die ihnen dargebotenen Diagramme als semantisch komplexer einstufen als Expert*innen (vgl. ebd.). In *Experiment 2* konnte er zeigen, dass die Beschreibungen und die kausalen Erklärungen von Expert*innen vollständiger waren als die von Noviz*innen. Expert*innen verglichen wesentlich häufiger Graphen und Graphenabschnitte miteinander, machten mehr konkrete quantitative Aussagen, zogen häufiger qualitative Schlussfolgerungen und gaben mehr⁷³ kausale Erklärungen für Graphenverläufe als Noviz*innen. Zusätzlich unterschieden sich Expert*innen und Noviz*innen darin, wie sie ihre Erklärung vorbereiteten. Expert*innen identifizierten – ähnlich wie auch in vorausgegangenen Studien gezeigt werden konnte (vgl. Maichle 1994; Carpenter & Shah 1998) – zunächst den Rahmen des Diagramms (Achsen, Labels etc.), strukturierten das Diagramm und konzentrierten sich erst danach auf das Erklären ausgewählter Graphenverläufe. Tsuji (2011) spricht in diesem Zusammenhang von einer „consistent serial order“ (ebd., S. 60). Es sei insbesondere darauf hingewiesen, dass die von Tsuji (2011) bei Expert*innen beobachtete serielle Abfolge von Diagrammanalysesritten, in den Grundzügen der im Prozessmodell des Diagrammverstehens postulierten Abfolge entspricht (siehe Abbildung 37 in Abschnitt 5.2.4). Die Noviz*innen zeigten dagegen kein systematisches Vorgehen beim Strukturieren und Beschreiben der Diagramme. Ähnlich wie auch von anderen Autor*innen beobachtet (vgl. Preece & Janvier 1992, 1993; Maichle 1994), betrachteten Noviz*innen Diagramme perzeptuell und konzentrierten sich vornehmlich auf leicht zugängliche, visuelle Elemente (vgl. Tsuji 2011). Zusätzlich dazu konnte Tsuji (2011) zeigen, dass Noviz*innen insgesamt doppelt so viel Zeit wie Expert*innen benötigten, um sich mit dem Diagramm vertraut zu machen, bevor sie eine erste Aussage über das Diagramm formulieren konnten (vgl. ebd.). Er vermutet, dass defizitär ausgeprägte Diagrammschemata (vgl. Pinker 1990: siehe Abschnitt 3.8.2.1) der Noviz*innen dafür verantwortlich

⁷³ Es sei darauf hingewiesen, dass die untersuchten Expert*innen zwar prinzipiell mehr kausale Erklärungen als Noviz*innen lieferten, allerdings zeigten auch Expert*innen erhebliche Probleme beim Erklären von Graphenverläufen.

seien und dass die Noviz*innen über unzureichende Metastrategien verfügten, um das Diagramm systematisch zu analysieren. Letzteres bedinge, dass die Noviz*innen in dem Diagramm keinen Ansatzpunkt finden, um eine geeignete Problemlösestrategie auszuwählen (vgl. ebd.).

In *Experiment 3* vermittelte Tsuji (2011) den Noviz*innen daher die folgenden Analyse-Strategien, die er aus dem Vorgehen der Expert*innen abgeleitet hatte (ebd., S. 75-76):

- 1) „Describe⁷⁴ as much of the visual characteristics as you can. It will help you later when you explain the graphs.”
- 2) „Read the graph title out loud and then match parts of the title to the vertical axis, horizontal axis, and each of the two lines in the graph.”
- 3) „Look at the area between the lines. Are the lines parallel? Do they cross? Does one go up and the other down? Do they share any points in common?”
- 4) „Consider cause and effect. What causes the lines to go up, go down, or to stay the same? Is that cause operating equally on one line versus the other?”

Die Strategien wurden den Noviz*innen in Form von Instruktionen sukzessive auf einem Computer präsentiert. Jede Instruktion sollte mündlich an einem Beispielgraphen eingeübt werden. Der Prä-Posttest-Vergleich zeigte, dass nach der Intervention die Noviz*innen statistisch höchstsignifikant häufiger die Variablen auf der X- und Y-Achse ablesen konnten, häufiger (allerdings statistisch nicht signifikant) Graphen und Trends miteinander verglichen und statistisch hochsignifikant häufiger kausale Erklärungen für die Graphenverläufe entwickelten⁷⁵. Die vergleichsweise geringe Zunahme von vergleichenden Aussagen erklärt Tsuji (2011), aufbauend auf Untersuchungen von Shah und Carpenter (1995; siehe dazu auch Carpenter & Shah 1998), damit, dass das Vergleichen von Graphen eine kognitiv anspruchsvolle Leistung sei, die durch derartige „simple instructions“ (ebd., S. 78) nicht signifikant verbessert werden könne.

⁷⁴ Die Beschreibung bezieht sich hier auf Diagramme ohne Variablen, Skalen etc., die nur den reinen Linienvorlauf zeigen. Es handelt sich dabei um eine Vorbereitung auf das tatsächliche Diagramm, auf das sich die Strategien 2 bis 4 beziehen.

⁷⁵ Es sei darauf hingewiesen, dass die Noviz*innen im Vortest praktisch keine kausalen Aussagen formuliert hatten und dass trotz der Maßnahmen die Anzahl entsprechender Erklärungen immer noch sehr gering war (vgl. Tsuji 2011).

Auch das strategische Vorgehen der Noviz*innen konnte durch die Instruktion nicht verbessert werden. Nach der Instruktion zeigten die Noviz*innen weiterhin kein konsequent-systematisches Vorgehen beim Beschreiben und Erklären. Allerdings benötigten sie nach der Intervention weniger Zeit, um ihre Aussagen zu formulieren. Tsuji (2011) vermutet daher, dass die Instruktionen den Noviz*innen in erster Linie geholfen hätten, einen Zugang zu den Inhalten des Diagramms zu gewinnen (vgl. ebd.). Da Tsuji (2011) vermutet, dass die Probleme von Noviz*innen im Umgang mit Diagrammen vor allem auf unvollständige oder fehlerhafte Lese- bzw. Analysestrategien zurückzuführen seien, rät er, in weiteren Interventionsstudien explizit Instruktionen oder Strategien zu vermitteln, die dabei helfen, das Lesen, Beschreiben und Erklären in einer seriellen Reihenfolge durchzuführen (vgl. ebd.).

5.3.2. Deduktion von Förderkonzepten

5.3.2.1 Einführung in die drei Förderkonzepte KA, S und EI

Unter der Annahme, dass eine systematische Interpretation (ikonografische Analyse) das kausale Erklären von Graphenverläufen (ikonologische Interpretation) vorbereitet und fördert, werden im Folgenden Förderkonzepte aus der Literatur deduziert. Als theoretische Grundlage fungieren dazu – vor dem Hintergrund der prozessualen Ausführungen zum Diagrammverstehen in Abschnitt 5.2.4 – insbesondere die in den vorausgegangenen Kapiteln beschriebenen Ausführungen von Leinhardt et al. (1990), Janvier (1978) bzw. Ferry (1997) sowie Roth und Bowen (2001, siehe auch 2003; Roth et al. 2002). Die genannten Autor*innen nehmen an, dass Diagrammverstehen dadurch eintritt, dass Diagrammleser*innen in einem überaus arbeitsintensiven Lese- bzw. Analyseprozess die grafische Darstellung durch die mentale (Re-)Konstruktion der inhaltlich referierten Situation zunehmend elaborieren und gleichzeitig von der referierten inhaltlichen Situation abstrahieren (siehe Abbildung 39). Die Leser*innen führen dabei die konstruierten mentalen Repräsentationen, die mentale Repräsentation der grafischen Darstellung und die der inhaltlichen Situation, aufeinander zu und integrieren diese miteinander.

Im Folgenden wird vor dem Hintergrund der bisherigen Ausführungen angenommen, dass sich dieser iterative Translationsprozess mithilfe von drei Förderkon-

zepten, der *kognitiven Aktivierung* (KA), der Unterstützung bei der *Strukturierung* (S) und der Unterstützung bei der *elaborativen Interrogation* (EI), unterstützen lässt (siehe Abbildung 39).

Basierend auf theoretischen Erkenntnissen zum semiotischen Diagrammverstehen (siehe Abschnitt 4.4.1) und insbesondere basierend auf empirischen Erkenntnissen zum Einfluss des Vorwissens beim Diagrammverstehen (siehe Abschnitt 4.4.2) wird vermutet, dass es förderlich für das Diagrammverstehen ist, wenn Diagrammleser*innen, noch bevor sie das Diagramm intensiv analysieren, zunächst dazu angeregt werden, ihr Vorwissen zu aktivieren und einen vorläufigen, unspezifischen Situationsraum konstruieren, in den sie nachfolgend Informationen aus dem Diagramm einordnen können (Förderkonzept 1 – *Kognitive Aktivierung*, kurz: KA).

Danach werden sie, ebenfalls basierend auf theoretischen Erkenntnissen zum semiotischen Diagrammverstehen (siehe Abschnitt 4.4.1) und zum Vorgehen von Expert*innen beim Diagrammverstehen (siehe Abschnitt 4.4.2.1), im Rahmen von Förderkonzept 2, *Strukturierung* (S), dazu angeleitet das Diagramm in bedeutungsvolle Zeichen zu strukturieren (vgl. dazu insbesondere Ausführungen Roth & Bowen 2001, 2003; Roth 2002). Die grafische Darstellung wird durch das Strukturieren elaboriert; der zunächst vorläufig konstruierte, unspezifische Situationsraum wird reduktiv-organisiert und spezifiziert (siehe Pfeile in Abbildung 39; vgl. insbesondere Roth & Bowen 2001). Nachfolgend werden die Leser*innen im Rahmen von Förderkonzept 3, *Elaborative Interrogation* (EI), unterstützt, die im Rahmen der Strukturierung gebildeten Zeichen zu interpretieren und Fragen an das Diagramm bzw. den konstruierten Situationsraum zu stellen. Die Leser*innen aktivieren so ihr spezifisches Vorwissen zu Mechanismen und Theorien und vernetzen verschiedene inhalts- bzw. erklärungsrelevante Elemente, um die Graphenverläufe im Diagramm kausal zu erklären (siehe dazu insbesondere Ausführungen zum vernetzenden Denken bzw. zu Translationen im Situationsraum in Abschnitt 3.7.2). Sie elaborieren dadurch, zusätzlich zu der Strukturierung, die grafische Darstellung und reduzieren die referierte inhaltliche Situation auf die relevanten Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge. Letztendlich erweitern sie so sukzessive ihr mentales Modell der grafisch referierten Zusammenhänge (siehe zunehmendes Dreieck in Abbildung 39).

Die hier nur kurz beschriebenen drei Förderkonzepte werden in den nachfolgenden Abschnitten ausführlicher vorgestellt. Die konkrete Entwicklung instruktionaler Maßnahmen erfolgt aufbauend auf den Förderkonzepten in Abschnitt 6.2.1.

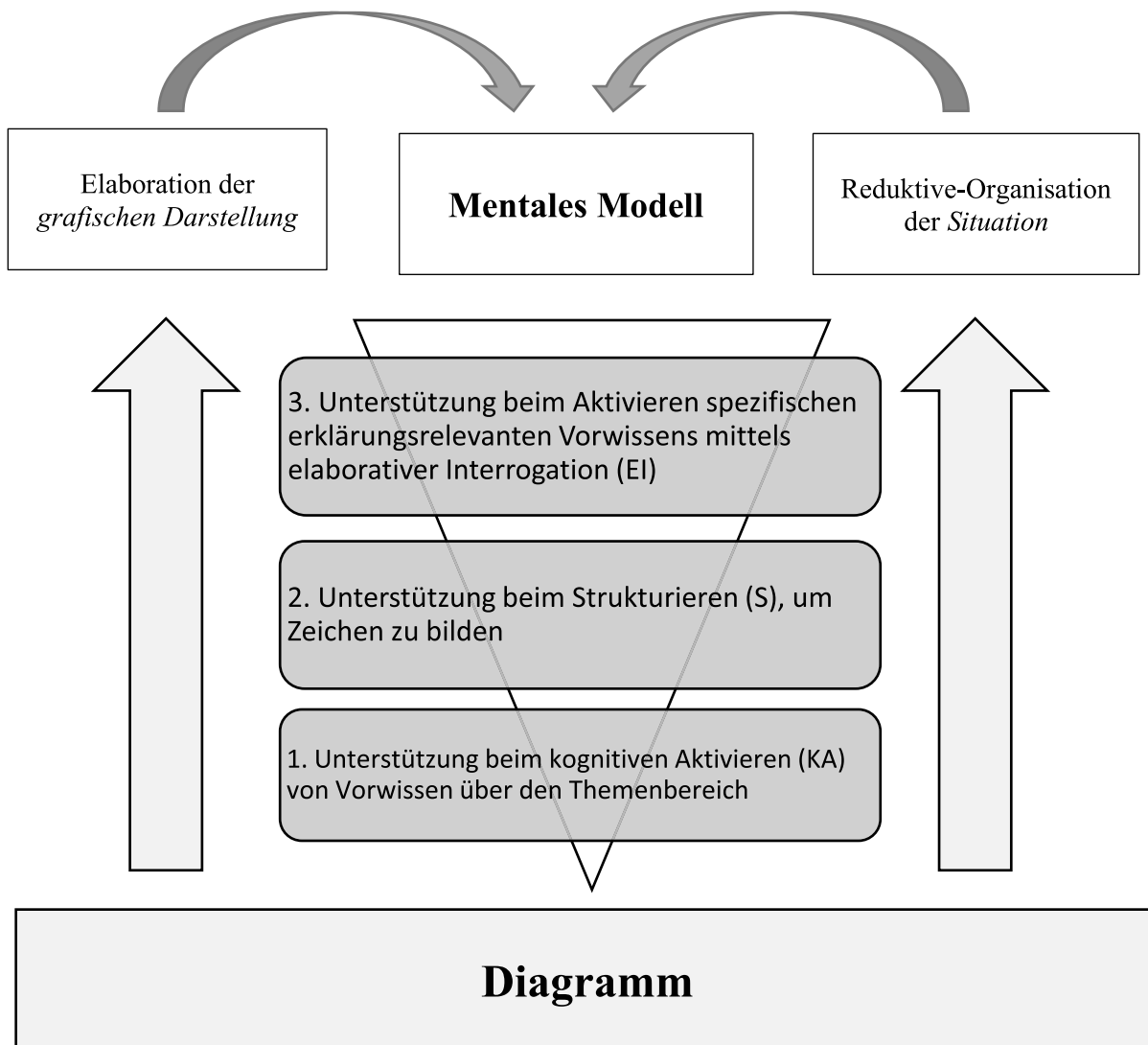


Abbildung 39. Zusammenhang zwischen Förderkonzepten und Diagrammverstehen (eigene Darstellung)

5.3.2.2 Förderkonzept: Kognitive Aktivierung (KA)

Entsprechend der vorausgegangenen Ausführungen wird angenommen, dass es Lernenden, die mit der referierten inhaltlichen Situation eines Diagramms vertraut sind, wesentlich leichter fällt, das Diagramm inhaltlich in sinnvolle Zeichen zu strukturieren, als Lernenden, die mit der entsprechenden Situation nicht vertraut sind (siehe dazu insbesondere Ausführungen zur Translation nach Janvier 1978 und zu Verstehensinseln nach Bell & Janvier 1981 in Abschnitt 3.7.1). Daraus wird geschlussfolgert, dass, wenn es Diagrammleser*innen gelingt, sich die referierte Situation vorzustellen, sie leichter von den grafischen Attributen des Diagramms abstrahieren und dessen Inhalte interpretieren können (siehe Abschnitt 4.4.2; vgl. zusätzlich Koedinger & Anderson 1990).

Es erscheint daher sinnvoll, die Lernenden kognitiv zu aktivieren, bevor sie das Diagramm analysieren bzw. strukturieren. Kognitive Aktivierung ist hier allerdings nicht als spezifische Methode oder konkrete Maßnahme zu verstehen, sondern als Konglomerat verschiedener Strategien und Methoden, mit dem Ziel, Lernende aktiv in einen Lese- bzw. Lernprozess zu involvieren (vgl. z. B. Lotz 2015; Renkl 2009). So formuliert beispielsweise Lotz (2015): „Als kognitive Aktivitäten können alle mentalen Prozesse einer Person gelten, die der Aufnahme, Verarbeitung und dem Abruf von Informationen dienen“ (ebd., S. 24). Hinsichtlich des Verstehens von Liniendiagrammen scheint es vor dem Hintergrund der hier bisher beschriebenen empirischen Studien jedoch vor allem sinnvoll, das domänenspezifische Vorwissen der Lernenden zu aktivieren, damit es ihnen leichter fällt, die referierte Situation mental zu rekonstruieren. Untersuchungen zur Wirksamkeit einer solchen Form der Vorwissensaktivierung finden sich zum Beispiel für das Verstehen kontinuierlicher Texte (vgl. Bransford & Johnson 1972; Schwartz & Bransford 1998; Carr & Thompson 1996; Alvarez & Risko 1988), das Lernen mit Computersimulationen (vgl. Reid, Zhang & Chen 2003) und das Verstehen diskontinuierlicher Texte (vgl. Ainsworth & Loizou 2003; Cox 1999; siehe dazu insbesondere die Instruktionsstudie von Mautone & Mayer 2007 in Abschnitt 5.3.1). Verschiedene Maßnahmen wurden bereits erfolgreich zur Aktivierung von Vorwissen eingesetzt: Multiple-Choice-Aufgaben (vgl. Reid et al. 2003), das Konstruieren von Überschriften (vgl. Surber & Schroeder 2007; Bransford & Johnson 1972), Abbildungen, Diagrammen oder Concept-Maps (vgl. Wetzels, Kester & van Merriënboer 2011; Gurlitt & Renkl 2008; Zheng et al. 2012; Van Meter et al. 2006); problembasierte Diskussionsrunden (vgl. de Grave, Schmidt & Boshuizen 2001); Mobilisationsmethoden (vgl. Peeck 1982; Machiels-Bongaerts, Schmidt, & Boshuizen 1993), Instruktionen zum Perspektivwechsel (vgl. Goetz et al. 1983; Pichert & Anderson 1977) sowie Self-Questioning und Self-Explaining (vgl. Chi et al. 1989; Chi et al. 1994; King 1989; 1992; 1994; Ainsworth & Loizou 2003; Cox 1999; Aleven & Koedinger, 2002). Insbesondere der Einsatz verschiedener, kürzerer Aufgaben, die miteinander kombiniert werden, wird von Urhahne und Harms (2006) als besonders förderlich eingeschätzt, um Lernende kognitiv zu aktivieren (vgl. ebd.).

5.3.2.3 Förderkonzept: Strukturierung (S)

Das semiotische Strukturieren eines Diagramms in Zeichen (siehe Abschnitt 4.4.1.3) scheint Lernenden den Zugang zum Diagramm bzw. den grafisch referierten Inhalten zu erleichtern. Das semiotische Strukturieren ähnelt dem in Abschnitt 3.8.2.2 aus kognitionswissenschaftlicher Sicht beschriebenen Prozess des Strukturierens durch Bildung von Chunks – kurz: Chunking (vgl. z. B. Maichle 1994; Xi 2005; Katz et al. 2002; Carpenter & Shah 1998; Shah 1997; Shah et al. 1999; Carswell et al. 1993; Tsuji 2011; Phillipp 2008). In beiden Strukturierungsprozessen, dem semiotischen Strukturieren und dem Chunking, wird das Diagramm in Abschnitte eingeteilt. Allerdings unterscheiden sich semiotisches Strukturieren und Chunking hinsichtlich ihrer Funktion.

Chunking dient dazu, die kognitive Belastung des Arbeitsgedächtnisses zu reduzieren. Chunking scheint folglich insbesondere dann hilfreich zu sein, wenn Diagrammleser*innen bei der Analyse eines (komplexen) Diagramms mittels analytischer Strategien kognitiv überfordert werden (siehe Abschnitte 3.8.3 und 4.3.2.3). Vor dem Hintergrund der Ausführungen in Abschnitt 3.8.3 ist anzunehmen, dass wenn Diagrammleser*innen ein Diagramm in kleinere Informationsabschnitte chunken, sie dadurch ihre kognitive Belastung (ICL und/oder ECL) reduzieren können. Die einzelnen Informationsabschnitte können dann leichter im Arbeitsgedächtnis verarbeitet und zu größeren kohärenten Zusammenhanggefügen bzw. einem mentalen Modell verbunden werden (vgl. Gerjets et al. 2004; Pollock et al. 2002; siehe auch Ausführungen zum integrativen Diagrammverstehen in Abschnitt 3.8.2.2). Zur Durchführung entsprechender Chunkingprozesse müssen die Diagrammleser*innen allerdings über geeignete Problemlösestrategien verfügen (vgl. Gerjets et al. 2004; Pollock et al. 2002).

Semiotisches Strukturieren hat im Gegensatz zum Chunking zum Ziel, die Leser*innen in den Interpretationsprozess einzuführen. Das semiotische Strukturieren entlastet das Arbeitsgedächtnis daher nicht, sondern belastet es gezielt. In Abschnitt 3.8.3 wurde in diesem Zusammenhang von der Investition lernförderlicher mentaler Energie (GCL bzw. AIME) gesprochen.

Vor dem Hintergrund der genannten Ausführungen ist anzunehmen, dass die Aufgabenstellung und die Einbindung der jeweiligen Analysetätigkeiten in den Interpretationsprozess darüber entscheiden, welchen Effekt Strukturieren bzw. Chunking haben werden.

Verschiedene Forschungsarbeiten lassen darauf schließen, dass es notwendig ist, Diagrammleser*innen beim *Strukturieren*⁷⁶ (semiotisches Strukturieren und/oder Chunking) eines Diagramms gezielt zu unterstützen und anzuleiten (vgl. Hoffmann & Roth 2005; Mayer 2004; Klahr & Nigam 2004; Fallon et al. 2004; Mayer & Moreno 2003; Moreno & Mayer 2010). Moreno und Mayer (2010) nennen beispielsweise konkrete Maßnahmen wie Prompten, um es Lernenden zu erleichtern, Informationen aktiv zu selektieren und zu organisieren (vgl. ebd., siehe dazu auch Mayer 2004; Mayer & Moreno 2003). Hölting (2013) empfiehlt in ihrem Methodentraining, Lernende dabei zu unterstützen, sich zum Strukturieren auf Veränderungen des Graphenverlaufs zu konzentrieren. Um zu betonen, dass die Diagrammleser*innen dabei ebenso die referierten Inhalte berücksichtigen sollten, spricht sie hier von der Bildung von „Sinnabschnitten“ (ebd., S. 31). Zusätzlich zu der direkten Unterstützung beim Strukturieren scheint es vor allem auch förderlich zu sein, die Leser*innen vor der Anwendung entsprechender Strategien kognitiv zu aktivieren (siehe vorausgegangenen Abschnitt 5.3.2.2), damit ihnen die jeweiligen Strukturierungsprozesse leichter fallen (vgl. Zheng et al. 2012; Van Merriënboer et al. 2003).

5.3.2.4 Förderkonzept: Elaborative Interrogation (EI)

In den vorausgegangenen beiden Abschnitten wurden Konzepte beschrieben, um Lernenden die ikonografische Analyse, und damit das Interpretieren des Diagramms, zu erleichtern. Es finden sich allerdings auch Ansätze, von denen erwartet wird, dass sie zusätzlich dazu insbesondere auch das ikonologische Interpretieren, und damit vor allem das Erklären der durch das Diagramm grafisch referierten Inhalte, fördern. So liefern die in Abschnitt 4.4.2 beschriebenen Interviewstudien von Roth und Kollegen (z. B. Roth 2003) sowie die Studie von Ainley (1995) beispielsweise Hinweise dafür, dass Diagrammleser*innen durch das Stellen geeigneter Fragen an das Diagramm bei der Abstraktion (dem Wechsel vom Graphenraum in den Situationsraum) und der Elaboration des Situationsraums sowie bei der Suche nach Erklärungshypothesen für die Graphenverläufe innerhalb des Situationsraums gefördert werden können. Moreno und Mayer (2010) sowie verschiedene andere Autor*innen sprechen bezüglich des Stellens spezifischer inhaltlicher Fragen an Texte, um dadurch Ursache-Wirkungs-

⁷⁶ Inwieweit die zitierten Autor*innen zwischen semiotischem Strukturieren und Chunking differenzieren (können), soll hier nicht geklärt werden. Strukturierungsaktivitäten umfassen daher im Folgenden sowohl das semiotische Strukturieren als auch das Chunking.

Zusammenhänge zu ergründen, von *Elaborativer Interrogation (EI)*. Sie beschreiben dies zusammenfassend als „asking students to answer ‘why’ questions about information they have just read“ (ebd., S. 166).⁷⁷

Ziel der elaborativen Interrogation (EI) ist es, neue Informationen mit bereits vorhandenen Informationen zu vernetzen, um neues Wissen zu konstruieren (vgl. Ballstaedt 1997; Friedrich 2009; Schlag 2011; Friedrich & Mandl 2006; Moreno & Mayer 2010; Moreno et al. 2011; Seifert 1993; Dornisch, Sperling & Zeruth 2011; Graesser & Oelde 2003; Neber 2006; King 1994; Rosenshine, Meister, Chapman 1996; Christmann 2015 a, b; King 2007; Taboada & Guthrie 2006; Dunlosky et al. 2013). So formulieren beispielsweise Dornisch et al. (2011) „answering or posing EI questions improves understanding as learners connect new information with prior knowledge, making the to-be-learned information more meaningful and memorable to the learner“ (ebd., S. 3).

Als Mechanismus für den Erfolg elaborierend-interrogativer Strategien werden eine durch das Stellen der Fragen bedingte Steigerung von Schlussfolgerungsaktivitäten (vgl. Cromley et al. 2013b; Nokes et al. 2011) und eine Aktivierung von spezifischem, zumeist erklärungsrelevantem Vorwissen – und nicht wie im Fall der kognitiven Aktivierung (KA) von allgemeinem inhaltsrelevanten Vorwissen – vermutet (vgl. Krause & Stark 2006).

Empirisch konnten Neber und Anton (2008) beispielsweise zeigen, dass es sich als förderlich für das Lernen beim Experimentieren erweist, wenn Lernende eigenständig epistemische Fragen stellen. Levin und Arnold (2008) konnten zeigen, dass das Stellen verschiedener Fragen (Faktenfragen, Verständnisfragen, wissensstrukturbezogene Fragen und kritische Fragen) den Lernerfolg im Unterricht steigert. Ob die Lernenden die jeweiligen Fragen im Anschluss tatsächlich (fachlich korrekt) beantworteten, war für den Lernerfolg dagegen nicht relevant (vgl. ebd.).

⁷⁷ Die *elaborative Interrogation (EI)* besitzt Parallelen zum *Selbsterklären*, ist aber nicht mit diesem zu verwechseln. Bei der *elaborativen Interrogation* steht neben dem Beantworten/Erklären vor allem auch das Entwickeln elaborierender WIESO-Fragen an die Informationsbasis im Vordergrund. Beim *Selbsterklären* steht dagegen das eigenständige, reflektierende sich selbst Erklären im Vordergrund. Selbsterklären definieren Moreno und Mayer (2010) in Abgrenzung zum elaborativen Interrogieren als „asking students to explain their answers to problems during learning“ (ebd., S. 166; vgl. dazu auch Chi et al. 1994; Berthold & Renkl 2009; Berthold, Eysink & Renkl 2009). Beide Methoden werden von Moreno und Mayer (2010) als Selbstreflexionsprinzipien bezeichnet.

Allerdings finden sich auch verschiedene Hinweise darauf, dass Lernende nicht ohne Anleitung dazu fähig sind, geeignete Fragen zu formulieren (vgl. Neber 2004; Otero, Caldeira & Gomes 2004; Graesser, Baggett & Williams 1996). Ferner finden sich – in Übereinstimmung mit den vorausgegangenen Ausführungen – empirische Hinweise dafür, dass die Fähigkeit zum Stellen geeigneter, anspruchsvoller Fragen mit dem Grad des bereits vorhandenen Verständnisses des jeweiligen Sachverhaltes korreliert: Lernende, die Sachverhalte bereits auf einer inhaltlichen Ebene durchdrungen haben, stellen anspruchsvollere Fragen als Lernende, welche Zusammenhänge zuvor nur oberflächlich analysiert haben (vgl. Graesser & Olde 2003; Graesser et al. 2005).⁷⁸

5.4. Empirische Voruntersuchungen zur Spezifikation der Förderkonzepte

Zur empirischen Überprüfung der deduzierten Förderkonzepte und zur Vorbereitung der Hauptuntersuchung dieser Arbeit wurden drei empirische Voruntersuchungen im Rahmen von Masterarbeiten durchgeführt bzw. durch diese unterstützt (vgl. Inderelst 2014; Erning 2013; Gärtner 2014; siehe auch Jahnke, Lumer & Hammann 2015 zu einer Zusammenfassung der Ergebnisse von Inderelst 2014 und Gärtner 2014).

In den drei Studien wurde die Wirksamkeit der in den vorausgegangenen Abschnitten beschriebenen Konzepte zur Förderung des Diagrammverstehens quantitativ und qualitativ mittels Interviewstudien sowie die Übertragbarkeit der Konzepte auf verschiedene Diagramme untersucht. Zum Zeitpunkt der Durchführung der Voruntersuchungen wurde vornehmlich auf das Strukturieren (S) und das elaborative Interrogieren (EI) konzentriert. Der Einfluss des Förderkonzeptes kognitive Aktivierung (KA) wurde dagegen in den Vorstudien, aufgrund des damaligen Erkenntnisstandes, nicht explizit untersucht. Erkenntnisse darüber konnten allerdings retrospektiv aus den Interviewstudien gewonnen werden.

⁷⁸ Der beschriebene Zusammenhang ist nicht zwangsläufig linear. So liefern Otero et al. (2004) beispielsweise Hinweise dafür, dass die Beziehung in Form einer umgekehrten U-Kurve modelliert werden könnte: Während Lernende bei besonders leicht zu verstehenden und besonders schwer zu verstehenden Texten wenige kausale Fragen formulieren, erscheint eine mittlere Komplexität als besonders motivierend, kausale Fragen zu formulieren (vgl. ebd.). Verschiedene Studien stützen die Vermutung einer solchen invertierten U-förmigen Beziehung (vgl. Arts, Gijssels & Boshuizen 2006; Rao & Sieben 1992; Eppler & Mengis 2004; Hwang & Wu 1991; Rikers, Schmidt, Boshuizen 2000; Boshuizen & Schmidt 1992; Lesgold et al. 1988).

Zugunsten einer ausführlichen Analyse der Hauptuntersuchung wird über die Voruntersuchungen und die daraus gewonnenen Erkenntnisse im Folgenden lediglich komprimiert berichtet.

Bei der Entwicklung strukturierender (S) und elaborierend-interrogativer (EI) Strategien wurde sich an dem Methodentraining nach Hölting (2013) orientiert. Hölting (2013) rät dazu, Lernende anzuleiten,

- a) das Diagramm in Abschnitte zu strukturieren (siehe Ausführungen zum Konzept Strukturierung (S) in Abschnitt 5.3.2.3) und
- b) Wieso-/Warum-Fragen an die einzelnen Graphen und Abschnitte zu formulieren (siehe Ausführungen zum Konzept Elaborative Interrogation (EI) in Abschnitt 5.3.2.4).

In der ersten Voruntersuchung (vgl. Inderelst 2014) wurden die strukturierenden und elaborierend-interrogativen Strategien Lernenden in Form eines direkten Strategietrainings (vgl. Friedrich & Mandl 1992, 2006; Bannert & Reimann 2009; Schlag 2011) vermittelt. Die Wirksamkeit des Trainings wurde anhand eines Pretest-Posttest-Design mit Kontrollgruppe mithilfe eines Diagramms aus dem Themenbereich Genetik (Meiose) evaluiert (vgl. Inderelst 2014). Empirisch konnte gezeigt werden, dass die Kombination der beiden Strategien geeignet ist, die Leistung von Lernenden der Jahrgangsstufe 10 (EF, N = 20) beim Erklären von Graphenverläufen statistisch signifikant gegenüber der Kontrollgruppe (EF, N = 30) zu steigern (vgl. ebd.).

In einer weiteren Voruntersuchung (vgl. Erning 2013) zeigte sich zudem, dass zahlreiche für den Biologieunterricht relevante Liniendiagramme geeignet erscheinen, um deren Analyse durch die beiden Förderkonzepte, strukturieren (S) und elaborativ interrogieren (EI), zu unterstützen (vgl. ebd.).

In einer dritten Voruntersuchung wurden leitfragengestützte Interviews (N = 25, Jahrgangsstufe EF, jeweils ca. 90 Minuten) durchgeführt⁷⁹, um insbesondere zu überprüfen, inwieweit die Lernenden die strukturierenden (S) und elaborierenden-interrogativen Strategien (EI) eigenständig anwenden (vgl. Gärtner 2014 zur Auswertung von sieben der 25 Interviews). Zur Analyse wurden komplexe Diagramme aus dem Themenbereich Ökologie verwendet (insbesondere Räuber-Beute-Beziehungen). Um den Lernenden die Anwendung der beiden Strategien und das Interpretieren der Diagramme zu erleichtern, wurden ihnen zu Beginn

⁷⁹ Erste Interviews wurden bereits explorativ während der quantitativen Untersuchung durchgeführt.

der Analyse realistische Bilder der referierten Inhalte zur Verfügung gestellt. Die realistischen Bilder zeigten beispielsweise, wie ein Schneeschuhhase an einem verholzten Trieb knabbert und wie ein Luchs einen Schneeschuhhasen fängt.

Die Interviews lieferten Hinweise darauf, dass Lernende die Strategien, das Strukturieren (S) und das elaborative Interrogieren (EI), nicht eigenständig zur Analyse von Liniendiagrammen verwenden. Gleichermäßen zeigte sich aber auch – in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der quantitativen Voruntersuchung (vgl. Inderelst 2014) –, dass sich beide Strategien außerordentlich leicht vermitteln lassen und dass die Lernenden nach dieser Vermittlung in der Lage sind, die Strategien zur Analyse ihnen unbekannter, komplexer Liniendiagramme, die biologische Zusammenhänge zusammenfassen, anzuwenden.

Die Lernenden haben in den Interviews zudem berichtet, dass sie die Strategien als außerordentlich hilfreich empfanden, um das Erklären von Diagrammen vorzubereiten. Einzelne Lernende verglichen die Anwendung der strukturierenden und elaborierend-interrogativen Strategien mit der Anwendung von Lesestrategien, die ihnen aus dem Deutschunterricht bekannt waren (vgl. Gärtner 2014). Darüber hinaus zeigte sich in einer retrospektiven Analyse der Interviews, dass die Lernenden die zusätzlich dargebotenen realistischen Bilder im Sinne einer kognitiven Aktivierung (KA) verwendeten, um sich die grafisch referierten Inhalte beim Interpretieren der Diagramme mental vorzustellen.

Es lässt sich zusammenfassen, dass insbesondere die Voruntersuchungen von Inderelst (2014) und Gärtner (2014) Hinweise darauf liefern, dass die Lernenden die beiden Strategien, strukturieren (S) und elaborativ interrogieren (EI), schnell erlernen und anschließend eigenständig auf verschiedene Diagramme, die biologische Zusammenhänge veranschaulichen, anwenden können.

Zugleich zeigte sich in den Voruntersuchungen aber auch, dass die Arbeit mit den komplexen Diagrammen, trotz Anwendung der Strategien, für Lernende eine weiterhin kognitiv überaus anspruchsvolle und anstrengende Tätigkeit darstellte. Es wurde geschlussfolgert, dass Lernende zusätzlich zum Strukturieren (S) und zum elaborativen Interrogieren (EI) insbesondere dabei unterstützt werden müssen, sich die in einem Diagramm grafisch referierten Sachverhalte mental vorzustellen. Das kognitive Aktivieren (KA) wurde daher als eigenständige instruktionale Maßnahme, zusätzlich zum Strukturieren (S) und zum elaborativen Interrogieren (EI), in die Hauptuntersuchung einbezogen. Ferner wurde aufbauend auf den Voruntersuchungen entschieden – insbesondere aufgrund der erhebli-

chen kognitiven und der zeitlichen Anforderungen, die das Diagrammanalysieren an die Lernenden stellte –, die genannten Maßnahmen in der Hauptuntersuchung nicht länger in Form eines direkten Strategietrainings, sondern in Form eines indirekten Strategietrainings zu vermitteln.

Bei einem *indirekten Strategietraining* steht weniger die Strategie, sondern in erster Linie der Lerninhalt (hier das Diagramm bzw. die referierten Inhalte) und die Interaktion mit dem Lerngegenstand, unter Verwendung der jeweiligen Strategien, im Vordergrund (vgl. Friedrich & Mandl 1992, 2006; Bannert & Reimann 2009; Schlag 2011; Seufert 2003). Seufert (2003) spricht hier von *nicht-direktiver Hilfe* und definiert diese wie folgt:

„Nicht-direktive Hilfe ermöglicht es dem Lernenden, die relevanten Aspekte selbstgesteuert und somit aktiv zu entdecken. Der Lernende wird mithilfe von Fragen und Aufgaben aufgefordert, die aufeinander zu beziehenden Informationen selbstständig zu identifizieren. Die Hilfe weist also indirekt darauf hin, dass es Informationen gibt, die aufeinander abgebildet werden müssen, benennt diese aber nicht explizit“ (ebd., S. 120).

Schlag (2011) betont, dass ein indirektes Training bzw. nicht-direktive Hilfen im Vergleich zu einem direkten Training besonders förderlich seien, weil sich dadurch lange Trainingszeiten und negative Überlagerungseffekte (mathematischer Effekt) mit zuvor erworbenen Strategien reduzieren lassen (vgl. ebd.). Auch Roth und McGinn 1997 betonen, dass beim (semiotischen) Diagrammverstehen unbekannter Diagramme die intensive Arbeit mit dem Diagramm und nicht die Anwendung (kognitiver) Strategien zur Erschließung derselbigen im Fokus der Aufmerksamkeit stehen sollten (vgl. ebd.).

Keinesfalls soll jedoch durch die genannten Argumente zum Ausdruck gebracht werden, dass ein direktes Strategietraining nicht geeignet sei, um das Diagrammverstehen zu fördern. Vielmehr erschien es vor dem Hintergrund der Tatsache, dass zum Zeitpunkt der Hauptuntersuchung nur wenige Erkenntnisse darüber existierten, wie Lernende beim Verstehen komplexer Diagramme vorgehen, in dem hier durchgeführten Forschungsbereich geeigneter, mithilfe eines indirekten Trainings zunächst weitere Erkenntnisse zu generieren. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen können dann in nachfolgenden Untersuchungen, unter Bezug auf die in dieser Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse, wesentlich fundierter direkte Strategietrainings entwickelt und deren Wirksamkeit empirisch überprüft werden (siehe dazu auch Forschungsausblick in Kapitel 0).

5.5. Beantwortung von Forschungsfrage 2

Zur Beantwortung von Forschungsfrage 2 *Wie lässt sich das Diagrammverstehen von Lernenden, aufbauend auf den identifizierten Förderbedarfen, fördern?* wurden zunächst zwei Unterfragen gebildet und der Reihe nach beantwortet. Die beiden Unterfragen lauteten:

- *Wie lässt sich Diagrammverstehen als Prozess beschreiben?* (Unterfrage 1)
- *In welcher Phase des Diagrammverstehensprozesses erscheint eine Förderung besonders effektiv?* (Unterfrage 2)

Zur Beantwortung von Unterfrage 1 wurde in Abschnitt 5.2 auf den Bildinterpretationsprozess nach Panofsky (1975) Bezug genommen. Panofsky beschreibt Bildverstehen als einen Prozess aus drei Phasen, die in ihrer übergeordneten Struktur sukzessive aufeinander aufbauen. Diese drei Phasen wurden auf das Diagrammverstehen übertragen; es wurde ein Prozessmodell des Diagrammverstehens postuliert (siehe Abbildung 37 in Abschnitt 5.2.4). Diagrammverstehen wird in dem Prozessmodell stark vereinfachend als sequenzieller Verstehensprozess beschrieben. Unterschieden werden in dem Modell die vorikonografische Beschreibung des Diagramms (Phase 1), die ikonografische Analyse des Diagramms (Phase 2) und die ikonologische Interpretation der Inhalte (Phase 3). Die vorikonografische Beschreibung (Phase 1) entspricht weitgehend den unter der kompetenzorientierten Perspektive subsumierten Tätigkeiten der Informationsentnahme und findet ausschließlich im Graphenraum statt. Die ikonografische Analyse (Phase 2) entspricht in den Grundzügen zwar auch noch der Informationsentnahme, bezieht aber bereits die in dem Diagramm referierte Situation in die Beschreibung der Inhalte ein. In dieser Phase beginnen Diagrammleser*innen bereits interpretativ aus dem Graphenraum- in den Situationsraum zu wechseln. Allerdings agieren sie erst in Phase 3, der ikonologischen Interpretation der Inhalte⁸⁰, umfänglich und nahezu ausschließlich im Situationsraum.

Eine fachwissenschaftlich geeignete ikonologische Interpretation (Phase 3) des Diagramms bzw. der Inhalte ist entsprechend nur dann möglich, wenn während der ikonografischen Analyse (Phase 2) eine geeignete mentale Repräsentation der im Diagramm referierten Inhalte konstruiert wurde (siehe zu einer ausführli-

⁸⁰ Es sei betont, dass es sich in der Phase der ikonologischen Interpretation um eine Interpretation der Inhalte des Diagramms und weniger um eine Interpretation des Diagramms an sich handelt (siehe Abschnitt 5.2.3).

chen Erläuterung Abschnitt 5.2.4). Im Rahmen der Beantwortung von Unterfrage 2 (*In welcher Phase des Diagrammverstehensprozesses erscheint eine Förderung besonders effektiv?*) wurde daher theoretisch geschlussfolgert, dass sich Diagrammverstehen besonders effektiv fördern lässt, indem Lernende bei ihrer ikonografischen Analyse des Diagramms (Phase 2) unterstützt und darauf aufbauend beim Übergang in die ikonologische Interpretation der Inhalte (Phase 3) angeleitet werden (siehe Abbildung 39). Fördermaßnahmen sollten daher darauf abzielen, Lernenden den interpretativen Wechsel vom Graphen- in den Situationsraum zu erleichtern und es ihnen ermöglichen, eigenständig Ansätze für Translationsprozesse innerhalb des Situationsraums zu identifizieren.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden in Abschnitt 5.3 – im Rahmen der Beantwortung von Forschungsfrage 2 – drei Förderkonzepte aus der Literatur deduziert. Zu nennen sind *kognitive Aktivierung (KA)*, *Unterstützung beim Strukturieren (S)* und *Unterstützung bei der elaborativen Interrogation (EI)*. Das Strukturieren (S) und die elaborative Interrogation (EI) wurden in empirischen Voruntersuchungen (siehe Abschnitt 5.4) quantitativ und qualitativ mittels Interviewstudien explizit erprobt und haben sich als lernförderlich erwiesen. Empirische Hinweise, die auf lernförderliche Wirkung des Förderkonzeptes kognitive Aktivierung (KA) schließen lassen, wurden retrospektiv aus den Interviews geschlussfolgert.

Basierend auf den Erkenntnissen, die durch die theoretischen und empirischen Vorarbeiten gewonnen wurden, lassen sich mögliche Wirkmechanismen der Förderkonzepte vermuten (siehe Abbildung 40).

Das Förderkonzept *kognitive Aktivierung (KA)* unterstützt Diagrammleser*innen, noch bevor sie mit dem Diagramm interagieren, mental einen vorläufigen Situationsraum zu konstruieren (siehe Abbildung 40), in den sie nachfolgend weitere Informationen einordnen können. Es wird erwartet, dass dieser vorläufige und relativ unspezifische Situationsraum die nachfolgende Interpretation des Diagramms vorbereitet und erleichtert. Den Leser*innen fällt es dadurch womöglich leichter, im Verlauf der ikonografischen Analyse, aufbauend auf dem Diagramm, einen spezifischen Situationsraum der in dem Diagramm referierten Inhalte zu konstruieren. *Strukturierende Maßnahmen (S)* unterstützen sie dann bei der Konstruktion eben dieses spezifischeren Situationsraums und helfen, sowohl das Diagramm als auch den Situationsraum zu (re-)strukturieren und mental zu (re-)organisieren. Die Strukturierung bereitet dadurch insbesondere auch

den Wechsel von der ikonografischen Analyse des Diagramms zur ikonologischen Interpretation der Inhalte vor. Durch das Stellen elaborierender Fragen (EI) an das Diagramm und die Graphenverläufe aktivieren Lernende ihr spezifisches Vorwissen über Theorien und Mechanismen und elaborieren den Situationsraum. Es wird erwartet, dass es ihnen dadurch leichter fällt, den Situationsraum nach möglichen Hypothesen zur Erklärung der Graphenverläufe zu durchsuchen.

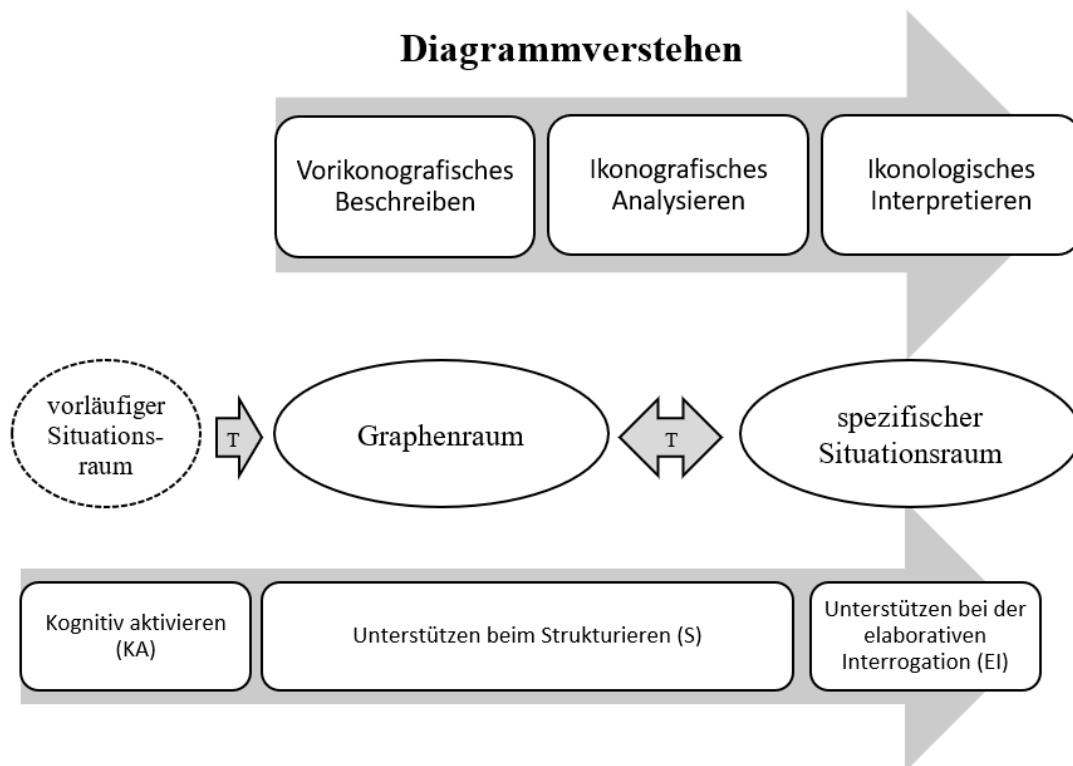


Abbildung 40. Einordnung der Förderkonzepte in den Prozess des Diagrammverstehens, T = Translation (eigene Darstellung)

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Voruntersuchungen (siehe Abschnitt 5.4) wurde es als besonders förderlich erachtet, die genannten Strategien in einem indirekten Strategietraining einzusetzen. In einem indirekten Strategietraining steht der Lerninhalt, hier das Diagramm bzw. der referierte Inhalt, im Vordergrund. Die Strategien dienen dabei als Mittel zum Erschließen des Diagramms. Eine differenzierte Evaluation dieses Förderansatzes, bestehend aus den Förderkonzepten kognitive Aktivierung (KA), Unterstützung beim Strukturieren (S) und Unterstützung bei der elaborativen Interrogation (EI), erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln im Rahmen der Forschungsfragen 3 bis 5.

6. Evaluation der instruktionalen Maßnahmen in Hinblick auf das Erklären (F3)

6.1. Herleitung von Forschungsfrage 3

Durch Beantwortung der Forschungsfragen 1 und 2 konnten bereits verschiedene Erkenntnisse zur Förderung des Diagrammverstehens gewonnen werden. Drei Förderkonzepte wurden aus der Literatur deduziert: 1. Kognitive Aktivierung (KA), 2. Unterstützung bei der Strukturierung des Diagramms in Zeichen (S) und 3. Elaborative Interrogation (EI). Im Folgenden werden diese Förderkonzepte in konkrete *instruktionale Maßnahmen* übersetzt. Empirisch wird überprüft, ob die instruktionalen Maßnahmen geeignet sind, das Diagrammverstehen von Lernenden zu fördern.

Eine geeignete Operationalisierung, um das mehrdimensionale Konstrukt Diagrammverstehen valide und reliabel zu messen, liegt allerdings aktuell noch nicht vor. In vergleichbaren Studien wurde zur Erfassung der latenten Variable Diagramm- bzw. Bildverstehen daher auf die Leistung von Lernenden fokussiert, die sie beim Erklären der grafischen referierten Inhalte zeigen (vgl. Mautone & Mayer 2007; Brandstetter-Korinth 2017; Tsuji 2011). Ein vergleichbares Vorgehen scheint auch zur Evaluierung der Wirksamkeit der in dieser Arbeit verwendeten instruktionalen Maßnahmen geeignet zu sein. So wurde in Abschnitt 3.4.3 beispielsweise bereits argumentiert, dass das Diagrammverstehen und das Erklären von Graphenverläufen in enger Verbindung zueinander stehen. Es kann angenommen werden, dass das kausale Erklären von Graphenverläufen das Verstehen des Diagramms und der in dem Diagramm referierten Inhalte fördert, und dass das Erklären von Graphenverläufen nur dann möglich ist, wenn das Diagramm bzw. die referierten Inhalte bereits verstanden bzw. mental rekonstruiert wurden.

Die Fähigkeit, das Diagramm erklären zu können, wird somit im Folgenden als wesentliche Dimension des Diagrammverstehens betrachtet. Forschungsfrage 3 lautet daher:

Inwiefern sind die in dieser Arbeit entwickelten instruktionalen Maßnahmen geeignet, um Lernende beim kausalen Erklären von Graphenverläufen zu unterstützen?

Angelehnt an das Vorgehen in den Voruntersuchungen (siehe Abschnitt 5.4) und vor dem Hintergrund der Tatsache, dass die Relevanz der kognitiv aktivierenden

Maßnahmen (KA) erst im Verlauf des Forschungsprozesses, insbesondere bei der retrospektiven Analyse der Interviewstudien, erkannt wurde, wurde Forschungsfrage 3 in zwei Unterfragen differenziert (siehe Abbildung 41; siehe zu Ausführungen zur Anpassung von Entwicklungsforschungsvorhaben Prediger et al. 2012).

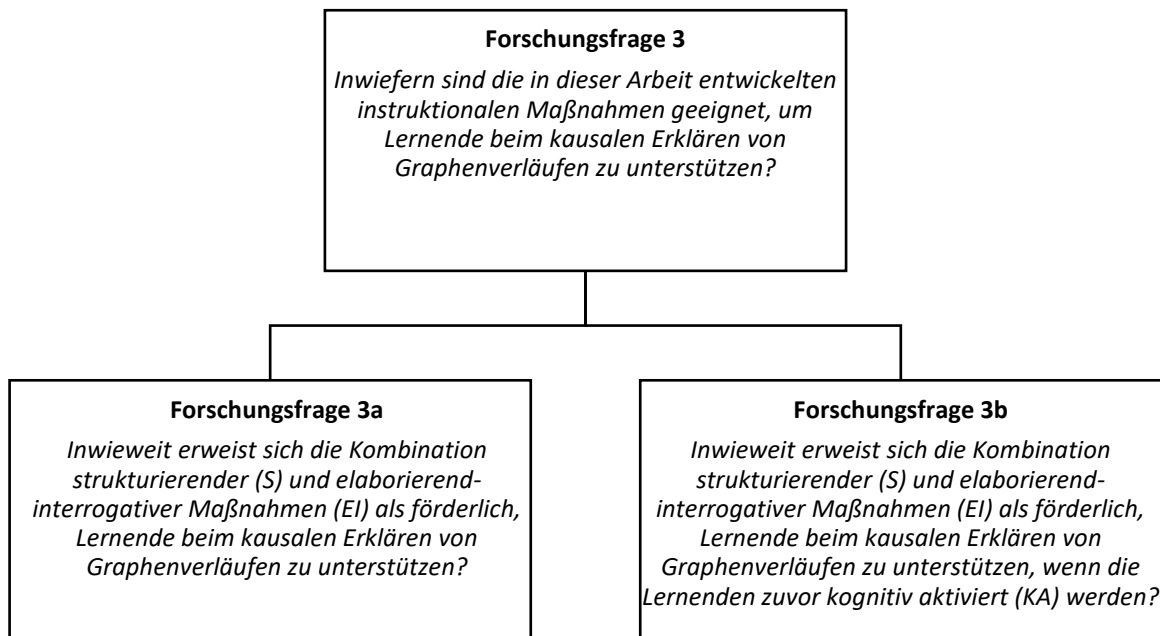


Abbildung 41. Gliederung von Forschungsfrage 3 in die Unterfragen 3a und 3b (eigene Darstellung)

In Forschungsfrage 3a wurde angelehnt an die Voruntersuchungen untersucht: *Inwieweit erweist sich die Kombination strukturierender (S) und elaborierend-interrogativer Maßnahmen (EI) als förderlich, Lernende beim kausalen Erklären von Graphenverläufen zu unterstützen?*

In Forschungsfrage 3b wurde unter expliziter Einbindung kognitiv aktivierender Maßnahmen untersucht: *Inwieweit erweist sich die Kombination strukturierender (S) und elaborierend-interrogativer Maßnahmen (EI) als förderlich, Lernende beim kausalen Erklären von Graphenverläufen zu unterstützen, wenn die Lernenden zuvor kognitiv aktiviert (KA) werden?*

In Abschnitt 6.2 wird zunächst die Forschungsmethodik zur Beantwortung der Forschungsfrage bzw. der beiden Unterfragen präsentiert. In Abschnitt 6.3 erfolgt die Auswertung der empirischen Befunde. Darauf aufbauend werden die einzelnen Forschungsfragen in Abschnitt 6.4 beantwortet.

6.2. Forschungsmethodik zur Beantwortung von Forschungsfrage 3

Zur Beantwortung der Forschungsfragen 3a und 3b werden im Folgenden zunächst die entwickelten instruktionalen Maßnahmen (Abschnitt 6.2.1), das Design der Untersuchung (Abschnitt 6.2.2), die Stichprobe (Abschnitt 6.2.3), die Durchführung der Untersuchung (Abschnitt 6.2.4) und die analysierten Variablen (Abschnitt 6.2.5) beschrieben.

6.2.1. Lernmaterialien und instruktionale Maßnahmen

6.2.1.1 Beschreibung des Lern- bzw. Untersuchungsdiagramms

Die Wirksamkeit der instruktionalen Maßnahmen wird anhand eines Diagramms aus dem Themenbereich Enzymatik evaluiert. Die Lernenden erhielten das Diagramm zusammen mit einem Informationstext (siehe Abbildung 42).

Die Informationsmaterialien (siehe Anhang 14.3) wurden von den Lernenden zum selbstgesteuerten Lernen verwendet. Um das Diagramm von anderen Diagrammen abzugrenzen, auf die in dieser Untersuchung an verschiedenen Stellen verwiesen wird, wird es im Folgenden als *Untersuchungsdiagramm* bezeichnet. Der Themenbereich Enzymatik wurde für die Untersuchung gewählt, weil Liniendiagramme in diesem Themenbereich eine wesentliche Funktion einnehmen, um lernrelevante Inhalte zu veranschaulichen. Die jeweiligen Liniendiagramme sind häufig syntaktisch komplex und fassen abstrakte Inhalte zusammen. Die in den vorausgegangenen Kapiteln gewonnenen Erkenntnisse legen nahe, dass das Diagrammverstehen von Lernenden in einem solchen Kontext in besonderem Maße gefördert werden muss. Zudem werden Liniendiagramme im Themenbereich Enzymatik in vergleichbarer Art und Weise eingesetzt. Die Wahl des Themenbereichs Enzymatik erscheint daher gerade auch unter Berücksichtigung der Übertragbarkeit von Erkenntnissen besonders effektiv (siehe Kapitel 10).

Das Untersuchungsdiagramm ähnelt Unterrichtsdiagrammen sowohl hinsichtlich der Syntax als auch hinsichtlich der zusammengefassten Inhalte (siehe Abschnitt 7.3.3 zu einer Analyse der Schulbuchliteratur), das Diagramm selbst wird im Schulunterricht allerdings nicht verwendet. Es wurde an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster von Bettina Zeis im Rahmen eines biowissenschaftlichen Praktikums für Lehramtsstudierende entwickelt und für die hier durchgeführte Untersuchung geringfügig modifiziert.

Auswertung eines Laborexperimentes

In einem Laborexperiment wurde der Einfluss unterschiedlicher Konzentrationen von Enzym- und Substratmolekülen auf eine enzymatische Reaktion untersucht. Die Reaktion ist bekannt:

Ein Substratmolekül wird enzymatisch vollständig zu zwei Produktmolekülen gespalten.

Durchführung des Laborexperimentes:

In dem Experiment wurden drei Versuche durchgeführt (vgl. Tabelle 1): In Versuch A wurde eine Enzymkonzentration (EK) und eine Substratkonzentration (SK) von jeweils 6 mmol/L verwendet. In Versuch EK_{0,5} wurde die enzymatische Reaktion mit halber Enzymkonzentration durchgeführt. Der Versuch SK_{0,5} wurde mit halber Substratkonzentration durchgeführt.

Tabelle 1 Übersicht über die drei Versuche (A, EK_{0,5} und SK_{0,5})

Versuche	Enzymkonzentration (EK) [mmol/L]	Substratkonzentration (SK) [mmol/L]
Versuch A	6	6
Versuch EK _{0,5}	3	6
Versuch SK _{0,5}	6	3

In allen drei Versuchen wurde über 20 Minuten jeweils die Zunahme der Produktkonzentration im Verlauf der Zeit gemessen. Die gemessene Zunahme der Produktkonzentration wurde in das unten abgebildete Diagramm (Abbildung 1) eingetragen.

Die Produktkonzentration gibt an, wie viele Produktmoleküle zu jedem Zeitpunkt in den jeweiligen Versuchsgefäßen (Reagenzglasern) vorliegen. Die Zeit gibt an, wie viele Minuten seit Beginn der Reaktion vergangen sind.

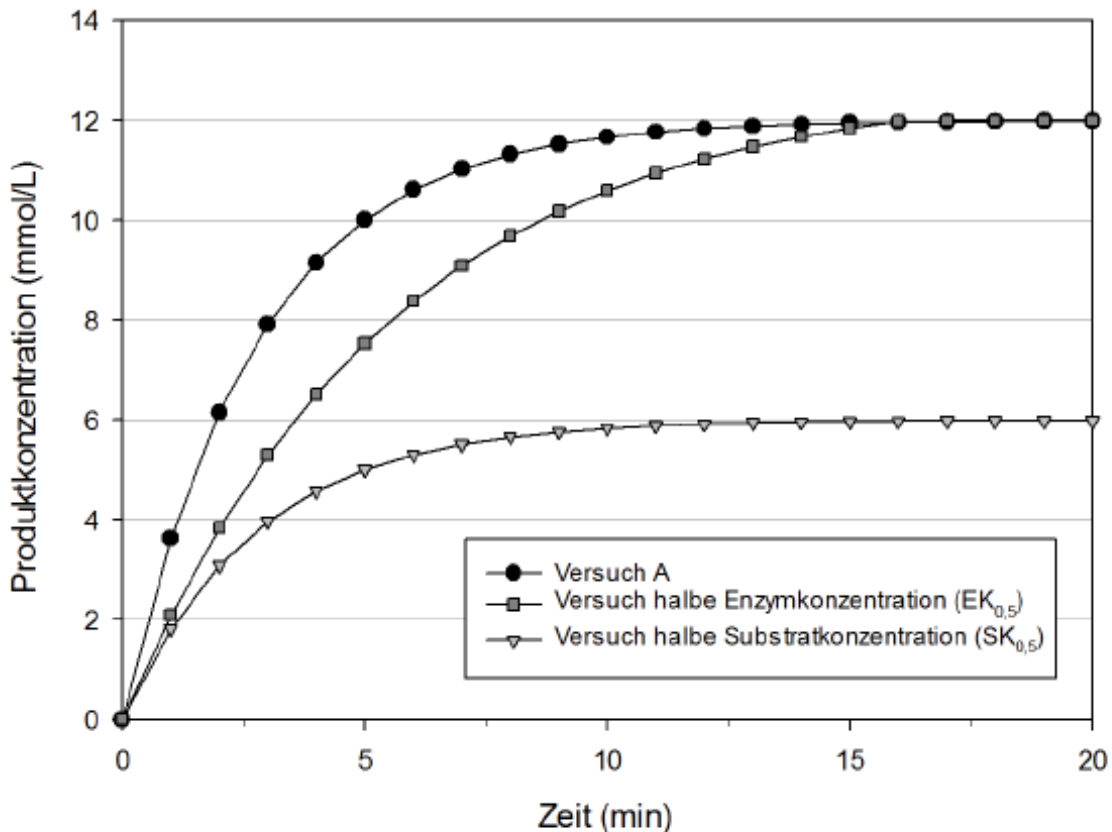


Abbildung 1: Veränderung der Produktkonzentration in drei Versuchen (A, EK_{0,5} und SK_{0,5}).

Abbildung 42. Untersuchungsdiagramm und Informationsmaterialien, die in der hier durchgeführten Untersuchung verwendet wurde (modifiziert durch den Verfasser nach Bettina Zeis 2014). Dargestellt ist die Veränderung der Produktkonzentration einer enzymatischen Reaktion im Verlauf der Zeit in drei Versuchen (A, EK05 und SK05).

Die in dem Diagramm zusammengefassten Inhalte lassen sich vollständig mit dem im Unterricht erworbenen enzymatischen Vorwissen erklären (zu einer ausführlichen Erklärung der Graphenverläufe siehe Abschnitt 6.2.5.2.2). Der Umgang von Schüler*innen sowie Studierenden mit dem Diagramm wurde in verschiedenen Voruntersuchungen erprobt (siehe Abschnitt 6.2.1.2).

Das Diagramm zeigt, wie bei einer enzymatischen Reaktion (Spaltung eines Substratmoleküls in zwei Produktmoleküle) die Produktkonzentration in mmol/L im Verlauf der Zeit in Minuten zunimmt. Dargestellt sind die Ergebnisse von drei Versuchen, in denen jeweils der zeitliche Verlauf der gleichen enzymatischen Reaktion beobachtet wird. In jedem Versuchsansatz werden die gleichen Enzym- und Substratmoleküle verwendet. Die Konzentrationen werden jedoch variiert: In Versuch A wird eine enzymatische Reaktion mit der Enzymkonzentration $[E]$ und der Substratkonzentration $[S]$ durchgeführt (jeweils 6 mmol/L). In Versuch EK05 wird, unter ansonsten gleichen Bedingungen, lediglich die halbierte Enzymkonzentration verwendet (3 mmol/L), in Versuch SK05 die halbierte Substratkonzentration (3 mmol/L).

Damit die Lernenden die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Produktentwicklung in den drei Versuchen mithilfe des Diagramms erklären können, sollte ihnen bekannt sein, dass die Entwicklung der Produktkonzentration von der ursprünglich eingesetzten Substrat- und Enzymkonzentration abhängt (vgl. Phillips et al. 2012; Randall et al. 2002): Je höher die Enzymkonzentration und/oder die Substratkonzentration ist, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym- und Substratmoleküle aufeinandertreffen. Zudem benötigen die Lernenden Vorwissen darüber, dass Enzym- und Substratmoleküle in einer Lösung frei diffundieren und daher zufällig miteinander kollidieren. Phillips et al. (2012) fassen die entsprechenden Zusammenhänge übersichtlich wie folgt zusammen:

„In dilute *in vitro* biochemical experiments, the reaction rate for an enzymatic conversion of a substrate into a product depends upon the concentration of the enzyme, the concentration of the substrate, and the intrinsic turnover rate of the enzyme. It is generally accepted that the concentration dependence of these rates describes the time it takes for an enzyme diffusing freely in solution to randomly encounter its substrate. At higher concentration of either, these random collisions become more frequent“ (ebd., S. 566).

Der von Phillips et al. (2012) angesprochene Einfluss der Wechselzahl eines Enzyms (intrinsic turnover rate) kann hier vernachlässigt werden, da in allen Versuchen das gleiche Enzym verwendet wurde. Gleiches gilt auch für die Affinität des Enzyms zum Substrat.

Lernende, die über das genannte Vorwissen verfügen, können durch intensives, kombinatorisches Lesen des Diagramms, durch systematisches Vergleichen der einzelnen Graphen bzw. Graphenabschnitte sowie durch Translation zwischen grafischer Darstellung und referierter inhaltlicher Situation das Diagramm vollständig erklären. Eine detaillierte Analyse möglicher Erklärungen für die einzelnen erklärungsrelevanten Aspekte des Diagramms erfolgt in Abschnitt 6.2.5.2.2.

6.2.1.2 Empirische Erprobung der Maßnahmen

Die instruktionalen Maßnahmen wurden in drei Phasen erprobt und weiterentwickelt. Die *erste Erprobungsphase* wurde mit angehenden Biologielehrkräften (Studierende im Master of Education, $N = 34$ ⁸¹) in unterschiedlichen Seminaren an der Universität Münster durchgeführt. Lehramtsstudierende wurden ausgewählt, weil sie sowohl über die Fachkenntnisse als auch über die fachdidaktischen Kompetenzen verfügen, um Probleme im Testinstrument bzw. im Instruktionsmaterial zu erkennen und konstruktive Verbesserungsvorschläge zu liefern. Aufbauend auf der ersten Erprobung wurden in einer *zweiten Erprobungsphase* die Untersuchungs- und Lernmaterialien unter Einbezug von Expert*innen aus Theorie und Praxis ($N = 5$) sukzessive weiterentwickelt. Nachfolgend wurden die instruktionalen Maßnahmen mit angehenden Biologielehrkräften (Studierende im Master of Education, $N = 23$) erneut getestet. Nach dieser Phase wurden insbesondere die Aufgabentexte reduziert und Scaffolds zur leichteren Bearbeitung der Aufgaben entwickelt. Die modifizierten Materialien wurden anschließend mit drei Lehrkräften aus der Praxis begutachtet. Wesentliche Änderungen wurden in dieser Phase nicht mehr vorgenommen. Es wurden lediglich Formulierungen und Arbeitsaufträge präzisiert.

In der *dritten Entwicklungsphase* wurden die Materialien abschließend mit Lernenden eines Gymnasiums (EF, $N = 14$) pilotiert. Die bis dahin entwickelten Untersuchungsmaterialien und insbesondere die instruktionalen Maßnahmen erwiesen sich als geeignet, um sie zur Untersuchung und Förderung des Diagrammverstehens zu verwenden.

⁸¹ Die Ergebnisse dieser Erprobungen wurden nicht in die quantitative Analyse einbezogen.

6.2.1.3 Beschreibung der Maßnahmen

6.2.1.3.1. Maßnahme: Kognitive Aktivierung (KA)


Die kognitiv aktivierenden Maßnahmen (KA, siehe zu einer vollständigen Darstellung der Aufgaben siehe Anhang 14.3.3) haben zum Ziel, die Lernenden anzuleiten, einen vorläufigen mentalen *Situationsraum* (siehe Abschnitt 3.7 und Abschnitt 5.5) zu konstruieren, in den sich die in dem Diagramm grafisch referierten Inhalte später einordnen lassen. Dazu bearbeiten die Lernenden fünf kürzere Aufgaben. In die einzelnen Aufgaben werden die Informationen aus dem Informationstext (siehe Abbildung 42 in Abschnitt 6.2.1.1), den alle Gruppen ergänzend zum Diagramm erhielten, eingebunden.


Auswertung eines Laborexperiments


In einem Laborexperiment wurde der Einfluss unterschiedlicher Konzentrationen von Enzym- und Substratmolekülen auf eine enzymatische Reaktion untersucht. Die Reaktion ist bekannt:

Ein Substratmolekül wird enzymatisch vollständig zu zwei Produktmolekülen gespalten.

Aufgabe 1: Skizzieren Sie in dem freien Feld den Ablauf der beschriebenen enzymatischen Reaktion und beschriften Sie Ihre Skizze. Nutzen Sie dafür die folgenden Symbole:


Substratmolekül


Enzymmolekül


Produktmolekül

Skizze

Abbildung 1: Skizze der enzymatischen Spaltung eines Substratmoleküls zu zwei Produktmolekülen

Abbildung 43. Lernmaterial zu Aufgabe 1 (eigene Darstellung).

In *Aufgabe 1* (siehe Abbildung 43) erhalten die Lernenden der entsprechenden Instruktionsgruppe, wie die Lernenden der Kontrollgruppen, eine kurze Information zum Experiment (siehe Informationstext in Abbildung 43 über der Aufgabenstellung). Darauf aufbauend werden sie – im Gegensatz zu den Lernenden

der anderen Kontrollgruppen – angeregt, eine Vorstellung darüber zu entwickeln, wie ein einzelnes Enzymmolekül mit einem einzelnen Substratmolekül interagieren könnte. Dazu sollen die Lernenden die referierte enzymatische Reaktion skizzieren (vgl. Taber 2009). Da den Lernenden die eigenständige Konstruktion grafisch-symbolischer Erklärungen häufig schwerfällt (vgl. Cheng & Gilbert 2009), werden ihnen zur Unterstützung die notwendigen Konventionen (Symbole für Substrat-, Enzym- und Produktmoleküle) sowie eine geeignete Zeichenfläche vorgegeben (siehe Abbildung 43). Den Lernenden wird auf diese Weise ein geeigneter *Denkrahm* zur Verfügung gestellt (vgl. Schecker und Duit 2018).

Aufbauend auf Aufgabe 1, sollen sich die Lernenden angeleitet durch nachfolgende Aufgaben vorstellen, wie mehrere Enzym- und Substratmoleküle miteinander interagieren können. Auch hierzu erhalten sie zunächst dieselben Informationen zu den Teilchenkonzentrationen in den drei Versuchen wie die Lernenden der Kontrollgruppen (siehe Abbildung 42 und Abbildung 44).

Durchführung des Laborexperimentes – Teil 1:

In dem Experiment wurden drei Versuche durchgeführt (vgl. Tabelle 1): In Versuch A wurde eine Enzymkonzentration (EK) und eine Substratkonzentration (SK) von jeweils 6 mmol/L verwendet. In Versuch EK_{0,5} wurde die enzymatische Reaktion mit halber Enzymkonzentration durchgeführt. Der Versuch SK_{0,5} wurde mit halber Substratkonzentration durchgeführt.

Tabelle 1: Übersicht über die drei Versuche (A, EK_{0,5} und SK_{0,5})

Versuche	Enzymkonzentration (EK) [mmol/L]	Substratkonzentration (SK) [mmol/L]
Versuch A	6	6
Versuch EK _{0,5}	3	6
Versuch SK _{0,5}	6	3

Abbildung 44. Informationen zu den drei Versuchen (eigene Darstellung).

Während die Lernenden der Kontrollgruppen das Untersuchungsdiagramm unmittelbar präsentiert bekommen (siehe z. B. Anhang 14.3.2), sollen die Lernenden der Instruktionsgruppe zunächst weitere Aufgaben bearbeiten.

In *Aufgabe 2* (siehe Anhang 14.3.3) sollen sie die in Abbildung 44 zu den drei Versuchen vorgegebenen Konzentrationsangaben in symbolische Darstellungen übersetzen. Ähnlich wie in Aufgabe 1 werden den Lernenden auch hier zur Unterstützung eine Zeichenfläche vorgegeben und geeignete Symbole exemplarisch aufgezeigt (siehe Abbildung 45).

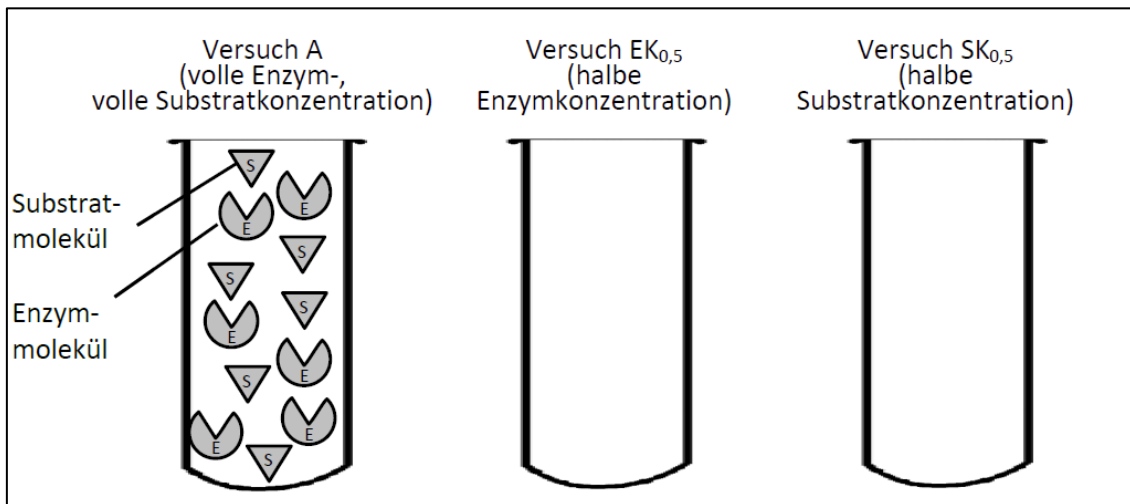


Abbildung 45. Lernmaterial zu Aufgabe 2 (eigene Darstellung)

In *Aufgabe 3* (siehe Anhang 14.3.3) werden die Lernenden, aufbauend auf den Ergebnissen zu Aufgabe 2, dazu angeregt, sich die Veränderung der Teilchenkonzentrationen und damit auch die potenzielle Interaktion der Teilchen im zeitlichen Verlauf der Reaktion vorzustellen. Um die Lernenden auch dabei anzuleiten, sollen sie in eine Tabelle (siehe Tabelle 4) Vermutungen darüber eintragen, wie hoch die Wahrscheinlichkeit des Aufeinandertreffens von Substrat- und Enzymmolekülen in den jeweiligen Versuchen zu Beginn und am Ende der Reaktion sein könnte. Geeignete Formulierungsvorschläge, wie *geringe, mittlere und hohe Wahrscheinlichkeit*, werden zur Unterstützung erneut vorgegeben.⁸²

Tabelle 4. Übersicht über die Wahrscheinlichkeit des Aufeinandertreffens von Enzym- und Substratmolekülen

	Versuch A	Versuch $EK_{0,5}$	Versuch $SK_{0,5}$
zu Beginn der Reaktion			
am Ende der Reaktion			

Erst in *Aufgabe 4* (siehe Anhang 14.3.3) werden den Lernenden der Instruktionsgruppe weitere Informationen zum Versuch sowie der Rahmen (Achsen und Variablen) des Untersuchungsdiagramms präsentiert (siehe Abbildung 46). Um ein

⁸² Obgleich angenommen wird, dass alle Lernenden – insbesondere vor dem Hintergrund der zuvor im Unterricht behandelten Inhalte (siehe dazu Abschnitte 6.2.3 und 7.3.3) und den Ergebnissen im Vorwissenstest (siehe insbesondere Tabelle 8 in Abschnitt 6.3.1.1) – über das notwendige Vorwissen verfügen sollten, um zu erklären, wie sich unterschiedliche Konzentrationen auf die Wahrscheinlichkeit auswirken, dass Enzym- und Substratmoleküle aufeinandertreffen, kann nicht ausgeschlossen werden, dass im Rahmen der Aufgaben 2 und 3 nicht nur Vorwissen aktiviert, sondern auch neues Wissen konstruiert wurde.

flüchtiges Lesen des Diagrammrahmens zu verhindern und ein aktives Lesen einzufordern, wurde die Abbildungsunterschrift des Untersuchungsdiagramms zu einem Text mit Alternativen umgestaltet (siehe Informationstext in Abbildung 46; vgl. Lumer 2011; Lumer & Bönninghausen 2012; Lumer & Winter 2019; Kunze 2005). Die Lernenden sollen in dem Text die jeweils unzutreffende Alternative durchstreichen (siehe Text mit Alternativen in Abbildung 46).

In den ersten vier Aufgaben werden die Lernenden ausschließlich dazu angeleitet, sich das Reaktionsgeschehen auf submikroskopischer Ebene vorzustellen, um so einen vorläufigen, relativ unspezifischen Situationsraum zu konstruieren, der ihnen nachfolgend die Interpretation des Untersuchungsdiagramms erleichtert. Um die Lernenden darauf aufbauend konkreter auf das Untersuchungsdiagramm vorzubereiten, sollen sie in *Aufgabe 5* (siehe Anhang 14.3.3) Vermutungen über die Entwicklung der Produktkonzentration in den drei Versuchen aufstellen und ihre Erwartungen in Form von Graphenverläufen in das in Abbildung 46 vorgegebene Koordinatensystem einzeichnen (vgl. Meister & Upmeyer zu Belzen 2017, 2018; Meister 2018). Dazu müssen sie ihre Vorstellungen, die sie auf der inhaltlichen, submikroskopischen Ebene konstruiert haben, mit der grafisch-makroskopischen Ebene vernetzen (vgl. Hammann 2019; Knippels & Waarlo 2018; Moore & Thompson 2015; Chi 2005). Sie müssen dazu, aufbauend auf ihrem vorläufig konstruierten Situationsraum, einen möglichen Graphenraum konstruieren (siehe Abschnitte 3.7 und 5.5).

Es wird erwartet, dass die Lernenden durch das Aufstellen von Vermutungen über die Graphenverläufe eine erste Leseerwartung an das Untersuchungsdiagramm entwickeln, das ihnen im Anschluss an die Bearbeitung von Aufgabe 5 präsentiert wird. Es wird zudem erwartet – ohne, dass dies durch eine explizit gestellte Aufgabe eingefordert wird –, dass der (selbstgesteuerte) Abgleich der antizipierten Graphenverläufe mit den tatsächlichen im Diagramm dargestellten Graphenverläufen⁸³ – sofern sich diese unterscheiden – einen lernförderlichen kognitiven Konflikt erzeugt, der die Lernenden dazu veranlasst, das Untersuchungsdiagramm intensiv(er) zu analysieren.

⁸³ Die Lernenden werden mithilfe einer kurzen Notiz darauf hingewiesen, dass sich die Lösung zu Aufgabe 5 – in Form des zu analysierenden Untersuchungsdiagramms – auf der nachfolgenden Seite in dem Selbstlern- bzw. Untersuchungsheft befindet. Sie werden im Rahmen der Notiz zudem darum gebeten, erst weiterzublättern, sobald die drei Graphen in das Koordinatensystem eingezeichnet haben (siehe Anhang 14.3.3)

Durchführung des Laborexperimentes – Teil 2:

In allen drei Versuchen wurde über 20 Minuten jeweils die Zunahme der Produktkonzentration / Zeit im Verlauf der Produktkonzentration / Zeit gemessen. Die gemessene Zunahme der Produktkonzentration / Substratkonzentration wird in das unten abgebildete Diagramm (Abbildung 3) eingetragen.

Die Produktkonzentration gibt an, wie viele Produktmoleküle / Substratmoleküle zu jedem Zeitpunkt in den jeweiligen Versuchsgefäßen (Reagenzgläsern) vorliegen. Die Zeit gibt an, wie viele Minuten seit Beginn der Reaktion vergangen sind.

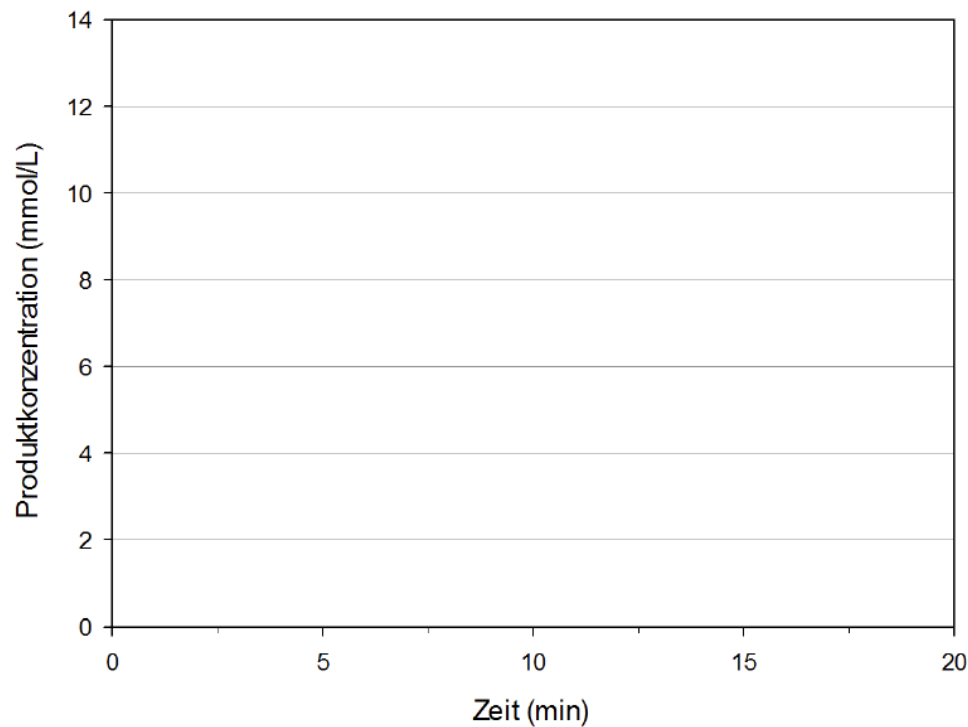


Abbildung 46. Lernmaterial zu den Aufgabe 4 und 5 (eigene Darstellung).

6.2.1.3.2. Maßnahme: Strukturierung (S)

Im Rahmen der Strukturierungsaufgabe werden die Lernenden Instruktionsgruppe dazu angeleitet, das Diagramm in Abschnitte einzuteilen. Sie erhalten dazu die Aufgabe das dargestellte (*Untersuchungs-*)Diagramm in Hinblick auf die Veränderung der Produktkonzentration in drei Zeitabschnitte einzuteilen (siehe Anhang 14.3.1 bzw. Anhang 14.3.3).

Aufbauend auf den semiotischen und kognitionspsychologischen Ausführungen in den vorausgegangenen Kapiteln wird angenommen, dass das Einteilen des Diagramms in Abschnitte die Lernenden dabei unterstützt, die Komplexität des Diagramms zu reduzieren und im Graphenraum bedeutungsvolle Zeichen zu konstruieren, die sie dann wiederum im Situationsraum interpretieren können. Es wird erwartet, dass die Analyse im Situationsraum dadurch vorbereitet und erleichtert wird (siehe Abschnitt 5.5).

Kognitionswissenschaftlich orientierte Studien (siehe Abschnitt 3.8.2.2) liefern Hinweise dafür, dass sich mehr als vier bis fünf Abschnitte als nachteilig für das

Arbeitsgedächtnis erweisen können (vgl. Cowan 2010; Carswell, 1993; Carpenter & Shah, 1998; Halford et al. 2005; Katz et al. 2004; Katz et al. 2002). Die Lernenden werden daher explizit darauf hingewiesen, das Diagramm lediglich in *drei* (Zeit-)Abschnitte einzuteilen. Dieser Hinweis erscheint auch deshalb notwendig, da in den empirischen Voruntersuchungen (siehe Abschnitt 5.4) deutlich wurde, dass Lernende ohne eine Begrenzung der Anzahl an Abschnitten dazu tendieren – häufig orientiert an perzeptuellen Merkmalen –, sehr viele Abschnitte zu bilden. Sie steigerten dadurch die Komplexität der Abbildung, anstatt, wie intendiert, die Komplexität sinnvoll zu reduzieren und auf inhaltlich bedeutsame Merkmale zu fokussieren. Ein kurzer Hinweis genügte in den Voruntersuchungen (siehe Abschnitte 5.4) allerdings bereits häufig aus, damit die Lernenden eine geringere Anzahl an Abschnitten – mit stärkerem Fokus auf die referierten Inhalte – bildeten.

Um den Fokus auf inhaltlich bedeutsame Diagrammabschnitte zusätzlich zu erhöhen, werden die Lernenden in der Aufgabenstellung explizit darauf hingewiesen, sich beim Strukturieren auf die bedeutungsrelevante Veränderung der Produktkonzentration zu konzentrieren.

6.2.1.3.3. Maßnahme: Elaborierende Interrogation (EI)

Aufbauend auf der Strukturierung des Diagramms in (Zeit-)abschnitte, werden die Lernenden der Instruktionsgruppen mithilfe elaborierender-interrogativer Aufgaben zum Stellen *vertiefender Fragen* angeleitet (siehe Anhang 14.3.1 bzw. Anhang 14.3.3). Mithilfe dieser Fragen soll es ihnen erleichtert werden, implizit dargestellte Zusammenhänge im Diagramm zu erkennen und die Graphenverläufe kausal zu erklären. Die Fragen sollen die Lernenden dabei unterstützen, den von ihnen konstruierten Situationsraum intensiv nach kausalen Erklärungen für die Graphenverläufe zu durchsuchen. Insbesondere sollen die Fragen spezifisches, erklärungsrelevantes Vorwissen⁸⁴ der Lernenden über Mechanismen und Theorien aktivieren (siehe Abschnitt 5.5).

Vertiefende Fragen unterscheiden sich von Fragen der Informationsentnahme (z. B. Welchen Wert hat die Funktion/der Graph an der Stelle X?), die sich vornehmlich auf den Graphenraum und die explizit dargestellten Informationen beziehen (vgl. z. B. Ratwani, Trafton & Boehm-Davis 2003; Guthrie et al. 1993).

⁸⁴ Spezifisches Vorwissen wird im Rahmen der kognitiv aktivierenden Maßnahmen noch nicht aktiviert (siehe Abschnitt 5.3.2.2).

Die hier avisierten vertiefenden Fragen werden von Graesser und Olde (2003) als „good question“ (ebd., S. 525) oder „deep questions“ (ebd., S. 526) bezeichnet. Sie besitzen häufig einen Frage-Stamm, der beginnt mit „*why, how (did X occur), what are the consequences, what if, and what if not*“ (Graesser & Olde 2003, S. 524). Graesser und Olde 2003 betonen, dass sowohl zur Beantwortung als auch zur Konzeption vertiefender Fragen komplexe Schlussfolgerungsprozesse notwendig seien. Sie sprechen diesbezüglich von „inferences, hypothetical reasoning, and other processes at [...] higher levels“ (ebd., S. 524 f.).

Vertiefende Fragen, die zur elaborativen Interrogation geeignet sind, lassen sich folglich erst dann von den Lernenden formulieren (und beantworten), wenn sie mit dem Diagramm und dessen Inhalten vertraut sind. Das Stellen von Fragen an das Diagramm und das Beantworten der Fragen erfolgen daher in den Instruktiionsgruppen erst am Ende der instruktionalen Maßnahmen.

In der hier durchgeführten Untersuchung werden die Lernenden insbesondere zum Formulieren von *Wieso-/Warum-Fragen* angeregt. Die im Rahmen der Strukturierung gebildeten (Zeit-)Abschnitte (siehe Abschnitt 6.2.1.3.2) werden verwendet, um – durch das Vergleichen von Graphen innerhalb und zwischen diesen Abschnitten – die Entwicklung weiterer Fragen anzuregen. Die Lernenden werden daher bereits in Aufgabe 1 der elaborierend-interrogativen Maßnahmen dazu aufgefordert, die beim Strukturieren gebildeten Zeitabschnitte in Hinblick auf die Veränderung der Produktkonzentration innerhalb der einzelnen Versuche miteinander zu vergleichen. Aufbauend auf diesen Längsschnittvergleichen (siehe Abschnitt 4.2.1 sowie 4.4.2.1.2) sollen sie zu jedem Zeitabschnitt eine *Wieso-/Warum-Frage* formulieren (z. B. Wieso steigt die Produktkonzentration (PK) im ersten Zeitabschnitt schneller an als im zweiten Zeitabschnitt?). In Aufgabe 2 werden die Lernenden zum Tätigen von Querschnittsvergleichen zwischen den Versuchen aufgefordert. Sie sollen dazu mindestens drei Fragen formulieren (z. B. Wieso steigt die Produktkonzentration (PK) in Versuch A schneller an als in Versuch EK05?). Um ihnen die Bildung entsprechender Fragen zu erleichtern, werden Satzanfänge möglicher Fragen als Scaffold beispielhaft vorgegeben (siehe Anhang 14.3.1 bzw. Anhang 14.3.3).

Es sei darauf hingewiesen, dass in den Voruntersuchungen (siehe Abschnitte 5.4) einzelne Lernende Bedenken geäußert haben, Fragen zu verschriftlichen, die sie möglicherweise nicht eigenständig beantworten können. Solche Lernende konnten den Zweck des Stellens von vertiefenden Fragen an das Diagramm nicht eigenständig erkennen. Damit solche Lernende nicht durch etwaige Bedenken

beim Konstruieren der Fragen gehemmt werden, wird mithilfe eines Hinweisfeldes didaktisch reduziert erläutert, dass die Fragen das Gehirn beim ‚Nachdenken‘ über das Diagramm unterstützen sollen. In der Pilotierung der instruktionalen Maßnahmen (siehe Abschnitt 6.2.1.2) erwies sich dies als geeignete Maßnahme, um den Lernenden ihre Bedenken zu nehmen.

6.2.2. Untersuchungsdesign

Um die Wirksamkeit der instruktionalen Maßnahmen zu evaluieren und die beiden Forschungsfragen zu beantworten, wurden experimentell – allerdings unter eingeschränkter Randomisierung – fünf Gruppen, zwei Interventionsgruppen (*I*) und drei Kontrollgruppen (*K*), miteinander verglichen.

Die instruktionalen Maßnahmen wurden den Lernenden zusammen mit dem Untersuchungsdiagramm in Form von Selbstlernmaterialien in *Untersuchungsheften* dargeboten (siehe Anhang 14.3). Die jeweiligen Hefte sollten von den Lernenden eigenständig und selbstgesteuert bearbeitet werden. Die Experimentleitung hat lediglich in die (Selbst-)Lernaktivitäten eingeführt und Rückfragen beantwortet, sofern sich diese nicht auf die Inhalte des Diagramms bezogen.

Alle Gruppen, Interventionsgruppen (*I*) und Kontrollgruppen (*K*), erhielten das gleiche Untersuchungsdiagramm und die gleichen Informationen zum Laborexperiment sowie zur Durchführung der drei Versuche (siehe Abschnitt 6.2.1.1 und Anhang 14.3). Auch die Testaufgabe, *Erklären Sie das Diagramm ausführlich, d. h. begründen Sie auf Molekülebene, wieso die Graphen so verlaufen, wie sie verlaufen*⁸⁵ war in allen Gruppen identisch.⁸⁶

Die fünf Gruppen, die Interventionsgruppen *I-KA-S-EI-Erk* und *I-S-EI-Erk* sowie die Kontrollgruppen *K-Erk*, *K-Be-Erk* und *K-Erk-Be-nErk* sind in Tabelle 5 beschrieben. Lernende der Interventionsgruppe *I-S-EI-Erk* wurden durch Instruktionaufgaben – bevor sie das Diagramm erklärten (*Erk*) – gezielt bei der Strukturierung (*S*) sowie der elaborativen Interrogation (*EI*) unterstützt. Lernende der Interventionsgruppe *I-KA-S-EI-Erk* wurden zusätzlich dazu zunächst

⁸⁵ Um zu vermeiden, dass die Lernenden in der Testaufgabe das Diagramm (erneut) beschreiben, anstatt dieses zu erklären, wurde in allen Gruppen sowohl mündlich als auch schriftlich betont, dass eine Beschreibung des Diagramms nicht Gegenstand dieser Aufgabe ist.

⁸⁶ Lediglich in den beiden Interventionsgruppen *I-KA-S-EI-Erk* und *I-S-EI-Erk* wurden die Lernenden mithilfe eines Hinweises zusätzlich daran erinnert, beim Erklären auch die von ihnen während der elaborativen Interrogation an das Diagramm gestellten vertiefenden Fragen zu beantworten.

kognitiv aktiviert (*KA*), bevor sie die gleichen Instruktionsaufgaben wie die Lernenden der Interventionsgruppe *I-S-EI-Erk* bearbeiteten. Lernende der Kontrollgruppe *K-Erk* erhielten keinerlei Unterstützung beim Erklären des Diagramms. Lernende der Kontrollgruppen *K-Be-Erk* sollten das Diagramm zunächst beschreiben (*Be*), bevor sie die Graphenverläufe erklärten. Lernende der Kontrollgruppe *K-Erk-Be-nErk* erklärten analog zur Kontrollgruppe *K-Erk* zunächst das Diagramm, beschrieben es danach und ergänzten bzw. modifizierten anschließend ihre Erklärung (*nErk*).

Table 5. Übersicht über die Interventions- und Kontrollgruppen des Forschungsvorhabens

Abkürzung	Gruppe	Beschreibung	N
I-S-EI-Erk	Interventionsgruppe	Lernende dieser Interventionsgruppe (I) werden – bevor sie die Graphenverläufe erklären – mithilfe von instruktionalen Maßnahmen bei der Strukturierung des Diagramms in Zeichen (S) sowie der elaborativen Interrogation (EI) unterstützt. Die Lernenden werden allerdings nicht kognitiv aktiviert.	41
I-KA-S-EI-Erk	Interventionsgruppe	Lernende dieser Interventionsgruppe (I) werden – bevor sie die Graphenverläufe erklären – mithilfe von instruktionalen Maßnahmen zunächst kognitiv aktiviert (KA) und anschließend bei der Strukturierung des Diagramms in Zeichen (S) sowie der elaborativen Interrogation (EI) unterstützt.	161
K-Erk	Kontrollgruppe	Lernende dieser Kontrollgruppe (K) erklären die Verläufe der Graphen (Erk).	37
K-Be-Erk	Kontrollgruppe	Lernende dieser Kontrollgruppe (K) beschreiben zunächst das Diagramm (Be) und erklären danach die Verläufe der Graphen (Erk).	78
K-Erk-Be-nErk	Kontrollgruppe	Lernende dieser Kontrollgruppe (K) erklären analog zur Kontrollgruppe <i>K-Erk</i> die Verläufe der Graphen (Erk), beschreiben nachfolgend das Diagramm (Be) und werden nachträglich explizit aufgefordert – aufbauend auf ihrer Beschreibung – ihre anfangs gegebene Erklärung zu ergänzen (<i>nErk</i>).	187

Zu Beginn der Untersuchung (siehe Abbildung 47) erhielten alle Lernenden den gleichen Vorwissenstest. Im Anschluss an den Vorwissenstest haben die Lernenden – wie zuvor beschrieben – entweder zunächst Instruktionsaufgaben bearbeitet (Interventionsgruppen *I-KA-S-EI-Erk* und *I-S-EI-Erk*), direkt mit der Testaufgabe – der Erklärung des Diagramms (Erk) – begonnen (Kontrollgruppen *K-Erk*

und *K-Erk-Be-nErk*) oder das Diagramm zunächst beschrieben, bevor sie es erklärten (Kontrollgruppe *K-Be-Erk*). Nachdem die Lernenden die Graphenverläufe des Diagramms erklärt hatten, wurden sie in jeder Gruppe abschließend zur Einschätzung ihrer eigenen Leistung beim Erklären und zu ihrer kognitiven Belastung befragt, die sie beim Selbstlernen und beim Arbeiten mit dem Diagramm verspürt haben.

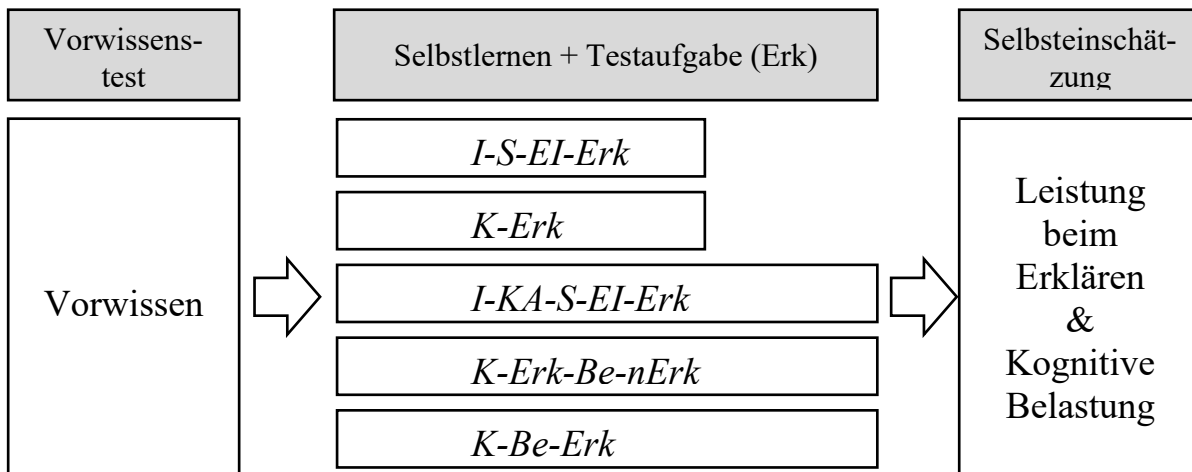


Abbildung 47. Übersicht über das Untersuchungsdesign (eigene Darstellung)

Die zur Beantwortung der Forschungsfragen 3a und 3b durchgeführten Vergleiche werden nachfolgend erläutert. Zur Beantwortung von Forschungsfrage 3a (siehe Abbildung 48) werden die Leistungen der Lernenden der Interventionsgruppe *I-S-EI-Erk* und die der Kontrollgruppe *K-Erk* beim Erklären der Graphenverläufe miteinander verglichen.

Beantwortung von Forschungsfrage 3a:	
<i>Welche Wirkung geht von strukturierenden und elaborierenden-interrogativen Maßnahmen aus?</i>	
Interventionsgruppe I-S-EI-Erk: Erklären der Graphenverläufe unterstützt durch strukturierende und elaborierend-interrogative Maßnahmen	Kontrollgruppe K-Erk: Erklären der Graphenverläufe (keinerlei Unterstützung)

Abbildung 48. Gruppenvergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 3a (eigene Darstellung)

Zur Beantwortung von Forschungsfrage 3b (siehe Abbildung 49) wird statt der Interventionsgruppe *I-S-EI-Erk* die Interventionsgruppe *I-KA-S-EI-Erk* verwendet.

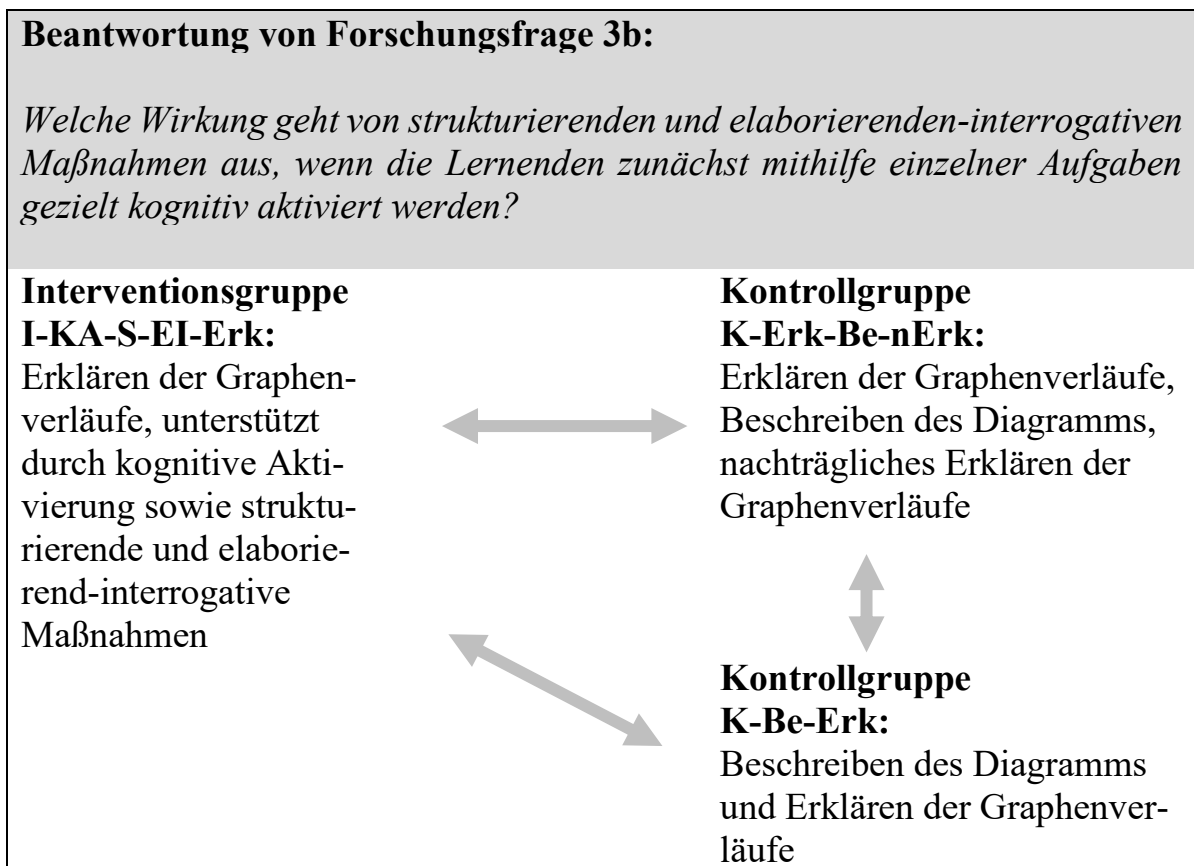


Abbildung 49. Gruppenvergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 3b (eigene Darstellung)

Die Interventionsgruppe *I-KA-S-EI-Erk* unterscheidet sich von der Interventionsgruppe *I-S-EI-Erk* durch die Einbindung kognitiv aktivierender Aufgaben (*KA*) in die Selbstlernmaterialien. Zur Bearbeitung der kognitiv aktivierenden Aufgaben (*KA*) benötigten die Lernenden durchschnittlich ca. 20 Minuten. Die Kontrollgruppe *K-Erk* erwies sich daher, da die Lernenden dieser Kontrollgruppe aufgrund der gegebenen Materialien sehr viel schneller mit dem Erklären des Diagramms fertig waren als die Lernenden Interventionsgruppe *I-KA-S-EI-Erk*, in der praktischen Durchführung der Untersuchung als ungeeignet, um diese mit der Interventionsgruppe *I-KA-S-EI-Erk* zu vergleichen. Aus diesem Grund wurde die Kontrollgruppe *K-Erk-Be-nErk* als Kontrollgruppe verwendet. Analog zur Kontrollgruppe *K-Erk* beginnen auch Lernende der Kontrollgruppe *K-Erk-Be-nErk* unmittelbar damit, das Untersuchungsdiagramm bzw. die Graphenverläufe zu erklären. Anders als in der Kontrollgruppe *K-Erk* beschreiben Lernende

der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk zusätzlich das Diagramm nachdem sie es erklärt haben. In einer nachträglichen Erklärung ergänzen sie dann ihre Erklärung um Aspekte, die ihnen beim Beschreiben aufgefallen sind.⁸⁷

Die Lernenden der Kontrollgruppe *K-Erk-Be-nErk* brauchten durchschnittlich ca. 20 Minuten, um das Diagramm zu beschreiben und haben daher ungefähr zeitgleich zu Lernenden der Gruppe *I-KA-S-EI-Erk* die Untersuchung abgeschlossen (siehe zu einer ausführlichen Beschreibung der Durchführung der Untersuchung Abschnitt 6.2.4). Der Vergleich der Gruppe *I-KA-S-EI-Erk* mit der Gruppe *K-Erk-Be-nErk* stellt die Hauptuntersuchung dieser Studie dar. Um zu überprüfen, ob bezüglich des Beschreibens Positionseffekte existierten, wurde zusätzlich zu der Gruppe K-Erk-Be-nErk eine zweite Kontrollgruppe in die Untersuchung einbezogen, die Kontrollgruppe *K-Be-Erk*. Analog zur Unterrichtspraxis beschreiben Lernende dieser Gruppe zunächst das Diagramm und erklären erst danach die Verläufe der Graphen.

6.2.3. Stichprobe

Die Untersuchungen wurden von Mai bis Juli 2016 durchgeführt. Insgesamt nahmen 510 Lernende der Jahrgangsstufe EF bzw. Q1/11 von 10 verschiedenen Schulen (Gymnasien und Gesamtschulen) in städtischen und ländlichen Regionen in NRW an der Untersuchung teil. Die meisten Lernenden waren zwischen 15 und 17 Jahren alt.

Durch Vorgespräche mit den jeweiligen Lehrkräften wurde sichergestellt, dass alle Lernenden im Unterricht bereits mit Liniendiagrammen gearbeitet haben und dass das Thema Enzymatik im Unterricht bereits umfassend behandelt worden war.

Von den insgesamt 510 Testheften mussten 6 Untersuchungshefte (1,18 %) von der Analyse ausgeschlossen werden: fünf wegen mangelnder Teilnahmebereitschaft und eines aufgrund von Sprachproblemen (ausgefüllt von einer französischsprachigen Austauschschülerin). Insgesamt wurden daher 504 Lernende in die Analyse⁸⁸ einbezogen (179 männlich und 325 weiblich). Der hohe Anteil an weiblichen Probandinnen (ca. 64 %) ist auf die Teilnahme einzelner Schulklassen eines reinen Mädchengymnasiums zurückzuführen.

⁸⁷ Nur wenige Lernende haben ihre anfänglich gegebene Erklärung nachträglich erweitert.

⁸⁸ Da auch bilinguale Biologiekurse an der Untersuchung teilnahmen, wurde den jeweiligen Lernenden gestattet, die Texte – sofern gewünscht – vollständig oder teilweise auf Englisch zu verfassen.

6.2.4. Durchführung der Untersuchung

Die Untersuchungen wurden in Schulklassen in Einzel- und Doppelstunden durchgeführt. In jeder Untersuchung wurden maximal zwei Gruppen miteinander verglichen. Die Gruppenvergleiche wurden wie in Abschnitt 6.2.2 beschrieben durchgeführt (siehe dazu insbesondere Abbildung 48 und Abbildung 49). Zu Beginn einer jeden Untersuchung wurden die Lernenden zunächst in das Untersuchungsdesign eingeführt und anschließend durch Randomisierung den jeweiligen Gruppen zugeordnet (siehe zum Erfolg der Randomisierung Abschnitte 6.3.1.2 und 7.3.1.3). Nach Zuteilung auf die Gruppen wurden die Untersuchungshefte ausgeteilt und den Lernenden wurde erläutert, wie diese zu bearbeiten sind (ca. 10 Minuten). Der Vorwissenstest (siehe insbesondere Abschnitt 6.3.1) wurde als Erstes bearbeitet (ca. 10 Minuten). Die Lernenden wurden darum gebeten, in ihrem Untersuchungsheft erst dann weiterzuarbeiten, wenn sie den Vorwissenstest vollständig beantwortet hatten. Ebenso wurden Lernende der Interventionsgruppen darum gebeten, die Aufgaben in ihren Lernmaterialien in der vorgegebenen Reihenfolge zu bearbeiten.

Die Untersuchungen zur Beantwortung von Forschungsfrage 3a wurden in Einzelstunden durchgeführt. Den Lernenden standen 60 Minuten zur Bearbeitung der Aufgaben zur Verfügung. Sofern die Unterrichtsstunden an den jeweiligen Schulen lediglich 45 Minuten lang waren, wurden die Pausen in die Untersuchung eingebunden. Für die Beantwortung der Aufgaben zum Strukturieren (S) und zum elaborativen Interrogieren (EI) benötigten die Lernenden durchschnittlich ca. 10 Minuten. Obgleich die Lernenden der Interventionsgruppe dadurch zu Beginn der Untersuchung mehr Zeit in die Analyse des Diagramms investierten, waren beiden Gruppen ungefähr gleich schnell mit der vollständigen Bearbeitung der Untersuchungshefte, inklusive der Selbsteinschätzung der eigenen Leistung und der kognitiven Belastung, fertig (maximal 40 Minuten).

Es sei betont, dass alle Lernenden dadurch ausreichend Zeit hatten, um das Diagramm – ihrer Meinung nach – vollständig zu erklären. Insgesamt dauerten die Untersuchungen zur Beantwortung von Forschungsfrage 3a somit maximal 60 Minuten.

Die Untersuchungen zur Beantwortung von Forschungsfrage 3b konnten nur in Doppelstunden (90 bzw. 120 Minuten) durchgeführt werden, da die Bearbeitung der kognitiv aktivierenden Aufgaben (KA) bzw. das Beschreiben des Dia-

gramms (Be) sehr zeitintensiv waren (ca. 20 Minuten). Auch in diesen Untersuchungen bearbeiteten die Lernenden aller drei Gruppen (I-KA-S-EI-Erk, K-Be-Erk, K-Erk-Be-nErk) die Untersuchungshefte ungefähr gleich schnell (maximal 60 Minuten). Die Einleitung in das Untersuchungsdesign, die Randomisierung sowie die Bearbeitung des Vorwissenstests nahmen auch hier ca. 20 Minuten in Anspruch. Insgesamt dauerten die Untersuchungen zur Beantwortung von Forschungsfrage 3b somit ca. 80 Minuten.

In Doppelstunden, die über 120 Minuten gingen, wurde die verbliebene Unterrichtszeit dazu genutzt, die Lernenden im Anschluss an die Untersuchung zu Problemen im Umgang mit dem Untersuchungsdiagramm und zum Einsatz der instruktionalen Maßnahmen zu befragen. In kürzeren Unterrichtsstunden wurden auch hier die Pausen in die Untersuchungen eingebunden.

6.2.5. Beschreibung der Variablen

6.2.5.1 Kontrollvariable und medierende Variable

6.2.5.1.1. Enzymatisches Vorwissen

Zu Beginn der Arbeit mit den Selbstlernmaterialien wurde das enzymatische Vorwissen der Lernenden mithilfe eines Vorwissenstest erhoben. Der Vorwissenstest besteht aus insgesamt 26 geschlossenen Items (siehe Anhang 14.2). In den ersten 18 Items muss aus 4 Antwortmöglichkeiten jeweils eine korrekte Antwort ausgewählt werden (Single-Choice-Items). In den letzten 8 Items werden zu jedem Itemstamm, vier Antwortmöglichkeiten/Aussagen vorgegeben, bei denen jeweils angegeben werden muss, ob die entsprechende Aussage zutrifft oder nicht (True-/False-Items). Jedes korrekt beantwortete Item wurde mit einem Punkt bewertet; jedes nicht beantwortete oder falsch beantwortete Item mit null Punkten. Wurde mehr als eine Antwort angekreuzt, so wurde das Item ebenfalls mit null Punkten bewertet. Entsprechend liegen zu jedem Item Informationen vor. Eine ausführliche Analyse des Vorwissenstests erfolgt in Abschnitt 6.3.1.

6.2.5.1.2. Kognitive Belastung

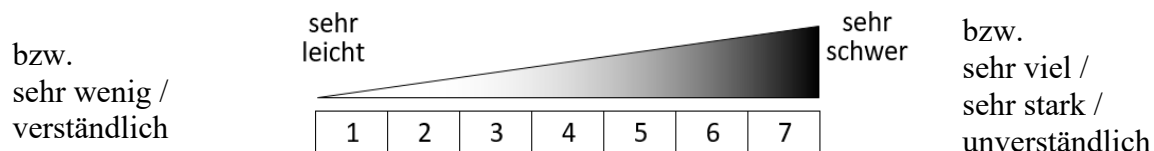
In der hier durchgeführten Untersuchung wurde angenommen, dass die kognitive Belastung der Lernenden einen direkten Effekt auf die Leistung beim Erklären des Untersuchungsdiagramms ausübt und gleichzeitig durch die Gruppenzugehörigkeit bzw. durch die jeweilige instruktionalen Maßnahme sowie das Vorwis-

sen beeinflusst wird (vgl. z. B. Schwamborn et al. 2011; Cierniak 2011). Vereinfachend kann hier von einem medierenden Effekt der kognitiven Belastung auf die Leistung beim Erklären gesprochen werden. Es sei darauf hingewiesen, dass darüber hinaus weitere, komplexe Zusammenhänge bzw. Interaktionseffekte möglich erscheinen (vgl. insbesondere Cierniak et al. 2009; Cierniak 2011; siehe dazu auch Abschnitt 4.3.2.3). Mögliche Interaktionseffekte sollen im Rahmen dieser Arbeit aber nicht tiefergehend betrachtet werden. Die Variable kognitive Belastung wird in der hier durchgeführten Untersuchung ausschließlich zur Erklärung der Wirksamkeit der instruktionalen Maßnahmen herangezogen.

Die kognitive Belastung wurde auf zwei unterschiedliche Arten erhoben. Zum einen als kognitive Belastung im Ganzen (Gesamt-CL), entsprechend den Ausführungen von Paas (1992), und zum anderen, wie in Abschnitt 3.8.3 beschrieben, differenziert in die drei Dimensionen: extrinsische (ECL), intrinsische (ICL) und lernbezogene kognitive Belastung (GCL). Zur Erfassung des GCL wird in dieser Arbeit das Konzept der durchschnittlich in das Lernen bzw. Verstehen investierten mentalen Anstrengung (engl. Average Invested Mental Effort – AIME) nach Salomon (1984) verwendet (siehe Argumentation in Abschnitt 3.8.3). Der GCL entspricht somit in der hier durchgeführten Untersuchung der durchschnittlichen kognitiven Energie, welche die Lernenden freiwillig in das Verstehen des Diagramms investieren. Vor dem Hintergrund der ausführlichen Erläuterungen in Abschnitt 3.8.3 und Abschnitt 5.3.2.3 wird angenommen, dass ECL und ICL eine negative kognitive Belastung für das Arbeitsgedächtnis darstellen und der GCL/AIME eine positive. Die drei Arten kognitiver Belastung wurden mittels subjektiver Selbsteinschätzung der Lernenden anhand von Ratingskalen gemessen (vgl. z. B. Gerjets et al. 2009; Cierniak et al. 2009; Paas 1992).⁸⁹ Die Lernenden konnten die Fragen entsprechend der in Abbildung 50 dargestellten diskreten, siebenstufigen Skalen beantworten. Es wurden jeweils die Endpunkte der Skalen benannt (vgl. Zander 2010; Kalyuga 1998; Kalyuga, Chandler & Sweller 1998, 1999; Paas & van Merriënboer 1993, 1994; Paas et al. 2003; Schwamborn et al. 2011).

Eine empirische Überprüfung der messtheoretischen Annahmen erfolgt in Abschnitt 8.3.1.

⁸⁹ Auch hinsichtlich des Konzeptes AIME betont Salomon (1984): “Although individuals may not be valid sources of information pertaining to the factors that affect their decisions [...], they may nevertheless be relatively accurate in reporting the effort they invest in processing a unit of material“ (ebd., S. 648).



Geamt-Cognitive Load (Gesamt-CL)
Wie viel geistige Denk-Anstrengung mussten Sie aufwenden, um das Diagramm zu erklären? (vgl. Paas 1992)
Intrinsische Kognitive Belastung (ICL)
ICL1: Wie leicht oder schwer finden Sie das Thema Enzymatik zum derzeitigen Zeitpunkt? (vgl. Gerjets et al. 2009)
ICL2: Wie leicht oder schwer ist es Ihnen gefallen, das Diagramm zu verstehen? (vgl. Cierniak et al. 2009)
ICL3: Wie leicht oder schwer ist es Ihnen gefallen, das Diagramm schriftlich zu erklären? (vgl. Cierniak et al. 2009)
ICL4: Wie leicht oder schwer ist es Ihnen gefallen, die Informationen in dem Diagramm mit dem zu verknüpfen, was Sie bereits über das Thema Enzymatik wussten? (vgl. Zander 2010)
Lernbezogene Kognitive Belastung (GCL)
GCL1: Wie stark haben Sie sich beim Erklären der Graphen konzentriert? (vgl. Salomon 1984)
GCL2: Wie stark haben Sie sich beim Lesen des Diagramms konzentriert? (vgl. Salomon 1984)
GCL3: Wie stark haben Sie sich angestrengt, um den Verlauf der Graphen zu verstehen? (vgl. Salomon 1984; Gerjets et al. 2004, 2006)
GCL4: Was denken Sie, wie stark sich Ihre Klassenkameraden angestrengt haben, um das Diagramm zu verstehen? (vgl. Salomon 1984)
Extrinsische Kognitive Belastung (ECL)
ECL1: Wie sehr mussten Sie sich anstrengen, um sich durch die Materialien zu navigieren? (vgl. Gerjets et al. 2006)
ECL2: Wie leicht oder schwer fanden Sie es, mit den Materialien zu arbeiten? (vgl. Zander 2010)
ECL3: Wie leicht oder schwer fanden Sie es, alle Informationen zusammenzutragen, die Sie für das Erklären des Diagramms brauchten? (vgl. Zander 2010)
ECL4: Wie verständlich fanden Sie die hier gestellten Arbeitsaufträge? (vgl. Leppink et al. 2013, 2014)

Abbildung 50. Items zur Erfassung der kognitiven Belastung (eigene Darstellung)

6.2.5.2 Abhängige Variablen

6.2.5.2.1. Umfang der Erklärung

Um einen ersten Überblick über den Umfang der gegebenen Erklärungen in den jeweiligen Gruppen zu erhalten, wurde ermittelt, wie viele Wörter die Lernenden in ihren Erklärungen geschrieben haben. Dazu wurden alle Lernerantworten digitalisiert und die entsprechenden Wörter maschinell ausgezählt. Da die Lernenden in unterschiedlichem Ausmaß Abkürzungen verwendet haben, wurde bewusst die Wortzahl und nicht die Anzahl an Buchstaben verwendet.

6.2.5.2.2. Vollständigkeit der Erklärung

Um zu quantifizieren wie vollständig die Erklärungen der einzelnen Lernenden sind, wurde in Anlehnung an vergleichbare Untersuchungen (vgl. Brandstetter-Korinth 2017; Mautone & Mayer 2007, Tsuji 2011) die Anzahl der von den Lernenden fachlich korrekt formulierten Erklärungshypothesen ermittelt. Insgesamt finden sich im Diagramm acht Aspekte (Graphen- und Graphenabschnitte), die mithilfe enzymatischen Vorwissens erklärt werden können. Die acht erklärungsrelevanten Aspekte können mithilfe verschiedener Fragen adressiert werden (siehe elaborativen Interrogation in Abschnitt 6.2.1.3.3). Abbildung 51 veranschaulicht beispielhaft mögliche elaborativ interrogierende Fragen.

Zu jedem der acht Aspekte sollte es den Lernenden, vor dem Hintergrund ihres im Unterricht erworbenen Vorwissens, möglich sein, eine angemessene mechanistische Erklärung (siehe Abschnitt 3.5) zu liefern. Der Erwartungshorizont wurde deduktiv aus fachwissenschaftlichen Lehrwerken abgeleitet (vgl. Bommarius & Riebel 2004; Kuriyan, Konforti & Wemmer 2012; Alberts et al. 2011; Phillips et al. 2012; Randall et al. 2002; siehe Abschnitt 6.2.1.1) und vor dem Hintergrund der Stichprobe sowie den empirischen Erkenntnissen der Voruntersuchungen an die zu erwartenden Lernerfähigkeiten angepasst. Jede fachlich korrekte Erklärungshypothese wird mit einem Punkt bewertet; die Lernenden können folglich maximal acht Punkte beim Erklären erreichen. Die vor dem Hintergrund der Stichprobe als fachlich korrekt bzw. als fachlich angemessen betrachteten Erklärungshypothesen werden im Folgenden beschrieben (siehe Abbildung 51 und Tabelle 6).

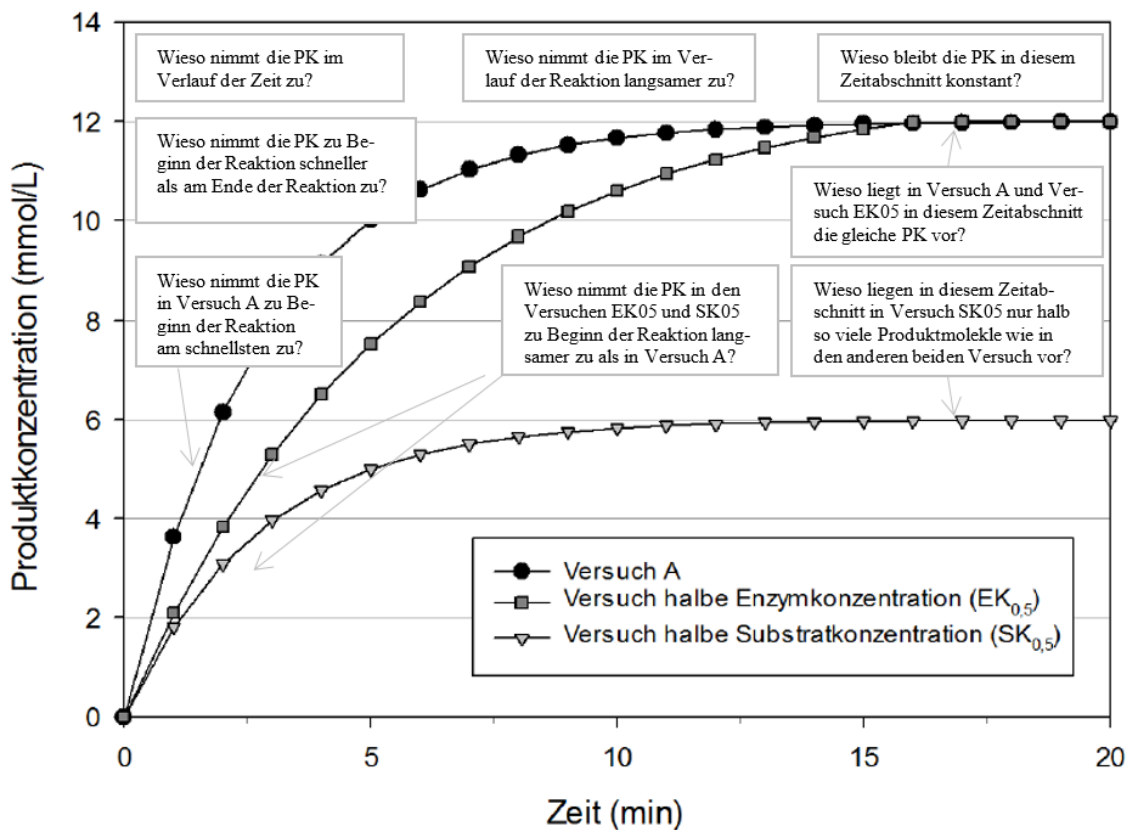


Abbildung 51. Untersuchungsdiagramm (Darstellung der Veränderung der Produktkonzentration in drei Versuchen A, EK05 und SK05), das mit elaborierenden-interrogativen Fragen annotiert wurde (modifiziert durch den Verfasser nach Bettina Zeis 2014).

Der erste erklärungsrelevante Aspekt, die Beobachtung, dass die Produktkonzentration (PK) im Verlauf der Zeit zunimmt (siehe Zeile 1 in Tabelle 6), könnte beispielsweise erklärt werden, indem die Lernenden ausführen, dass Enzymmoleküle die Umsetzung von Substrat- zu Produktmolekülen katalysieren. Die Frage *Wieso nimmt die PK im Verlauf der Zeit zu?* könnte diesen Aspekt adressieren (siehe Abbildung 51). Aspekt 2 (siehe Zeile 2 in Tabelle 6) lässt sich beispielsweise mithilfe der Fragen *Wieso nimmt die PK zu Beginn der Reaktion schneller als am Ende der Reaktion zu?* / *Wieso nimmt die PK im Verlauf der Zeit langsamer zu?* adressieren. Als Erklärung könnte angeführt werden, dass die Produktkonzentration in der Lösung zu Beginn der Reaktion relativ schnell ansteigt, weil die Wahrscheinlichkeit, dass Substrat- und Enzymmolekül aufeinandertreffen, zu Beginn der Reaktion höher ist als gegen Ende der Reaktion. Im Verlauf der Reaktion bzw. der Zeit nimmt die Konzentration an Substratmolekülen ab, da sie zu Produktmolekülen katalysiert werden. Je weniger Substratmoleküle vorliegen, umso geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym- und Substratmoleküle aufeinandertreffen. Pro Zeiteinheit können daher im Verlauf der Reaktion immer weniger Produktmoleküle entstehen.

Tabelle 6. Übersicht über die acht erklärungsrelevanten Aspekte des Untersuchungsdiagramms und der erwarteten Erklärungen

#	Zu erklärender Aspekt	Erklärung, die vor dem Hintergrund der Stichprobe als fachlich korrekt bzw. angemessen betrachtet wird.
1	Produktkonzentration (PK) nimmt im Verlauf der Zeit zu.	Die PK nimmt im Verlauf der Zeit zu, weil die Enzymmoleküle die Umsetzung von Substrat- zu Produktmolekülen katalysieren.
2	Schnellerer Anstieg der PK zu Beginn der Reaktion bzw. Abnahme der Reaktionsgeschwindigkeit im Verlauf der Reaktion	Die PK nimmt im Verlauf der Reaktion bzw. der Zeit langsamer zu (bzw. die Reaktionsgeschwindigkeit nimmt im Verlauf der Reaktion/Zeit ab), weil im Verlauf der Reaktion/Zeit weniger Substratmoleküle in der Lösung vorliegen, die zu Produktmolekülen umgesetzt werden können.
3	PK bleibt am Ende der Reaktion konstant.	Am Ende der Reaktion liegen keine Substratmoleküle mehr in der Lösung vor, die zu Produktmolekülen umgesetzt werden können.
4	Maximale Produktkonzentration in den Ansätzen A und EK05 identisch	Da in beiden Ansätzen die gleiche Substratkonzentration eingesetzt wurde und die Substratmoleküle im Verlauf der Reaktion vollständig zu Produktmolekülen umgesetzt werden, resultiert aus dem Einsatz der gleichen Substratkonzentration letztendlich die gleiche maximale Produktkonzentration.
5	Maximale Produktkonzentration in Ansatz SK05 beträgt nur die Hälfte der Ansätze A und EK05.	Erklärung erfolgt analog zu Aspekt 4: Eine geringere Substratkonzentration führt zu einer geringeren Produktkonzentration. Obgleich die Erklärungen zu den Aspekten 4 und 5 ähnlich erscheinen, konnten in der Untersuchung mehrere Lernende identifiziert werden, die nur einen dieser beiden Aspekte erklärt haben. Es war daher notwendig, die beiden Aspekte getrennt voneinander zu analysieren und zu bewerten.
6	Reaktionsgeschwindigkeit in Versuch A zu Beginn der Reaktion höher als in den anderen beiden Versuchen (EK05 und SK05)	Die Reaktionsgeschwindigkeit ist in Ansatz A zu Beginn der Reaktion höher als in den anderen beiden Ansätzen, da in diesem Ansatz zu Beginn der Reaktion sowohl die höchste Anzahl an Substrat- als auch die höchste Anzahl an Enzymmolekülen vorliegt. Daraus folgt, dass hier die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym- und Substratmoleküle aufeinandertreffen, hier höher ist als in den anderen beiden Versuchen.
7	Reaktionsgeschwindigkeit in Ansatz EK05 zu Beginn der Reaktion geringer als in Ansatz A	Die in Ansatz EK05 im Vergleich zu Ansatz A reduzierte Enzymkonzentration bedingt, dass hier weniger Enzymmoleküle in der Lösung vorliegen. Die Wahrscheinlichkeit, dass Substrat- und Enzymmoleküle aufeinandertreffen wird dadurch reduziert. Einzelne Lernende haben zur Erklärung dieses Aspektes argumentiert, dass durch die reduzierte Anzahl an Enzymmolekülen die Gesamt-Umsetzungsgeschwindigkeit reduziert werde. Vor dem Hintergrund des Schulunterrichts bzw. des Vorwissens der Lernenden wurde dies nicht als falsch gewertet.
8	Reaktionsgeschwindigkeit in Ansatz SK05 zu Beginn der Reaktion geringer als in Ansatz A	Analog zu Aspekt 7 führt auch die verringerte Anzahl an Substratmolekülen zu einer verringerten Wahrscheinlichkeit, dass Substrat- und Enzymmoleküle aufeinandertreffen. Zudem liegen insgesamt weniger Substratmoleküle vor, die zu Produktmolekülen umgesetzt werden können. ⁹⁰

⁹⁰ Hinsichtlich der verringerten Reaktionsgeschwindigkeit in Ansatz SK05 im Vergleich zu Ansatz A und EK05 könnten hier zusätzlich Vermutungen über den Einfluss des Molekulargewichts der Enzyme auf deren Diffusionsgeschwindigkeit aufgestellt werden (vgl. z. B. Bommarius & Riebel 2004; Kuriyan et al. 2012). So gilt z. B. in vielen enzymatischen Reaktionen: „The enzyme molecule is much larger than the substrate or product molecule [...] and thus diffuses much more slowly“ (Bommarius & Riebel 2004, S. 27). Entsprechende Erklärungsansätze wurden von den Lernenden aber nicht erwartet.

Aspekt 3 (siehe Zeile 3 in Tabelle 6) könnte mithilfe der Frage adressiert werden *Wieso bleibt die Produktkonzentration nach einer gewissen Zeit konstant?*. Um diese Frage zu beantworten, müssen die Lernenden erklären, dass nach einer gewissen Zeit alle Substratmoleküle umgesetzt wurden und entsprechend auch keine zusätzlichen Produktmoleküle mehr entstehen können.

Weitere erklärungsrelevante Aspekte beziehungsweise Fragen treten erst durch den Vergleich der jeweiligen Graphen bzw. der Versuche untereinander hervor (siehe Ausführungen zu Querschnittvergleichen in Abschnitt 4.2.1 sowie 4.4.2.1.2). So stellt sich beispielsweise erst durch Vergleich der Versuche A und EK05 (siehe Aspekt 4 in Tabelle 6) die Frage *Wieso ist die PK in Versuch A und EK0,5 gegen Ende der Reaktion gleich?*. Zu weiteren Erklärungen sei auf Tabelle 6 verwiesen.

Es sei darauf hingewiesen, dass neben den eigentlichen Erklärungen auch die Beschreibungen der Lernenden (siehe Kontrollgruppen K-Be-Erk und K-Erk-Be-nErk) dahingehend überprüft wurden, ob sie einzelne der in Tabelle 6 genannten Erklärungen enthalten. Wenn dies der Fall war, dann wurden die entsprechenden Ausführungen als Erklärungen in die Analyse einbezogen.

6.2.5.2.3. Selbsteinschätzung der eigenen Leistung beim Erklären

Nachdem die Lernenden das Diagramm bzw. die Graphenverläufe ihrer Meinung nach vollständig erklärt hatten, sollten sie, aufbauend auf der Frage *Wie erfolgreich waren Sie Ihrer Meinung nach beim Erklären des Diagramms?* ihre Leistung beim Erklären des Diagramms selbst einschätzen (*Selbsteinschätzung*). Analog zur Messung der kognitiven Belastung konnten die Lernenden ihre Antwort auf einer siebenstufigen Skala von *sehr erfolgreich* bis *überhaupt nicht erfolgreich* mitteilen (vgl. Hart & Staveland 1988).

6.2.6. Verwendung quantitativer Methoden

Zum Vergleich der einzelnen Gruppen werden Unterschiedsanalysen durchgeführt. Die Ergebnisse werden mithilfe verschiedener Hypothesentests gegen den Zufall abgesichert.

Je nach Forschungsfrage, Skalenniveau und Verteilung der jeweiligen Datenwerte wurden parametrische Testverfahren wie der t-Test für unabhängige Grup-

pen sowie die Varianzanalyse (ANOVA) oder deren nicht-parametrische Äquivalente, der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test⁹¹ bzw. der Kruskal-Wallis-Test⁹², verwendet (vgl. Field, Miles & Field 2012; Bühner & Ziegler 2009; Bortz & Schuster 2010). Wenn sich mittels Varianzanalyse bzw. Kruskal-Wallis-Test signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen feststellen lassen, so werden nachfolgende Post-Hoc-Analysen mittels konservativer Bonferroni-Korrektur durchgeführt.

In Hinblick auf die Effektstärke möglicher Unterschiede wird – orientiert an Cohen (1988) sowie Hattie (2009) – zur erleichterten Vergleichbarkeit mit anderen Studien sowohl der Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient r als auch Cohen's d berichtet. Nach Cohen (1988) indiziert $r = .1$ bzw. $d = 0.2$ einen kleinen Effekt, $r = .3$ bzw. $d = 0.5$ einen mittleren Effekt und $r = .5$ bzw. $d > 0.8$ einen großen Effekt (vgl. ebd., siehe dazu insbesondere Ausführungen von Hattie (2009) zur *zone of desired effects*).⁹³ Zur Durchführung der quantitativen Analysen wurden die Statistik-Software R 3.5.2 (R Core Team 2018) verwendet.

Voraussetzung zur Anwendung der parametrischen Verfahren sind insbesondere metrisches Skalenniveau der abhängigen Variablen, Normalverteilung der unter-

⁹¹ Der *Wilcoxon-Mann-Whitney-Test* wird in der Literatur auch als *Wilcoxon-Rangsummentest* oder *Mann-Whitney-U-Test* bezeichnet. Der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test wird mithilfe des R-Befehls `wilcox.test` für ungepaarte Stichproben durchgeführt. Die dadurch ermittelte Teststatistik wird zwar als Teststatistik W ausgegeben, entspricht aber der Teststatistik des Mann-Whitney-Tests (U -Wert) (vgl. Field et al. 2012). Es wird daher im Folgenden nicht der W -Wert, sondern der U -Wert berichtet. Es sei zudem darauf hingewiesen, dass beim Wilcoxon-Mann-Whitney-Test geprüft wird, ob die zentralen Tendenzen zweier unabhängiger Stichproben unterschiedlich sind. Dazu werden Ränge miteinander verglichen. Field et al. (2012) nennen daher den Median als geeignetes Lagemaß zur Berichterstattung. Um die Gruppenvergleiche zu erleichtern, wird in einem solchen Fall zusätzlich zum Median auch der Mittelwert berichtet. Auf mögliche Probleme bei der Interpretation des Mittelwertes sei damit hingewiesen.

⁹² Als Prüfgröße für den Kruskal-Wallis-Test wird der H -Wert berechnet. Im Fall des Vergleichs großer Stichproben nähert sich die H -Verteilung der χ^2 -Verteilung an. Es wird daher hier ausschließlich der χ^2 -Wert berichtet (vgl. Rasch et al. 2010). Im Falle eines signifikanten Kruskal-Wallis-Tests werden Post-Hoc-Analysen unter Verwendung der konservativen Bonferroni-Korrektur durchgeführt. Eigentlich müsste hier der U -Wert berichtet werden. Ähnlich wie für den H -Wert ausgeführt, nähert sich bei großen Stichproben die U -Verteilung der Z -Verteilung an. Statt des U -Wertes wird daher der Z -Wert berichtet (vgl. Rasch et al. 2010).

⁹³ Zur Berechnung und Umrechnung der einzelnen Effektgrößen ineinander siehe insbesondere Lenhard und Lenhard (2016).

suchten Merkmale in den einzelnen Gruppen sowie Homogenität der entsprechenden Varianzen zwischen den Gruppen (Field et al. 2012; Bühner & Ziegler 2009; Bortz & Schuster 2010).

Liegen keine gravierenden Abweichungen von der Normalverteilung vor⁹⁴ und finden sich keine Hinweise, die gegen die Annahme der Varianzhomogenität sprechen, so werden die Gruppenvergleiche mithilfe des t-tests sowie der ANOVA, unter Verwendung nachträglicher Post-hoc-Analysen durchgeführt. Andernfalls werden der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test bzw. Kruskal-Wallis-Test, verwendet (vgl. Field et al. 2012; Bühner & Ziegler 2009; Ogle 2016; Bortz & Schuster 2010).

Für die Variablen *Enzymatisches Vorwissen*, *Kognitive Belastung* (*Gesamt-CL* sowie *ICL*, *ECL* & *GCL*), *Umfang der Erklärung*, *Vollständigkeit der Erklärung* und *Selbsteinschätzung* wird metrisches Skalenniveau angenommen (vgl. Brandstetter-Korinth 2017; Mautone & Mayer 2007; Hart & Staveland 1988; Paas 1992; Berthold & Renkl 2009; Leppink et al. 2014; Hadie & Yusoff 2016). Die Annahme der Normalverteilung wird für jede Gruppe und jede Variable einzeln analysiert. Es werden sowohl grafische Analyseverfahren, Kennzahlen für Schiefe und Kurtosis sowie Hypothesentests verwendet. Zunächst wird mittels *Kolmogorow-Smirnow-Test* (*KS-Test*) und *Shapiro-Wilk-Test* geprüft, ob statistisch signifikante Abweichungen von der Normalverteilung in den einzelnen Gruppen vorliegen. Da beide Testverfahren bei großen Stichproben schnell signifikant werden, werden bei einem signifikanten Testergebnis – insbesondere im Fall der großen, zur Beantwortung von Forschungsfrage 3b untersuchten Gruppen – zusätzlich grafische Plots sowie Kennzahlen (Schiefe und Kurtosis) zur Beurteilung der Normalverteilungsannahme berücksichtigt (vgl. Field et al. 2012). Die Ergebnisse werden zu einer Gesamtaussage verdichtet (siehe Spalte Überprüfung Normalverteilungsannahme in Tabelle 7).

Ob sich die Varianzen in den einzelnen zur Beantwortung der Forschungsfragen relevanten Vergleichsgruppen unterscheiden, wird mittels *Levene-Test* überprüft (vgl. Field et al. 2012; siehe Spalte Überprüfung der Varianzhomogenität in den Vergleichsgruppen in Tabelle 7).

Aufbauend auf der Überprüfung der Normalverteilungsannahme und der Annahme der Varianzhomogenität wird in der letzten Spalte von Tabelle 7 – unter

⁹⁴ Sowohl der t-Test als auch die einfaktorielle ANOVA sind relativ robust gegenüber Verletzungen der Normalverteilung (vgl. z. B. Blanca et al. 2017; Havlicek & Peterson 1974).

Abwägung von Teststärke und einer möglichen Erhöhung des Alpha-Fehlers – eine Empfehlung für eines der oben genannten Testverfahren geben.

Tabelle 7. Übersicht über Hinweise zur Verteilung und Streuung der analysierten Merkmale in den Vergleichsgruppen und Empfehlung eines Testverfahrens

Variable	Überprüfung Normalverteilungsannahme	Überprüfung Varianzhomogenität in den Vergleichsgruppen		empfohlenes Testverfahren
		Vergleiche F3a	Vergleiche F3b	
<i>Enzymatisches Vorwissen</i>	Keine wesentliche Abweichung von der Normalverteilung in den einzelnen Gruppen	F(1, 76) = 0.04, p = .836	F(2, 423) = 1.91, p = .149	F3a: t-Test F3b: ANOVA
<i>Kognitive Belastung beim Erklären</i>	Keine wesentliche Abweichung von der Normalverteilung in den einzelnen Gruppen	F(1, 76) = 0.60, p = .441)	F(2, 423) = 1.39, p = .250	F3a: t-Test F3b: ANOVA
<i>Umfang der Erklärung</i>	Keine wesentliche Abweichung von der Normalverteilung in den einzelnen Gruppen	F(1, 76) = 0.11, p = .74	F(2, 423) = 1.19, p = .30	F3a: t-Test F3b: ANOVA
<i>Vollständigkeit der Erklärung</i>	Wesentliche Abweichung von der Normalverteilung in den Vergleichsgruppen zur Beantwortung von Forschungsfrage 3 a; Wesentliche Abweichungen von der Normalverteilung in den Vergleichsgruppen zur Beantwortung von Forschungsfrage 3b	F(1, 76) = 6.02, p = .016*	F(2, 423) = 16.40, p < .001***	F3a: Wilcoxon-Mann-Whitney-Test F3b: Kruskal-Wallis-Test
<i>Selbsteinschätzung</i>	Keine wesentliche Abweichung von der Normalverteilung in den Vergleichsgruppen zur Beantwortung von Forschungsfrage 3 a; Wesentliche Abweichungen von der Normalverteilung in den Vergleichsgruppen zur Beantwortung von Forschungsfrage 3b	F(1, 76) = 1.75, p = .189	F(2, 423) = 0.20, p = .821	F3a: t-Test F3b: Kruskal-Wallis-Test

Anmerkung. * $p < .05$. ** $p < .01$. *** $p < .001$.

6.3. Auswertung zur Beantwortung von Forschungsfrage 3

Die Auswertung der durchgeführten Untersuchung zur Beantwortung von Forschungsfrage 3 gliedert sich in die Analyse des Vorwissenstests (Abschnitt 6.3.1) und den Vergleich der Untersuchungsgruppen in Hinblick auf die zuvor beschriebenen Variablen (Abschnitt 6.3.2). Es sei bereits darauf hingewiesen, dass im Rahmen der Beantwortung von Forschungsfrage 5 (siehe Kapitel 8) eine vertiefende Analyse der empirisch gewonnenen Informationen stattfinden wird.

6.3.1. Ergebnisse der Auswertung des Vorwissenstests

6.3.1.1 Itemanalyse des Vorwissenstests

Ziel der Itemanalyse ist die Beurteilung der Items hinsichtlich Schwierigkeit, Trennschärfe und Reliabilität. Ungeeignete Items werden vollständig von der Analyse ausgeschlossen (vgl. Kuckartz et al. 2013; Döring & Bortz 2016; Bühner 2011). Der eingesetzte Vorwissenstest (siehe Anhang 14.2) enthält 26 Items bestehend aus 18 Forced- bzw. Single-Choice-Items und 8 True-/False-Items (siehe Abschnitt 6.2.5.1.1).

In einem ersten Analyseschritt, der *Sub-Analyse*, wurden zunächst die acht True-/False-Items einzeln analysiert. Jedes True-/False-Item enthält vier Unteritems. In der Sub-Analyse wurde vereinfachend angenommen, dass es sich bei den vier Unteritems um eigenständige, voneinander unabhängige Items handeln würde. Zu Beginn der Sub-Analyse bestand die Gesamtskala daher übergangsweise aus 50 Items (18 Single-Choice-Items und 32 True-/False-Unteritems). Die korrekte Lösung der True-/False-Unteritems wurde mit einem Punkt bewertet. Darauf aufbauend wurde die Trennschärfe ermittelt. Die Trennschärfe ist definiert als Korrelation eines Items mit der Gesamtskala, aus der zuvor das entsprechende Item entfernt wurde (vgl. Hartmann & Reinecke 2013; Bühner 2011). Sie zeigt an, ob das jeweilige Item geeignet ist, zwischen leistungsstarken und leistungsschwachen Lernenden zu unterscheiden (vgl. Roth, Heidenreich & Holling 1999; Moosbrugger & Kelava 2012). Trennschärfen zwischen 0.4 und 0.7 gelten als gut; Trennschärfen unter 0.25 als ungeeignet (vgl. Döring & Bortz 2016; Moosbrugger & Kelava 2012; Bühner 2011). Vier der 32 True-/False-Unteritems (20, 28, 30, 34) wurden wegen Trennschärfen < 0.1 von der Analyse ausgeschlossen.

Die verbliebenen 28 Unteritems wurden anschließend wieder zu den ursprünglichen 8 True-/False-Items (Items 19 bis 26) zusammengefasst. Dabei wurde ein True-/False-Item als korrekt gelöst bewertet, wenn mehr als 50 % der Unteritems korrekt beantwortet wurden.

Aufbauend auf der Sub-Analyse wurde die Trennschärfe für die nun gebildeten 26 Items überprüft. Insbesondere True-/False-Item Nr. 21 (*Die maximal mögliche Anzahl an Produktmolekülen, die bei einer enzymatischen Reaktion entstehen können, lässt sich steigern durch eine Erhöhung der ...*) besitzt eine sehr geringe Trennschärfe (.135). Der Threshold für die vollständig korrekte Lösung von Item 21 wurde daher individuell angepasst (vgl. Bühner 2011). Item 21 gilt als vollständig korrekt gelöst, wenn mindestens 50 % der Antwortmöglichkeit korrekt beantwortet wurden. Die Trennschärfe von Item 21 konnte so von .135 auf .154 gesteigert werden. Obgleich die Trennschärfe noch nicht als zufriedenstellend bezeichnet werden kann, wird das Item aufgrund der Nähe zum Untersuchungskontext weiterhin in die Analyse einbezogen. Eine geringe Trennschärfe zeigte sich zudem für Item 9 (*Was wird durch das Enzym Amylase abgebaut?* [Stärke]) und Item 13 (*Die meisten Enzyme, die im menschlichen Organismus aktiv sind, werden ...* [in Zellen produziert]). Die Trennschärfe für Item 9 beträgt .17, die für Item 13 beträgt .14. Beide Items erfordern zur Lösung fast ausschließlich deklaratives Wissen, das, anders als im Fall von Item 21, in einer weniger direkten Verbindung zum spezifischen Untersuchungskontext steht. Beide Items, Item 9 und 13, werden daher, aufgrund ihrer geringen Trennschärfen, von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Die verbliebenen 24 Items sind in Tabelle 8 dargestellt.

Durch Ausschluss der Items 9 und 13 konnte Cronbachs Alpha (α) von 0.810 auf 0.814 gesteigert werden.⁹⁵ Durch Ausschluss von Item 15 könnte die Reliabilität theoretisch auf 0.815 gesteigert werden (siehe Tabelle 8). Item 15 besitzt jedoch eine hohe inhaltliche Nähe zum spezifischen Untersuchungskontext und wird daher weiterhin in die Analyse einbezogen.

⁹⁵ Cronbachs Alpha ist ein Maß für die Reliabilität des Messinstrumentes. Die Reliabilitätswerte können zwischen 0 (unreliabel) und 1 (perfekte Reliabilität) liegen (vgl. Kuckartz et al. 2012). Ein Wert von 0.81 für Cronbachs Alpha kann als akzeptabel bis gut betrachtet werden (vgl. Lienert & Raatz 1998; Bortz & Döring 2006; Bühner 2011; Tepner & Dollny 2014).

Tabelle 8. Items des nach Itemanalyse überarbeiteten Vorwissenstests

Item [Lösung]	<i>SD</i>	Schiefe	Schwierigkeit	Trennschärfe	α , wenn gelöscht
1. Aus welchen Grundbausteinen sind die meisten Enzyme aufgebaut? [Aminosäuren]	0.32	-2.41	.88	.20	.813
2. Ein Enzym-Substrat-Komplex ist dadurch charakterisiert, dass ein Substrat sich ... [vorübergehend mit einem Enzym verbindet]	0.45	-0.94	.71	.35	.808
3. Ein Enzym, das eine Reaktion katalysiert hat, geht aus dieser Reaktion typischerweise wie hervor? [unverändert]	0.50	-0.16	.54	.48	.801
4. Welche Enzymstruktur lässt sich als langgezogene Kette darstellen? [Primärstruktur]	0.50	-0.01	.50	.26	.813
5. Enzyme beschleunigen chemische Reaktionen, indem sie die für die Reaktion notwendige Aktivierungsenergie ... [senken]	0.50	0.17	.46	.52	.800
6. Die meisten Enzyme gehören zur Stoffgruppe der ... [Eiweiße bzw. Proteine]	0.42	-1.27	.77	.26	.812
7. Welcher Vorgang ist in der Abbildung (Abbildung zeigt Substratmolekül und Enzymmolekül mit allosterischem und aktivem Zentrum) dargestellt? [allosterische Hemmung]	0.50	-0.06	.51	.51	.800
8. Wenn ein Enzym „denaturiert“ wird, dann wird dieses Enzym ... [in seiner räumlichen Struktur verändert]	0.50	-0.02	.50	.38	.807
10. Nachdem ein Enzym ein Substrat zu einem Produkt umgesetzt und sich das Produkt vom Enzym gelöst hat, steht das Enzym meist ... [unmittelbar für weitere Reaktionen zur Verfügung]	0.50	-0.29	.57	.55	.798
11. Kompetitive Hemmstoffe binden an das ... [aktive Zentrum]	0.44	-1.09	.74	.24	.813
12. Der Begriff Wirkungsspezifität drückt aus, dass jedes Enzym in der Regel nur ... [eine bestimmte Veränderung des Substrates bewirken kann]	0.41	1.36	.22	.24	.812
14. Ohne Enzyme kann ein Mensch nicht überleben, weil ohne Enzyme zahlreiche chemische Reaktionen im Körper viel zu ... [langsam ablaufen würden]	0.50	-0.28	.57	.30	.810
15. Enzymatische Reaktionen lassen sich durch eine Erhöhung der Temperatur beschleunigen, weil bei höherer Temperatur ... [Enzym und Substrat sich schneller bewegen und deshalb häufiger aufeinandertreffen]	0.50	0.17	.46	.20	.815
16. Ein allosterischer Aktivator steigert die Enzymaktivität, indem er ... [die räumliche Struktur eines Enzyms verändert]	0.50	0.25	.44	.38	.806
17. Ein kompetitiver Hemmstoff hemmt die Enzymaktivität umso stärker, je ähnlicher dieser dem ... [Substrat ist]	0.50	-0.23	.56	.31	.810
18. Der hemmende Einfluss eines kompetitiven Hemmstoffes lässt sich verringern durch eine Erhöhung der ... [Substratkonzentration]	0.47	-0.73	.67	.34	.808
19. An welchen Vorgängen sind Enzyme beteiligt? [Abbau von Molekülen; Aufbau von Molekülen]	0.48	0.59	.36	.28	.811
20. Am aktiven Zentrum kann ... [das Substrat binden; ein kompetitiver Hemmstoff binden; die Umsetzung von Substrat zu Produkt stattfinden]	0.50	0.23	.44	.58	.797
21. Die maximal mögliche Anzahl an Produktmolekülen, die bei einer enzymatischen Reaktion entstehen können, lässt sich steigern durch eine Erhöhung der ... [Substratkonzentration]	0.28	-3.01	.92	.16	.814
22. Bei welchen Typen von Enzymhemmungen verringert eine Erhöhung der Substratkonzentration die Stärke der Hemmung? [kompetitive Hemmung durch einen Hemmstoff]	0.44	1.07	.26	.42	.805
23. Die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym und Substrat aufeinandertreffen, kann gesteigert werden durch eine Erhöhung der ... [Substratkonzentration; Enzymkonzentration; Temperatur]	0.50	0.03	.49	.33	.809
24. Typischerweise gilt für Enzyme, dass diese ... [jeweils nur ein bestimmtes Substrat umsetzen; jeweils nur bei einer bestimmten Reaktion wirken]	0.50	0.18	.45	.29	.811
25. Im menschlichen Organismus sind Enzyme verantwortlich für ... [die Spaltung größerer Moleküle zu kleineren Molekülen; die Beschleunigung von Stoffwechselreaktionen]	0.47	0.74	.33	.47	.802
26. Welche Bindungen sind entscheidend für die Ausbildung der Primärstruktur eines Enzyms? [Amidbindungen bzw. Peptidbindungen]	0.37	1.82	.16	.36	.808

Neben Cronbachs Alpha zeigt Tabelle 8 auch die *Itemschwierigkeit*. Die Itemschwierigkeit wird von 0 bis 1 angegeben und repräsentiert den Anteil an Lernenden, die das jeweilige Item korrekt gelöst haben. Eine Itemschwierigkeit von 0.80 bedeutet beispielsweise, dass 80 % der Lernenden das Item korrekt beantwortet haben. Items mit einer Schwierigkeit von 0.50 sind besonders geeignet, zwischen Proband*innen mit großem und mit geringem Vorwissen zu differenzieren (vgl. Moosbrugger & Kelava 2012). Items mit Schwierigkeiten unter < 0.20 und über > 0.80 sind dagegen wenig informativ, da sie nur bedingt Personenunterschiede sichtbar machen (vgl. Döring & Bort 2016).

Für den gesamten Test zeigt sich eine geeignete Schwierigkeitsstreuung: Sowohl im Durchschnitt als auch im Median konnten die Lernenden ca. 50 % der Items korrekt beantworten, die Standardabweichung (SD) beträgt ca. 20 % (siehe Tabelle 9).

Tabelle 9. Ergebnisse des Vorwissenstests (N= 504)

Ergebnis	Mittelwert	SD	IQR	Min.	25 %	Median	75 %	Max.	Schiefe	Kurtosis
In Punkten [max. 24]	12.5	4.8	7	1	9	12	16	24		
In Prozent [max. 100 %]	52.2	20.2	29.2	4.2	37.5	50	66.7	100	0.27	-0.7

Die Verteilung der Gesamtpunktzahl ist symmetrisch (siehe Schiefe in Tabelle 9 und Histogramm in Abbildung 52). Es zeigt sich lediglich eine im Vergleich zur Normalverteilung abgeflachte Verteilung (siehe Kurtosis in Tabelle 9). Durchschnittlich wurden 56 % der Single-Choice-Items korrekt beantwortet und 43 % der True-/False-Items⁹⁶. Vor dem Hintergrund der hohen Reliabilität, der in den meisten Fällen akzeptablen bis guten Trennschärfe sowie der symmetrischen Leistungsverteilung lässt sich annehmen, dass der Vorwissenstest geeignet ist, das enzymatische Vorwissen der Lernenden in diesem spezifischen Kontext differenziert zu erfassen. Eine vertiefende Analyse des Vorwissenstests in Hinblick auf latente Faktoren erfolgt im Rahmen der Beantwortung von Forschungsfrage 4 (siehe Abschnitt 7.3.1).

⁹⁶ Mittels t-Test für gepaarte Stichproben konnte gezeigt werden, dass alle acht True-/False-Items in Hinblick auf die Itemschwierigkeit anspruchsvoller sind als die ersten 18 Items im Single-Choice-Format ($t = 17.213$, $df = 503$, $p < .001$).

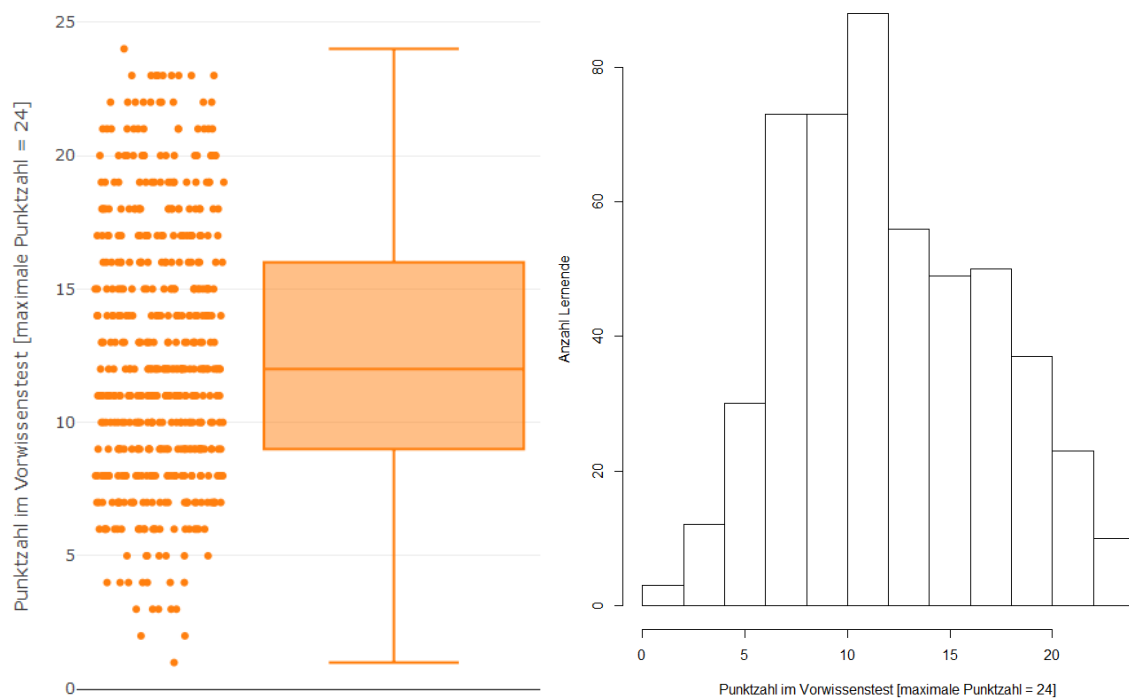


Abbildung 52. Boxplot und Histogramm der Verteilung der Gesamtpunktzahl der einzelnen Lernenden im Vorwissenstest (eigene Darstellung)

6.3.1.2 Überprüfung der Randomisierung

Um zu überprüfen, ob die Randomisierung gelungen ist, werden die Lernenden der einzelnen Gruppen in Hinblick auf ihr Vorwissen miteinander verglichen. Vor dem Hintergrund der Ausführungen in Abschnitt 4.4.2.2 kann angenommen werden, dass das Vorwissen eine wesentliche Ausgangsvoraussetzung für das Diagrammverstehen darstellt und sich in erheblichem Maße auf die Leistung beim Erklären des Graphenverläufe auswirkt. Die Randomisierung kann als erfolgreich betrachtet werden, wenn in Hinblick auf das Vorwissen kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen Lernenden der miteinander zu vergleichenden Gruppen (siehe Forschungsfragen 3a und 3b) besteht.

Zunächst werden die zur Beantwortung von Forschungsfrage 3a relevanten Gruppen, die Interventionsgruppe I-S-EI-Erk und die Kontrollgruppe K-Erk, miteinander verglichen. Die Lernenden der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk ($M = 15.07$, $SD = 4.66$) haben zwar deskriptiv (siehe Tabelle 10) mehr Punkte im Vorwissenstest erreicht als die Lernenden der Kontrollgruppe K-Erk ($M = 13.68$, $SD = 5.01$), der Unterschied zwischen den beiden Gruppen ist allerdings statistisch nicht signifikant ($t(73.74) = 1.27$, $p = .207$, $d = 0.29$, $r = .15$). Zudem deutet auch die geringe Effektstärke darauf hin, dass der Unterschied nicht von praktischer Relevanz ist (vgl. Cohen 1988). In Hinblick auf die Beantwortung von Forschungsfrage 3a war die Randomisierung daher erfolgreich.

Tabelle 10. Im Vorwissenstest erreichte Punktzahl, geordnet nach Vergleichen zur Beantwortung der Forschungsfragen 3a und 3b

Gruppe	Mittelwert	SD	IQR	Min.	25 %	Median	75 %	Max.	n
Vergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 3a									
I-S-EI-Erk	15.07	4.66	8.00	7	11	14	19.00	23	41
K-Erk	13.68	5.01	8.00	5	10	13	18.00	23	37
Vergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 3b									
I-KA-S-EI-Erk	13.27	4.82	8.00	3	9	13	17.00	23	161
K-Erk-Be-nErk	12.11	4.52	6.00	2	9	12	15.00	24	187
K-Be-Erk	10.08	4.60	5.75	1	7	9	12.75	21	78

Hinsichtlich der Gruppenvergleiche zu Forschungsfrage 3b zeigen sich mittels Varianzanalyse dagegen statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen ($F(2, 423) = 12.47, p < .001$). Post-hoc-Analysen mittels Bonferroni-Korrektur zeigen, dass die Unterschiede fast vollständig auf eine geringe Leistung von Lernenden der Kontrollgruppe K-Be-Erk ($M = 10.08, SD = 4.59$) zurückzuführen sind. Die Lernenden in dieser Gruppe erreichen hochsignifikant ($t(142) = 3.29, p = .004, d = 0.56, r = .27$) weniger Punkte im Vorwissenstest als Lernende der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk ($M = 12.11, SD = 4.52$) und höchstsignifikant ($t(159) = 4.96, p < .001, d = 0.79, r = .37$) weniger Punkte als Lernende der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk ($M = 13.27, SD = 4.82$). Von diesen beiden statistisch signifikanten Unterschieden ist allerdings nur der Unterschied zwischen den Gruppen I-KA-S-EI-Erk und K-Be-Erk ein Unterschied von mittlerer Effektstärke, die Effektstärke für den Unterschied zwischen den Kontrollgruppen K-Be-Erk und K-Erk-Be-nErk ist gering (vgl. Cohen 1988).⁹⁷

⁹⁷ Es sei darauf hingewiesen, dass die statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen K-Be-Erk und I-KA-S-EI-Erk sowie K-Be-Erk und K-Erk-Be-nErk darauf zurückzuführen sein könnten, dass in jeder Untersuchung bzw. in jeder Schulklasse maximal zwei Gruppen miteinander verglichen wurden. Leistungsunterschiede zwischen Schulklassen können somit dazu beigetragen haben, dass Lernende der Kontrollgruppe K-Be-Erk über ein statistisch signifikant geringeres Vorwissen verfügten als Lernende der Gruppen I-KA-S-EI-Erk und K-Erk-Be-nErk. Entsprechend wäre es möglich, dass zwar die Randomisierung innerhalb einer Klasse gelungen ist, aber trotzdem eine untersuchungsdesignbedingte Verzerrung in Hinblick auf das Vorwissen der Kontrollgruppe K-Be-Erk vorliegt.

Wesentlich ist vor allem, dass sich zwischen den beiden Vergleichsgruppen der Hauptuntersuchung I-KA-S-EI-Erk und K-Erk-Be-nErk (siehe Abschnitt 6.2.2) keine statistisch signifikanten Unterschiede ($t(159) = 2.35, p = .060, d = 0.26, r = .13$) zeigen. Zudem weist auch die niedrige Effektstärke darauf hin, dass der geringe Unterschied zwischen diesen beiden Gruppen praktisch nicht relevant ist (vgl. Cohen 1988). Die Randomisierung, zur Beantwortung von Forschungsfrage 3b, wird daher als eingeschränkt erfolgreich betrachtet. Die Interpretation von Ergebnissen zum Lern- bzw. Analyseerfolg von Lernenden der Kontrollgruppe K-Be-Erk sollten vor dem Hintergrund des möglicherweise niedrigeren Vorwissens dieser Lernenden erfolgen. Lernende der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk und der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk können dagegen – was zur Beantwortung von Forschungsfrage 3b maßgeblich relevant ist – ohne derartige Einschränkungen miteinander verglichen werden.

6.3.2. Ergebnisse der Gruppenvergleiche

6.3.2.1 Umfang der Erklärung

Die Beschreibungen des Diagramms und die Erklärungen der Graphenverläufe, welche die Lernenden im Rahmen der jeweiligen Aufgaben angefertigt haben, wurden vollständig digitalisiert. Die durchschnittliche Anzahl Wörter, die Lernende in diesen Gruppen für ihre Erklärungen (kurz: Lernerantworten) verwendet haben, beträgt zwischen 84 und 142 Wörtern (siehe Tabelle 11). Eine halbe Seite dieser Dissertation hat ungefähr eine Textlänge von 125 Wörtern.

Die Lernerantworten in den Interventionsgruppen waren jeweils länger als in den Kontrollgruppen. Besonders kurz waren die Lernerantworten in der Kontrollgruppe K-Be-Erk. Hier wurden mit durchschnittlich 84 Wörtern nur knapp zweidrittel so viele Wörter verschriftlicht wie in den anderen vier Gruppen.

Der Vergleich der Gruppen zur Beantwortung von Forschungsfrage 3a mittels t-Test zeigt, dass die Lernenden in der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk ($M = 142, SD = 56$) durchschnittlich mehr Wörter für das Erklären der Graphenabschnitte verwendet haben als die Lernenden in der Kontrollgruppe K-Erk ($M = 128, SD = 55$). Der Unterschied zwischen den beiden Gruppen ist allerdings statistisch nicht signifikant, der Effekt ist klein ($t(75.54) = 1.09, p = .278, d = 0.25, r = .12$).

Tabelle 11. Anzahl der bei der Erklärung des Diagramms verschriftlichten Wörter, geordnet nach Vergleichen zur Beantwortung der Forschungsfragen 3a und 3b

Gruppe	Mittelwert	<i>SD</i>	<i>IQR</i>	Minimalwert	25 %	Median	75 %	Maximalwert	<i>n</i>
Vergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 3a									
I-S-EI-Erk	142	56	69	30	107	138	176	291	41
K-Erk	128	55	69	14	91	126	160	261	37
Vergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 3b									
I-KA-S-EI-Erk	151	69	82	0	108	144	190	367	161
K-Erk-Be-nErk	123	62	79	0	84	123	163	365	187
K-Be-Erk	84	57	84	0	43	85	127	205	78

Anmerkung. Die Ergebnisse wurden aus inhaltlichen Gründen auf ganze Zahlen gerundet.

Die Durchführung einer Varianzanalyse, zur Beantwortung von Forschungsfrage 3b, deutet dagegen auf statistisch signifikante Unterschiede zwischen den drei Gruppen I-KA-S-EI-Erk, K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk hin ($F(2, 423) = 5.51, p < .01$). Post-hoc-Analysen mittels Bonferroni-Korrektur zeigen, dass alle Unterschiede zwischen den Gruppen drei Gruppen I-KA-S-EI-Erk ($M = 151, SD = 69$), K-Be-Erk ($M = 84, SD = 57$) und K-Erk-Be-nErk ($M = 123, SD = 62$) statistisch höchstsignifikant sind. Lernende der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk verschriftlichen in ihren Erklärungen im Durchschnitt höchstsignifikant mehr Wörter als Lernende der Kontrollgruppe K-Be-Erk ($t(181.20) = 7.85, p < .001, d = 1.08, r = .48$). Der Effekt ist groß (vgl. Cohen 1988).

Ebenso verschriftlichen Lernende der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk im Durchschnitt höchstsignifikant mehr Wörter als Lernende der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk ($t(325.22) = 3.84, p < .001, d = 0.41, r = .20$). Der Effekt ist allerdings klein (vgl. Cohen 1988).

Der Vergleich der beiden Kontrollgruppen K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk in Hinblick auf mögliche Positioneffekte des Diagrammbeschreibens zeigt zudem, dass Lernende der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk im Durchschnitt höchstsignifikant ($t(156.49) = 4.94, p < .001, d = 0.67, r = .32$) mehr Wörter als Lernende der Kontrollgruppe K-Be-Erk verschriftlichen. Es handelt sich um einen mittleren Effekt (vgl. Cohen 1988).

6.3.2.2 Vollständigkeit der Erklärung

Die Lernerantworten werden im Folgenden in Hinblick auf die von den Lernenden gegebenen kausalen Erklärungen miteinander verglichen. Die Anzahl der fachlich korrekt erklärten Aspekte wird dabei, in einer ersten Annäherung (siehe dazu Argumentation in Abschnitt 6.4), als Maß für das Diagrammverstehen der Lernenden betrachtet. Insgesamt konnten maximal acht Aspekte (Graphen- und Graphenabschnitte) des Diagramms erklärt werden (siehe Tabelle 6 auf Seite 193 in Abschnitt 6.2.5).

Die (deskriptive) Betrachtung der Mediane zeigt bereits, dass in den drei Kontrollgruppen 50 % der Lernenden nicht fähig waren, wenigstens einen Diagrammaspekt kausal zu erklären (siehe Tabelle 12). Vergleichbar geringe Leistungen wurden auch in anderen Untersuchungen beobachtet (vgl. Mautone & Mayer 2007; Tsuji 2011). Nur Lernenden der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk ist es gelungen, alle acht erklärungsrelevanten Aspekte zu identifizieren und sie in fachlich geeigneter Art und Weise kausal zu erklären. Die Streuungsmaße Standardabweichung (SD) und Interquartilsabstand (IQR) zeigen zudem, dass sich die Lernenden auch innerhalb der fünf Gruppen, insbesondere in den Interventionsgruppen, in Hinblick auf die Vollständigkeit ihrer Erklärungen zum Teil erheblich voneinander unterscheiden (siehe Tabelle 12).

Zunächst werden die zur Beantwortung von Forschungsfrage 3a relevanten Gruppen miteinander verglichen. In Hinblick auf die Vollständigkeit der Erklärungen zeigt sich, dass Lernende der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk ($Mdn = 3$, $M = 2.59$, $SD = 2.55$) im Median statistisch signifikant ($U = 942$, $p = .026$, $d = 0.43$, $r = .21$) mehr Aspekte des Diagramms kausal erklären als Lernende der Kontrollgruppe K-Erk ($Mdn = 0$, $M = 1.35$, $SD = 2.04$). Der Effekt ist allerdings eher klein (vgl. Cohen 1988).

Hinsichtlich der Gruppenvergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 3b zeigen sich zwischen den Gruppen I-KA-S-EI-Erk, K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk mittels Kruskal-Wallis-Test höchstsignifikante Unterschiede ($\chi^2(2) = 80.44$, $p < .001$). Post-hoc-Analysen mittels Dunn-Test unter Verwendung der konservativen Bonferroni-Korrektur offenbaren, dass Lernende der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk ($Mdn = 3$, $M = 3.12$, $SD = 2.32$) im Median statistisch höchstsignifikant ($z = 7.40$, $p < .001$, $d = 0.86$, $r = .40$) mehr Diagrammaspekte kausal erklären als Lernende in der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk ($Mdn = 0$, $M = 1.36$, $SD = 1.79$) und ebenso statistisch höchstsignifikant ($z = 7.70$, $p < .001$, $d = 1.15$, $r = .50$) mehr Diagrammaspekte als Lernende der Kontrollgruppe

K-Be-Erk ($Mdn = 0$, $M = 0.86$, $SD = 1.53$). In beiden Fällen handelt es sich um große, praktisch bedeutsame Unterschiede (vgl. Cohen 1988, Hattie 2009). Lernende der beiden Kontrollgruppen K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk ($z = 1.98$, $p = .144$, $d = 0.25$, $r = .12$) unterscheiden sich dagegen im Median nicht statistisch signifikant voneinander. Der Effekt ist zudem klein (vgl. Cohen 1988).

Tabelle 12. Vollständigkeit der Erklärung, geordnet nach Vergleichen zur Beantwortung der Forschungsfragen 3a und 3b

Gruppe	Mittelwert	SD	IQR	Minimalwert	25 %	Median	75 %	Maximalwert	n
Vergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 3a									
I-S-EI-Erk	2.59	2.55	5	0	0	3	5	7	41
K-Erk	1.35	2.04	2	0	0	0	2	7	37
Vergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 3b									
I-KA-S-EI-Erk	3.12	2.32	4	0	1	3	5	8	161
K-Erk-Be-nErk	1.36	1.79	3	0	0	0	3	7	187
K-Be-Erk	0.86	1.53	1	0	0	0	1	6	78

Es lässt sich zusammenfassen, dass in Übereinstimmung mit den Erwartungen an die instruktionalen Maßnahmen, die Lernenden beider Interventionsgruppen das Diagramm in Hinblick auf die zu erklärenden Diagrammaspekte statistisch signifikant umfassender bzw. vollständiger kausal erklären als die Lernenden aus den jeweils verglichenen Kontrollgruppen. Allerdings erweisen sich nur die Unterschiede zwischen der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk und ihren beiden Kontrollgruppen (siehe Forschungsfrage 3b) als praktisch bedeutsam (vgl. Hattie 2009).

6.3.2.3 Selbsteinschätzung der eigenen Leistung

Nachdem die Lernenden das Diagramm erklärt hatten, sollten sie angeben, wie erfolgreich sie ihre eigene Leistung beim Erklären einschätzen würden. Sie sollten dazu die Frage *Wie erfolgreich waren Sie Ihrer Meinung nach beim Erklären des Diagramms?* auf einer Skala von 1 (überhaupt nicht erfolgreich) bis 7 (sehr erfolgreich)⁹⁸ beantworten.

Tabelle 13. Selbsteinschätzung der Lernenden in Hinblick auf ihre Leistung beim Erklären des Diagramms, geordnet nach Vergleichen zur Beantwortung der Forschungsfragen 3a und 3b

Gruppe	Mittelwert	SD	IQR	Minimalwert	25 %	Median	75 %	Maximalwert	n
Vergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 3a									
I-S-EI-Erk	4.61	1.39	2	1	4	5	6	7	41
K-Erk	4.11	1.63	3	1	3	4	6	7	37
Vergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 3b									
I-KA-S-EI-Erk	4.41	1.52	2	1	4	5	6	7	161
K-Erk-BenErk	3.89	1.59	2	1	3	4	5	7	187
K-Be-Erk	3.91	1.54	2	1	3	4	5	7	78

Über alle Gruppen hinweg zeigte sich ein statistisch signifikant positiver Zusammenhang zwischen der Selbsteinschätzung und der Anzahl fachlich korrekt erklärter Graphenabschnitte ($r_s=.46$, $p < .001$). Je mehr Aspekte des Diagramms die Lernenden tatsächlich erklärt haben, desto besser schätzten sie ihre eigene Leistung ein und vice versa.

Der Vergleich zur Beantwortung von Forschungsfrage 3a zeigt, dass sich Lernende der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk ($M = 4.61$, $SD = 1.39$) und der Kontrollgruppe K-Erk ($M = 4.11$, $SD = 1.63$) hinsichtlich der Selbsteinschätzung ihrer eigenen Leistung beim Erklären im Durchschnitt nicht statistisch signifikant voneinander unterscheiden ($t(71.28) = 1.45$, $p = .150$, $d = 0.33$, $r = .16$). Der Effekt ist klein (vgl. Cohen 1988).

Der Gruppenvergleich zur Beantwortung von Forschungsfrage 3b mittels Kruskal-Wallis-Test deutet dagegen auf statistisch signifikante Unterschiede

⁹⁸ Das Item wurde zur Analyse umkodiert. Die angegebenen Werte wurden bereits umkodiert.

zwischen den drei Gruppen I-KA-S-EI-Erk, K-Be-Erk und K-Erk-Be-nErk hin ($\chi^2(2) = 11.17, p < .001$). Post-hoc-Analysen unter Verwendung der Bonferroni-Korrektur zeigen, dass Lernende der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk ($Mdn = 5, M = 4.41, SD = 1.52$) ihre Leistung im Median statistisch hochsignifikant positiver einschätzen ($z = 3.13, p = .005, d = 0.34, r = .17$) als Lernende der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk ($Mdn = 4, M = 3.89, SD = 1.59$). Zu Lernenden der Kontrollgruppe K-Be-Erk ($Mdn = 4, M = 3.91, SD = 1.54$) zeigt sich dagegen kein statistisch signifikanter Unterschied ($z = 2.38, p = .053, d = 0.31, r = .15$). Vor dem Hintergrund der unterschiedlich großen Gruppen sei an dieser Stelle explizit betont, dass beide Effekte klein und wenig bedeutsam sind (vgl. Cohen 1988, Hattie 2009).

Auch Lernende der Kontrollgruppen K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk unterscheiden sich hinsichtlich der Selbsteinschätzung ihrer Leistung nicht statistisch signifikant voneinander ($z = 0.07, p = 1.00, d = 0.001, r = .004$). Der Unterschied ist zudem sehr gering (vgl. Cohen 1988).

In Hinblick auf die Einschätzung der Lernenden ihrer eigenen Leistung beim Erklären des Diagramms lassen sich somit keine wesentlichen Unterschiede zwischen den jeweiligen Vergleichsgruppen feststellen.

6.3.2.4 Kognitive Belastung beim Erklären

Zur Beantwortung von Forschungsfrage 3 bzw. der jeweiligen Unterfragen 3a und 3b wird das Konstrukt Gesamt-Cognitive-Load (Gesamt-CL) nach Paas (1992) verwendet (siehe Abschnitt 6.2.5.1.2). Dazu haben die Lernenden die Frage *Wie viel geistige Denk-Anstrengung mussten Sie aufwenden, um das Diagramm zu erklären?* auf einer Skala von 1 (sehr wenig) bis 7 (sehr viel) beantwortet.

Es sei bereits darauf hingewiesen, dass das Konstrukt kognitive Belastung im Rahmen von Forschungsfrage 4 (siehe Kapitel 8) detaillierter analysiert wird. Die im Folgenden als Gesamt-Cognitive-Load (Gesamt-CL) erfasste kognitive Belastung der Lernenden wird dazu in Kapitel 8 in die drei Arten kognitiver Belastung, intrinsische, extrinsische und lernbezogene kognitive Belastung, differenziert und direkt auf das Diagrammverstehen bezogen.

In Hinblick auf den Gesamt-Cognitive-Load (Gesamt-CL) zeigt sich, dass sich die Lernenden aller fünf Gruppen nach vollständiger Bearbeitung der Selbstlernaufgaben sich im Durchschnitt ähnlich kognitiv belastet fühlten (siehe Tabelle

14). Lediglich bei Lernenden der beiden Interventionsgruppen scheint die kognitive Belastung im Durchschnitt etwas geringer zu sein als in den jeweiligen Kontrollgruppen.

Analog zu den vorausgegangenen Abschnitten erfolgt auch hier zunächst der Gruppenvergleich zur Beantwortung der Forschungsfrage 3a: In der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk ist die durchschnittliche Belastung der Lernenden, die sie beim Erklären empfunden haben, zwar niedriger ($M = 3.41$, $SD = 1.34$) als in der Kontrollgruppe K-Erk ($M = 3.73$, $SD = 1.47$), mittels t-Test lässt sich aber kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den beiden Gruppen feststellen ($t(73.3) = 0.99$, $p = .327$, $d = 0.22$, $r = .11$). Zudem ist auch die Effektstärke sehr klein (vgl. Cohen 1988).

Table 14. Kognitive Belastung der Lernenden beim Erklären des Diagramms, geordnet nach Vergleichen zur Beantwortung der Forschungsfragen 3a und 3b

Gruppe	Mittelwert	SD	IQR	Minimalwert	25 %	Median	75 %	Maximalwert	n
Vergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 3a									
I-S-EI-Erk	3.41	1.34	3	1	2	3	5	6	41
K-Erk	3.73	1.47	2	1	3	4	5	6	37
Vergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 3b									
I-KA-S-EI-Erk	3.48	1.47	3	1	2	3	5	7	161
K-Erk-Be- nErk	3.87	1.51	2	1	3	4	5	7	187
K-Be-Erk	3.99	1.69	2	1	3	4	5	7	78

Dagegen deutet die Varianzanalyse beim Vergleich der Gruppen zur Beantwortung von Forschungsfrage 3b auf statistisch signifikante Unterschiede ($F(2, 423) = 4.07$, $p = .018$) zwischen den drei Gruppen hin. Post-Hoc-Analysen mittels Bonferroni-Korrektur zeigen jedoch, dass lediglich der Unterschied zwischen der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk ($M = 3.48$, $SD = 1.47$) und der Kontrollgruppe K-Be-Erk ($M = 3.88$, $SD = 1.69$) statistisch signifikant ist ($t(134.86) = 2.27$, $p = .049$, $d = 0.31$, $r = .15$). Die Effektstärke ist jedoch klein (vgl. Cohen 1988).

Die durchschnittliche kognitive Belastung der Lernenden in der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk ($M = 3.48$, $SD = 1.47$) und in der Kontrollgruppe

K-Erk-Be-nErk ($M = 3.87$, $SD = 1.51$) unterscheidet sich dagegen nicht statistisch signifikant ($t(340.64) = 2.46$, $p = .052$, $d = 0.26$, $r = .13$). Der Effekt ist ebenfalls klein (vgl. Cohen 1988).

Auch der Unterschied zwischen den beiden Kontrollgruppen K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk ist weder statistisch signifikant ($t(134.40) = 0.52$, $p = .861$, $d = 0.07$, $r = .04$) noch praktisch bedeutsam (vgl. Cohen 1988; Hattie 2009).

Es lässt sich somit zusammenfassen, dass zwar tendenziell eine Reduktion der kognitiven Belastung in den Interventionsgruppen gegenüber den jeweiligen Kontrollgruppen zu erkennen ist, allerdings sind die jeweiligen Unterschiede in den meisten Fällen statistisch nicht signifikant und auch praktisch nur wenig bedeutsam (vgl. Hattie 2009).

6.4. Beantwortung von Forschungsfrage 3

Zur Beantwortung von Forschungsfrage 3 *Inwiefern sind die in dieser Arbeit entwickelten instruktionalen Maßnahmen geeignet, um Lernende beim kausalen Erklären von Graphenverläufen zu unterstützen?* wurden zwei Unterfragen gebildet: *Inwieweit erweist sich die Kombination strukturierender (S) und elaborierend-interrogativer Maßnahmen (EI) als förderlich, Lernende beim kausalen Erklären von Graphenverläufen zu unterstützen?* (Forschungsfrage 3a) und *Inwieweit erweist sich die Kombination strukturierender (S) und elaborierend-interrogativer Maßnahmen (EI) in dieser Hinsicht als förderlich, wenn die Lernenden zuvor kognitiv aktiviert (KA) werden?* (Forschungsfrage 3b).

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden Lernende der Interventions- (I) und Kontrollgruppen (K) insbesondere in Hinblick auf ihre Leistung beim kausalen Erklären (Erk) der in dem Untersuchungsdiagramm dargestellten Graphenverläufe verglichen (Variable *Vollständigkeit der Erklärung*). Betrachtet wurde zudem die Anzahl der von den Lernenden für ihre Erklärung verwendeten Wörter, die Selbsteinschätzung ihrer eigenen Leistung beim Erklären und die kognitive Belastung, welche die Lernenden beim Erklären verspürt haben.

Im Fokus der Beantwortung von Forschungsfrage 3a steht der Vergleich von Lernenden der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk mit Lernenden der Kontrollgruppe K-Erk. Lernende der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk wurden mithilfe von strukturierenden (S) und elaborierend-interrogativen (EI) Selbstlernaufgaben beim Diagrammverstehen bzw. beim Erklären des Diagramms gefördert. Lernende der Kontrollgruppe K-Erk erhielten dagegen keinerlei Förderung.

Die Lernenden der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk und die der Kontrollgruppe K-Erk unterscheiden sich statistisch nicht signifikant in Hinblick auf die Anzahl der von ihnen für ihre Erklärung verwendeten Wörter, der Selbsteinschätzung ihrer eigenen Leistung beim Erklären und ihrer kognitiven Belastung, die sie beim Erklären verspürt haben. Dagegen unterscheiden sich die Lernenden beider Gruppen statistisch signifikant in Hinblick auf die Anzahl der von ihnen kausal und fachlich korrekt erklärten Graphenverläufe und -abschnitte. Lernende der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk liefern im Median statistisch signifikant vollständigere Erklärungen als Lernende der Kontrollgruppe K-Erk. Der Effekt ist allerdings eher klein und praktisch wenig bedeutsam (vgl. Hattie 2009).

Um Forschungsfrage 3b zu beantworten, werden Lernende der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk mit Lernenden der beiden Kontrollgruppen K-Be-Erk und K-Erk-Be-nErk verglichen. Lernende der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk wurden genau wie Lernende der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk mittels strukturierender (S) und elaborierend-interrogativer (EI) Selbstlernaufgaben gefördert. Bevor sie allerdings die entsprechenden Aufgaben bearbeitet haben, wurden sie zudem – anders als Lernende der Instruktionsgruppe I-S-EI-Erk – gezielt kognitiv aktiviert (KA). Lernende der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk erhielten dagegen keine der aus den Förderkonzepten abgeleiteten Maßnahmen. Analog zur Kontrollgruppe K-Erk starteten auch sie direkt mit der Erklärung des Untersuchungsdiagrammes. Anders als Lernende der Kontrollgruppe K-Erk beschrieben (Be) sie jedoch nach ihrer Erklärung das Diagramm und ergänzten darauf aufbauend ihre Erklärung nachträglich (nErk) um Aspekte, die ihnen beim Beschreiben gewusst geworden waren. Lernende der Kontrollgruppe K-Be-Erk beschrieben – analog zur Unterrichtspraxis – zunächst das Diagramm und erklärten erst danach die Verläufe der Graphen.

Lernende der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk unterscheiden sich statistisch signifikant in Hinblick auf den Umfang und die Vollständigkeit ihrer Erklärungen von Lernenden der beiden Kontrollgruppen K-Be-Erk und K-Erk-Be-nErk. Die Lernenden der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk verschriftlichen statistisch signifikant längere Erklärungen und erklären statistisch signifikant mehr Graphenverläufe und -abschnitte kausal und fachlich korrekt als Lernende beider Kontrollgruppen. Allerdings lässt sich nur in Hinblick auf die Anzahl der fachlich korrekt erklärten Zusammenhänge (Vollständigkeit der Erklärungen) ein großer, praktisch bedeutsamer Unterschied (vgl. Hattie 2009) zu beiden Kontrollgruppen feststellen.

In Hinblick auf die Einschätzung der eigenen Leistung und der kognitiven Belastung beim Erklären zeigen die Lernenden der Instruktionsgruppe I-KA-S-EI-Erk nur unwesentliche Unterschiede zu Lernenden der beiden Kontrollgruppen. Lernende der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk zeigen zwar eine statistisch signifikant positivere Selbsteinschätzung als Lernende der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk und eine statistisch signifikant geringere kognitive Belastung als Lernende der Kontrollgruppe K-Be-Erk, allerdings sind beide Effekte von geringer Effektstärke.

Im Rahmen von Forschungsfrage 3b wurde zudem überprüft, ob hinsichtlich des Beschreibens (Be) des Diagramms ein möglicher Positionseffekt besteht. Dazu wurden die beiden Kontrollgruppen K-Be-Erk und K-Erk-Be-nErk miteinander verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass die Lernenden der beiden Kontrollgruppen K-Be-Erk und K-Erk-Be-nErk sich in Hinblick auf die Selbsteinschätzung ihrer eigenen Leistung sowie die beim Erklären empfundene kognitive Belastung nicht statistisch signifikant voneinander unterscheiden. Allerdings zeigte sich, dass Lernende der Kontrollgruppe K-Be-Erk statistisch signifikant kürzere Erklärungen formulieren als Lernende der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk. Dabei sollte allerdings beachtet werden, dass Erklärungen von Lernenden der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk zum Teil einleitende, beschreibende Sätze beinhalten, die von Lernenden der Kontrollgruppe K-Be-Erk, da sie das Diagramm zuvor bereits beschrieben hatten, seltener formuliert wurden. Die Erklärungen von Lernenden der Kontrollgruppe K-Be-Erk sind daher auch nicht ohne Weiteres als inhaltlich unvollständiger zu bezeichnen als die Erklärungen von Lernenden der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk. Lernende der Kontrollgruppe K-Be-Erk erklärten im Durchschnitt zwar einen halben Aspekt des Diagramms weniger als Lernende der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, statistisch ist der Unterschied zwischen den beiden Gruppen aber nicht signifikant. Es sei zudem darauf hingewiesen, dass während der Untersuchung beobachtet werden konnte, dass die Lernenden der Kontrollgruppe K-Be-Erk nach einer häufig ausführlichen Beschreibung des Diagramms vereinzelt müde und unmotiviert waren, das Diagramm bzw. den Verlauf der Graphen in der nachfolgenden Testaufgabe zu erklären. Insbesondere Letzteres erwies sich im Verlauf der Untersuchung als wesentliches Entscheidungskriterium dafür, die Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk als Hauptvergleichsgruppe zur Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk zu betrachten, um die Lernwirksamkeit der instruktionalen Maßnahmen zu beurteilen.

In Hinblick auf die Beantwortung von Forschungsfrage 3 lässt sich zusammenfassen, dass Lernende, welche mit den instruktionalen Maßnahmen lernen (Interventionsgruppen I-S-EI-Erk und I-KA-S-EI-Erk), mehr Aspekte des Untersuchungsdiagramms kausal erklären als Lernende der jeweiligen Vergleichsgruppen, die nicht durch instruktionale Maßnahmen unterstützt werden. Insbesondere Lernende der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk, die zusätzlich zum Strukturieren (S) und elaborativen Interrogieren (EI) auch kognitiv aktiviert (KA) werden, zeigen gegenüber beiden Kontrollgruppen, den Gruppen K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk, eine deutlich höhere Leistung beim Erklären der in dem Untersuchungsdiagramm dargestellten Graphenverläufe.

Ogleich anhand der empirischen Befunden ein erster positiver Hinweis auf die Wirksamkeit der Förderkonzepte Kognitive Aktivierung (KA), Unterstützung bei der Strukturierung des Diagramms in Zeichen (S) und elaborative Interrogation (EI) geliefert werden kann, zeigt sich zugleich, dass es nur bedingt möglich ist, von der Anzahl der kausal erklärten Diagrammaspekte auf die Lern- und Verstehensprozesse der Lernenden zurückzuschließen.

Die Anzahl der kausal erklärten Diagrammaspekte ist ein Indikator der sowohl in vergleichbaren Forschungsarbeiten (vgl. Brandstetter-Korinth 2017; Mautone & Mayer 2007, Tsuji 2011) als auch in der Unterrichtspraxis häufig verwendet wird, um die Leistung von Lernenden beim Diagramm- bzw. Abbildungsverstehen zu messen. Der Indikator ist gut geeignet, um zu differenzieren, inwieweit es Lernenden gelingt, erklärungsrelevante Aspekte in einem Diagramm zu identifizieren und ihr Vorwissen fachlich korrekt zur Erklärung der identifizierten Diagrammaspekte anzuwenden. Allerdings lässt sich durch einfaches (ungewichtetes) Auszählen der korrekt erklärten Diagrammaspekte beispielsweise nicht erfassen, dass sich einzelne Graphenverläufe und -abschnitte leichter, das heißt unter Verwendung eines wenig elaborierten Situationsraums, erklären lassen als andere Graphenverläufe und -abschnitte, deren Erklärung einen elaborierteren Situationsraum und die Vernetzung unterschiedlicher Erklärungsebenen innerhalb des Situationsraums erfordert. Differenzieren lässt sich zudem auch nicht ausreichend zwischen Lernenden, die eine sehr geringe Leistung beim Erklären gezeigt haben. Lernende, die keinen Zugang zu den in dem Diagramm referierten Inhalten finden und überhaupt keinen Situationsraum konstruieren können, erhalten in Hinblick auf die Anzahl korrekt erklärter Diagrammaspekte die gleiche Bewertung wie Lernende, die einen ungeeigneten Situationsraum

konstruieren und aus diesem Grund ausschließlich fachlich inkorrekte Erklärungen liefern. Die Verwendung des Indikators Vollständigkeit der Erklärung erscheint vor dem Hintergrund dieser Ausführung folglich nur bedingt geeignet, um anhand der von den Lernenden explizierten Erklärungen auf die Qualität ihrer eigentlichen (Diagramm-)Verstehensleistung zu schließen. Um die Lern- und Verstehensprozesse der Lernenden beim Erklären des Diagramms in geeigneter Art und Weise zu erfassen, erscheint es daher notwendig, das Konstrukt Diagrammverstehen umfassender zu operationalisieren und die Leistung der Lernenden beim Erklären vor diesem Hintergrund zu re-analysieren. Eine entsprechende Operationalisierung erfolgt im Rahmen der nachfolgenden Forschungsfrage 4. Darauf aufbauend erfolgt im Rahmen von Forschungsfrage 5 eine zweite quantitative Analyse zur Beurteilung der Wirksamkeit der instruktionalen Maßnahmen in Hinblick auf die Qualität der Verstehensleistung.

7. Operationalisierung Diagrammverstehen (F4)

7.1. Herleitung von Forschungsfrage 4

Die Analyse der Lernerantworten im Rahmen von Forschungsfrage 3 liefert Hinweise dafür, dass Lernende, die mit den instruktionalen Maßnahmen lernen, das Diagramm umfassender verstehen als Lernende, die ohne entsprechende Maßnahmen lernen. Die Anzahl der von den Lernenden erklärten Diagrammaspekte (Graphenverläufe und -abschnitte) wurde in diesem Zusammenhang – aufbauend auf vergleichbaren Untersuchungen (vgl. Brandstetter-Korinth 2017; Mautone & Mayer 2007, Tsuji 2011) – als Indikator für das Diagrammverstehen der Lernenden betrachtet. Obgleich die im Rahmen von Forschungsfrage 3 gewonnenen Erkenntnisse Hinweise auf die Wirksamkeit der deduzierten Förderkonzepte liefern, offenbarte die Analyse der Lernerantworten ebenso, dass anhand der Anzahl der erklärten Diagrammaspekte nur eingeschränkt auf die Lern- und Verstehensprozesse der Lernenden zurückgeschlossen werden kann (siehe Argumentation im vorausgegangenen Abschnitt).

Um die Lern- und Verstehensprozesse der Lernenden daher in geeigneterer Art und Weise zu erfassen, erschien es notwendig, das Konstrukt Diagrammverstehen zunächst umfassend(er) zu operationalisieren. Aus diesem Forschungsdesiderat erwuchs Forschungsfrage 4:

Wie lässt sich Diagrammverstehen operationalisieren, um Rückschlüsse auf die Lern- und Verstehensprozesse der Lernenden zu ziehen?

Die empirische Grundlage zur Beantwortung von Forschungsfrage 4 bildeten weiterhin die bereits zur Beantwortung von Forschungsfrage 3 verwendeten Daten (die verschriftlichten Erklärungen der Lernenden, kurz: Lernerantworten). Die (kontextspezifische) Operationalisierung des latenten Konstrukts Diagrammverstehen erfolgte in einem mehrschrittigen iterativen Prozess der deduktiv-induktiven Kategorienbildung (vgl. Reuber & Pfaffenbach 2005; Mayring 2000, 2003; Hammann & Jördens 2014; Rost 2004). Dabei zeigte sich jedoch, dass die im Rahmen der Beantwortung von Forschungsfrage 1 synthetisierten drei Forschungsperspektiven (siehe Abschnitt 4.5) nicht genügen, um die verschriftlichten Erklärungen der Lernenden umfassend zu analysieren. Als Herausforderung erwies sich insbesondere, dass komplexe, erklärungsrelevante Schlussfolgerungsprozesse in den zuvor beschriebenen diagrammspezifischen Forschungsarbeiten häufig nicht bzw. nicht intensiv genug analysiert wurden (zu

einer kritischen Diskussion dieser Problematik siehe Trafton & Tricket 2001; Trickett & Trafton 2006 sowie Abschnitt 4.2.2.1). Es erwies sich daher als notwendig, Forschungsfrage 4 zunächst vorzubereiten. Dazu wurden erneut – ähnlich wie im Fall von Forschungsfrage 2 – einzelne Unterfragen gebildet und diese der Reihe nach beantwortet (siehe Abbildung 53).

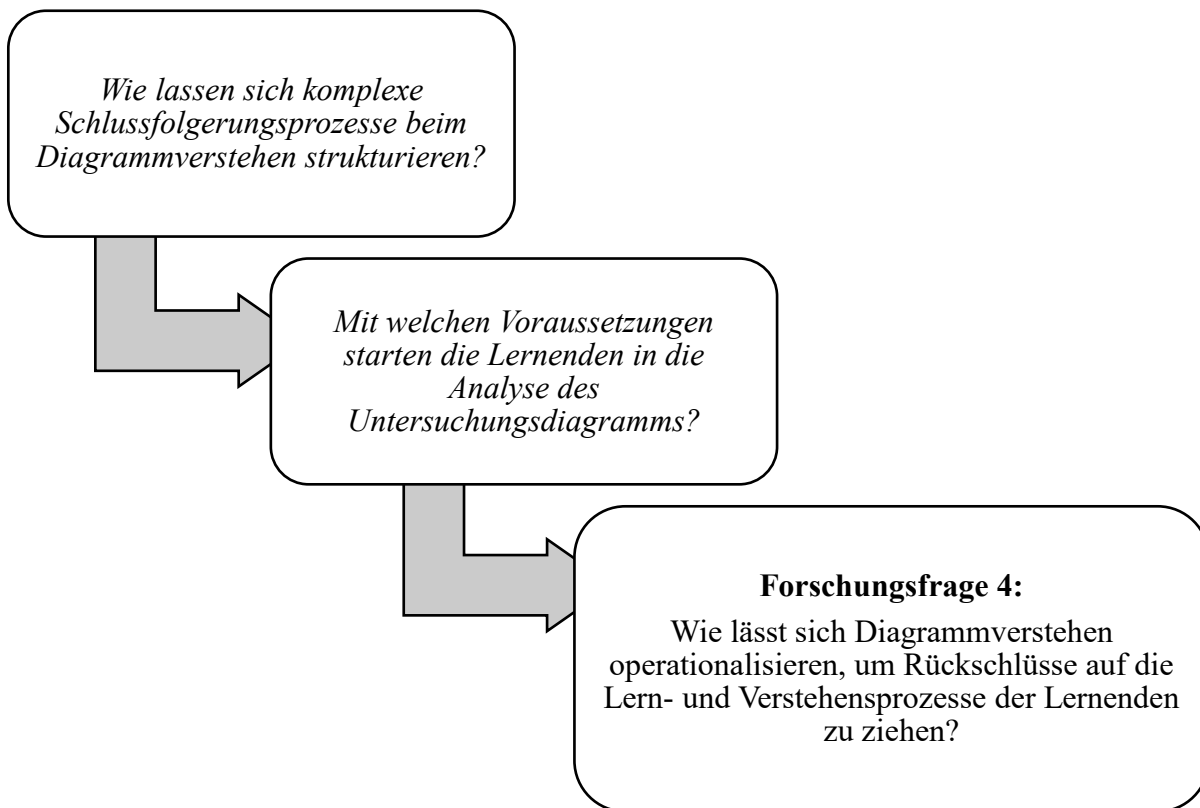


Abbildung 53. Forschungsfrage 4 und die Forschungsfrage vorbereitende Unterfragen (eigene Darstellung)

Im Rahmen der ersten Unterfrage (siehe Abbildung 53) *Wie lassen sich komplexe Schlussfolgerungsprozesse beim Diagrammverstehen strukturieren?* wurde zunächst die in Forschungsfrage 1 entwickelte theoretische Fundierung erweitert. Dazu wurden insbesondere Forschungsarbeiten in die Analyse einbezogen, die auf das logische Schlussfolgern fokussieren und Ansätze zur erkenntnistheoretischen Systematisierung von Schlussfolgerungsprozessen im Kontext der Datenanalyse liefern (siehe Abschnitt 7.2).

Um bei der Operationalisierung des Diagrammverstehens unter anderem den Einfluss möglicher themenspezifischer (Schüler-)Vorstellungen (vgl. Hammann & Asshoff 2014) berücksichtigen zu können, wurde in einer zweiten Unterfrage

ermittelt, mit welchen Voraussetzungen die Lernenden in die Analyse des Untersuchungsdiagramms starten. Zur Beantwortung dieser Unterfrage wurde zunächst explorativ der Vorwissenstest vertiefend re-analysiert (siehe Abschnitt 7.3.1) und theoretisch-explorativ eine Literaturstudie zu Schülervorstellungen im Bereich Enzymatik durchgeführt (siehe Abschnitt 7.3.2). Zudem wurde die von den Lernenden im Unterricht verwendete Schulbuchliteratur empirisch in Hinblick auf Darstellungsweisen (insbesondere Diagramme und Fließtexte) analysiert, die in das hier durchgeführte Forschungsvorhaben hineinwirken könnten (siehe Abschnitt 7.3.3).

Die Beantwortung der Unterfragen ermöglichte es, die Lernerantworten umfassend zu analysieren und zu kategorisieren (siehe Abschnitte 7.4 bis 7.6). Ergebnisse der Kategorienbildung sind ein ordinal geordnetes Kategoriensystem (siehe Beantwortung von Forschungsfrage 4 in Abschnitt 7.7), mit dessen Hilfe sich Diagrammverstehen operationalisieren lässt. Das Kategoriensystem wird nachfolgend verwendet (siehe Forschungsfrage 5 in Kapitel 8), um die Wirksamkeit der instruktionalen Maßnahmen spezifisch in Hinblick auf das Diagrammverstehen zu beurteilen.

7.2. Theoretische Erweiterung: epistemische Perspektive

Komplexe Schlussfolgerungsprozesse sind für das Diagrammverstehen von besonderer Relevanz (vgl. Shah et al. 2005; Wang et al. 2012). Entsprechende Schlussfolgerungsprozesse wurden im Kontext des Verstehens quantitativer Diagramme bisher allerdings nur selten empirisch untersucht (vgl. Trafton & Trickett 2001; Trickett & Trafton 2006). Zunächst wird daher auf Ansätze zum Schlussfolgern im Kontext qualitativer Diagramme Bezug genommen (Abschnitt 7.2.1). Nachfolgend werden im Rahmen einer erweiterten Literaturstudie Ansätze aus Forschungsarbeiten zum logischen Schlussfolgern auf das Diagrammverstehen übertragen. Dabei wird insbesondere auf das *abduktive Schlussfolgern* konzentriert (siehe Abschnitt 7.2.2 und Abschnitt 7.2.3). Abschließend werden in Abschnitt 7.2.4 die drei Schlussfolgerungsarten Abduktion, Deduktion und Induktion zu einem epistemologischen Prozess des datenbasierten Schlussfolgerns verbunden. Auf diese Weise wird eine konkrete Grundlage zur Kodierung der Lernerantworten und zur Operationalisierung des Diagrammverstehens geschaffen.

7.2.1. Komplexes Schlussfolgern im Kontext von Diagrammen

Narayanan und Hegarty (vgl. Narayanan & Hegarty 1998a; 1998b; 2002) untersuchten das Schlussfolgern im Kontext komplexer qualitativer Diagramme. Sie konnten zeigen, dass sich der Verstehensprozess⁹⁹ dabei in drei groben Schritten vollzieht: der *Konstruktion eines statischen mentalen Modells*, der *Identifikation kausaler Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge* und der *Transformation des statischen in ein dynamisches mentales Modell*. Ähnlich wie Carpenter und Shah (1998) (siehe Abschnitt 3.8.2.2) nehmen auch Narayanan und Hegarty (2002) hier einen iterativen Charakter für den Verstehensprozess an: „During comprehension a viewer may iterate through these processes multiple times to elaborate his or her mental model of the system” (ebd., S. 282).

Das Verstehen qualitativer Diagramme beginnt demnach damit, dass Leser*innen das Diagramm analysieren¹⁰⁰ und es in einzelne grafische Elemente zerlegen bzw. einzelne perzeptuelle Elemente gruppieren. Unter Einbindung des Vorwissens erzeugen sie dann aus den perzeptuellen Elementen vorwissensintegrierte Bedeutungselemente (vgl. Narayanan und Hegarty 1998a). Narayanan und Hegarty (1998a) vermuten hier –vergleichbar zu Ausführungen in Abschnitt 4.4 – eine Art semiotischer Interpretation und sprechen von „a process analogous to lexical access in language comprehension“ (ebd., S. 275). Nachfolgend übersetzen Leser*innen die räumlichen Relationen der grafischen Darstellung in mentale Sinnzusammenhänge. Das Produkt dieser Konstruktionsprozesse ist ein statisches mentales Modell.

Das statische Modell wird verwendet, um die zugrunde liegenden Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in einem Schlussfolgerungsprozess mental zu ergründen. Die Autor*innen sprechen diesbezüglich von „determining the causal chain of events“ (Narayanan & Hegarty 1998a, S. 276) oder „hypothesizing causality“ (Narayanan & Hegarty 1998b, S. 446). Sie gehen somit hier über semiotische

⁹⁹ Die Autor*innen beschreiben zwar eine Sequenz einzelner Verstehensprozesse, sie betonen jedoch, dass die Verstehensschritte keinesfalls immer in dieser Reihenfolge ablaufen müssen. Die Reihenfolge der einzelnen Schritte sei beispielsweise abhängig von individuellen Unterschieden in Hinblick auf Vorwissen und Analysezielen (vgl. Narayanan & Hegarty 2002).

¹⁰⁰ Narayanan und Hegarty (1998a) sprechen hier von „diagram parsing“ (ebd., S. 275) und betonen damit den eher perzeptuellen, scannenden Charakter dieses ersten Schrittes im Verstehensprozess.

Tätigkeiten hinaus, bei denen vornehmlich die Rekonstruktion der grafisch referierten Inhalte im Vordergrund steht (siehe Abschnitt 4.4). Aufbauend auf den geschlussfolgerten Kausalzusammenhängen konstruieren die Leser*innen dann ein *dynamisches mentales Modell*. Narayanan und Hegarty (1998a) bezeichnen dies als *mentale Animierung* des statischen Modells und betonen den inkrementellen und progressiven Verlauf einer solchen mentalen Animierung: „Beginning with information about the behavior of one component and inferring the behaviors of other components or sub-systems one by one in order of the chain of causality“ (ebd., S. 272).

Der soeben für qualitative Diagramme beschriebene kausale Schlussfolgerungsprozess ist allerdings prädiktiver Natur. Vorhersagen werden durch logisches Schlussfolgern (*rule-based*) oder mittels mentaler Visualisierung (*imagery-based*) ausgehend von bestehenden Erkenntnissen deduziert (vgl. Narayanan & Hegarty 1998a, 1998b). Sie werden dabei aber nicht empirisch überprüft oder auf Widersprüche zu den gegebenen Informationen getestet. Narayanan, Suwa und Motoda (1995) vertreten sogar, bezogen auf die von ihnen analysierten qualitativen Diagramme¹⁰¹, die Auffassung, dass die Hypothesenverifikation das interne Ziel des Diagrammlesens sei (vgl. ebd.).

Es sei darauf hingewiesen, dass Roth & Kollegen vergleichbare Annahmen auch für die Interpretation quantitativer Diagramme, insbesondere Liniendiagramme, treffen (vgl. Roth 2000, 2002, 2003; siehe dazu auch Roth & Bowen 2003). Die Hypothesenrevision beziehen auch sie nicht explizit¹⁰² in den Prozess mit ein. Allerdings sei ebenfalls betont, dass die Autoren in entsprechenden Ausführungen in erster Linie auf das semiotische Interpretieren von Diagrammen und weniger auf das Ermitteln von inhaltlichen Kausalzusammenhängen fokussieren. Roth (2002; 2003) vergleicht in entsprechenden Ausführungen das Schlussfolgern im Kontext des Diagrammverstehens mit den Tätigkeiten eines Detektivs. Ähnlich wie ein Detektiv konstruieren auch Diagrammleser*innen anhand der

¹⁰¹ Die Autor*innen haben beispielsweise das Verstehen der grafischen Beschreibung des Lenksystems eines Schiffsrades untersucht (vgl. Narayanan & Hegarty 1998a).

¹⁰² Es sei darauf hingewiesen, dass sich bei Roth, Bowen und Masciotra (2002, z. B. S. 338 f.) sowie bei Roth et al. (2005) durchaus Hinweise auf einen Prozess des Testens von Erklärungshypothesen und Revidierens von Hypothesen finden. Die Annahme eines offenen Hypothesenraumes ist daher keinesfalls als das Unvermögen der Autoren zu verstehen, die Hypothesenrevision als relevant für das Diagrammverstehen zu erkennen. Vielmehr sind falsifizierende Ansätze bzw. die Suche nach *disconfirming evidence* (vgl. z. B. Lord, Ross & Lepper 1979; Hammann 2006) kein expliziter Bestandteil der dargestellten semiotischen Forschungsperspektive (vgl. Roth et al. 2005).

zur Verfügung stehenden Zeichen ein Gerüst aus möglichen Hypothesen über den Referenten (vgl. Roth 2000, 2002, 2003; siehe dazu auch Roth & Bowen 2003). Ähnlich wie Narayanan und Hegarty (1998a, 1998b) sowie Narayanan, Suwa und Motoda (1995) nimmt auch Roth (2003) dabei einen sehr offenen Hypothesensuchraum an. Er betont beispielsweise, dass der von ihm beschriebene Detektiv nie erfahren wird, was ‚wirklich‘ passiert ist („there are no guarantees that it corresponds to what 'really' happened“ (Roth 2003, S. 70). Roth 2003 führt hier weiter aus:

„It is possible that the process and the results of another detective's work would be different, involving different scenarios and and culprits. That is, the situation is like an open text (work) read differently by different people. In contrast to the closed text (work), built on known codes and set cause and effect chains, open texts (or works) force readers to make their own interpretation and draw their own conclusions“ (ebd., S. 70).

Im naturwissenschaftlichen Unterricht sind für die Analyse quantitativer Diagramme derart offene, interpretative Schlussfolgerungsprozess bzw. ein derart offener Hypothesensuchraum – sofern dieser nachträglich nicht weiter eingegrenzt wird – allerdings nicht vorgesehen. Insbesondere im Biologieunterricht sind falsifizierende Teststrategien, die Suche nach Widersprüchen, die Hypothesenrevision und die darauf aufbauende Konstruktion neuer Hypothesen von besonderer Relevanz (vgl. Hammann et al. 2006; Ganser & Hammann 2009). Die Komplexität, die durch solche hypothesentestenden Tätigkeiten und insbesondere durch die Hypothesenrevision in das Verstehen quantitativer Diagramme eingebracht wird, wurde bereits von Hoffmann (1999) angesprochen. Er formuliert diesbezüglich:

„It is one thing to imagine possible representations or interpretations for a set of data, and it is another thing to confirm or refute hypothetically assumed representations and interpretations“ (ebd., S. 275).

Hoffmann und Roth (2005, 2007) bauen auf den Ansätzen von Hoffmann (1999) auf und ergänzen die oben am Beispiel des Detektivs beschriebenen konstruktivistischen Prozesse um epistemologische Ansätze – was für die nachfolgenden Ausführungen in dieser Arbeit entscheidend ist. Sie orientieren sich dabei unter anderem an dem „three step process of abduction, deduction, and induction“ (Hoffmann & Roth 2007, S. 120) nach Peirce (vgl. ebd.).

Die *Abduktion* wird dabei als eine Erweiterung der logischen Schlussfolgerungskonzepte Deduktion und Induktion betrachtet. Sie ist weniger streng und besitzt eine schöpferische, kreative Komponente mit kausaler Erklärungskraft (vgl. Hoffmann & Roth 2005, 2007). Die Abduktion wird daher als erster Schritt dazu betrachtet, das unbekannte Diagramm in einem Prozess des Selbsterklärens (vgl. Chi et al. 1994) zu verstehen. Hoffmann und Roth (2007) beschreiben dies als „[...] an unfamiliar sign challenges us to generate an explanatory hypothesis, that is to perform what Peirce has called an ‘abduction’“ (ebd., S. 116). Die abduzierten, vorläufigen Erklärungshypothesen können dann in einem iterativen Prozess, empirisch mithilfe des Diagramms bzw. der in dem Diagramm enthaltenen Evidenzen, getestet werden. Die Autoren fassen dies zusammen als: „Once we have a hypothesis, we can think about implications of this hypothesis, and finally test its implications empirically“ (Hoffmann & Roth 2007, S. 116).¹⁰³ Es sind insbesondere diese epistemischen Ansätze, die im Folgenden näher analysiert werden, um darauf aufbauend Strukturierungsansätze für die empirische Analyse der Lernerantworten zu entwickeln.

7.2.2. Einführung in das abduktive Schlussfolgern

7.2.2.1 Konzeptualisierung des abduktiven Schlussfolgerns

Das *abduktive Schlussfolgern*¹⁰⁴ gewann in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung. Es wurde insbesondere verwendet, um das Erklären von Experimenten,

¹⁰³ Die Überlegungen von Hoffmann und Roth (2007) besitzen Analogien zum SDDS-Modell von Klahr und Dunbar (1988). Das *SDDS-Modell* (*scientific discovery as dual search*) (vgl. Klahr 2000; zu einer übersichtlichen Zusammenfassung siehe Hammann 2007) gliedert sich in drei Komponenten: die *Suche nach Hypothesen*, das *Testen von Hypothesen* und das *Analysieren von Evidenzen*. Hypothesen werden dabei in einem sogenannten Hypothesensuchraum aufgestellt. Die Hypothesenbildung wird als eine Form des Problemlösens beschrieben, bei dem der Problemlöser meist nur über eingeschränktes domänenspezifisches Vorwissen über ein zu erklärendes Phänomen verfügt. Das Ziel der Hypothesenbildung ist die Entwicklung „eine[r] überprüfbare[n] Hypothese, mit der sich das zu erklärende Phänomen zumindest mit einer gewissen Plausibilität erklären lässt“ (Hammann 2007, S. 189). Die im Hypothesensuchraum aufgestellten Hypothesen werden dann im Experimentierraum, einem weiteren Problemraum, getestet. Mit den im Experimentierraum generierten Evidenzen lässt sich dann entscheiden, ob die konstruierten Hypothesen revidiert, weiter geprüft oder (vorläufig) akzeptiert werden (vgl. Hammann 2007).

¹⁰⁴ Formallogisch stellt die Abduktion eigentlich keinen Schluss dar, da hier nicht mehrere Aussagen verbunden werden, um daraus zu schließen (vgl. Meyer 2009). Dies soll in dieser Arbeit aber nicht weiter diskutiert werden. Zu einer vertiefenden Diskussion über die Definition abduktiven Schlussfolgerns sei auf Chiasson und Tristan (2012) verwiesen.

Beobachtungen oder Phänomenen zu strukturieren (vgl. Schulz, Wirtz & Starau-schek 2012; Roeger 2015; Strahl 2018). Eine einheitlich anerkannte Definition darüber, was unter abduktivem Schlussfolgern genau zu verstehen ist, existiert allerdings noch nicht (vgl. Chiasson & Tristan 2012).

Abduktives Schlussfolgern kann auf die Überlegungen von Peirce (1839 – 1914) im frühen 20. Jahrhundert zurückgeführt werden. Chiasson und Tristan (2012) fassen die theoretischen Ausführungen von Peirce, unter Betonung des erklären-den Charakters und des kreativ-konstruktiven Elements des abduktiven Schluss-folgerns, in Abgrenzung zum induktiven und deduktiven Schlussfolgern, wie folgt zusammen:

„Peirce defines abduction as ‚the process of forming an explanatory hypothesis,‘ and immediately clarifies this by saying: ‚It is the only logical operation which introduces any new idea; for induction does nothing but determine a value, and deduction merely evolves the necessary consequences of a pure hypothesis‘ (Peirce, 1935, Vol. 5, para. 171)“ (Chiasson & Tristan 2012, S. 201).

Tanggaard und Hjorth (2017), die versuchten, das Problemlösen von Lernenden im Unterricht zu fördern, indem sie das abduktive Schlussfolgern trainierten, de-finieren Abduktion als:

„all types of processes where people make a qualitative leap from the incomplete data available to them, and through an element of qualified guesswork express something they have not previously created.“ (ebd., S. 225)

In stärker wissenschaftsphilosophisch ausgerichteten Arbeiten wird Abduktion als ein Suchprozess verstanden, dessen Ergebnis die zum aktuellen Zeitpunkt beste, vorläufige Antwort auf ein Problem darstellt (vgl. Magnani 2009). Magnani 2009 betont, dass die Suche nach einer Antwort dabei eher einem ge-nerischen, kreativ-heuristischen Vorgehen entspricht als einem strengen, syllo-gistischen Prozess logischen Schlussfolgerns (vgl. ebd.)

Gemeinsam ist den meisten Ausführungen zur Abduktion die Ausrichtung auf das Erklären von Evidenzen aus Beobachtungen oder Experimenten mithilfe des eigenen Vorwissens – eine Fähigkeit, die insbesondere für das Verstehen quan-titativer Diagrammen essenziell zu sein scheint (siehe Kapitel 3). Magnani (2004) versteht unter *Erklären* in diesem Zusammenhang: „selecting and crea-ting a set of hypotheses that are able to dispense good (preferred) explanations of data“ (ebd., S. 224). Insgesamt schreibt auch Magnani (vgl. insbesondere Magnani 1992, 2004) – ähnlich wie auch Hoffmann und Roth (2005, 2007) – der

Abduktion die wichtigste Rolle für den Erkenntnisgewinn und das Erklären von Sachverhalten zu (vgl. ebd.).

Aufgrund ihrer besonderen Bedeutung für das Diagrammerklären – und damit auch für das Diagrammverstehen – wird das abduktive Schlussfolgern in den nachfolgenden Abschnitten intensiv analysiert.

7.2.2.2 Verschiedene Formen von Abduktion

Magnani (vgl. Magnani 2001; 2004; 2009) unterscheidet zwischen verschiedenen Formen von Abduktion (siehe Abbildung 54). Zunächst differenziert er zwischen manipulativer und theoretischer Abduktion.¹⁰⁵ Während bei der manipulativen Abduktion insbesondere die Strukturierung der Daten durch extratheoretische Handlungen im Vordergrund steht, beschäftigt sich die theoretische Abduktion mit internalisierten Schlussfolgerungsprozessen. Die theoretische Abduktion kann in die sententiale Abduktion und die modellbasierte Abduktion unterschieden werden. Die sententiale Abduktion lässt sich wiederum in die kreative Abduktion und die selektive Abduktion gliedern (vgl. Magnani 2001; 2004; 2009). Die verschiedenen Formen abduktiven Schlussfolgerns werden im Folgenden kurz beschrieben, um einen Einblick in die Vielfältigkeit abduktiver Prozesse zu geben.

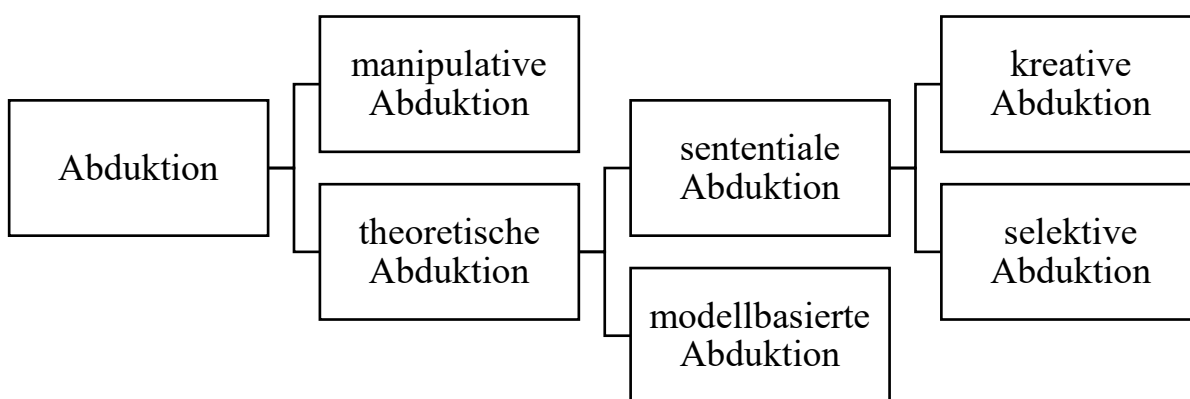


Abbildung 54. Übersicht über verschiedene Formen abduktiven Schlussfolgerns (eigene Darstellung nach Magnani 2001; 2004; 2009)

Die *manipulative Abduktion* (vgl. Magnani 2009; Magnani 2001) ähnelt den in Abschnitt 4.4.1.3 beschriebenen Strukturierungsprozessen, mit deren Hilfe ein

¹⁰⁵ Diese Dichotomisierung ist nicht trennscharf. Park (2017) geht hier beispielsweise davon aus, dass sich die jeweiligen Arten der Abduktion in einem dreidimensionalen Raum anordnen lassen, in dem theoretische und manipulative, sententiale und modellbasierte sowie die kreative und die selektive Abduktion drei unterschiedliche Achsen bilden (vgl. Park 2017).

Diagramm in bedeutungsvolle Zeichen eingeteilt wird. Ziel der manipulativen Abduktion ist die erleichterte Informationsentnahme der in einem Informationsmedium implizit enthaltenen, aber nicht explizit dargestellten Informationen (Magnani 2004). Ähnlich wie Roth und Hoffmann (2005, 2007) bzw. Roth und Kollegen (siehe Abschnitt 4.4.1.3) geht auch Magnani (z. B. Magnani 2004) davon aus, dass die Arbeit mit Zeichen bzw. die Konstruktion geeigneter Zeichen ein wesentlicher Schritt sei, um darauf aufbauend weitere Schlussfolgerungen anstellen zu können (vgl. ebd.). Das externalisierte, nach außen sichtbare, Ergebnis der Auseinandersetzung mit der Darstellung, zum Beispiel die Strukturierung des Diagramms in Informationsabschnitte, bezeichnet Magnani (2001, 2009) als *externale epistemische Mediatoren*. Die Mediatoren können als Grundlage zur Konstruktion neuer Informationen fungieren (Magnani 2001, 2004, 2009). Magnani (2009) betont allerdings, dass das zentrale Produkt der manipulativen Abduktion nicht die veränderte Darstellung selbst ist, sondern die mentale Repräsentation des Lesers, die durch die extratheoretischen Handlungen internal konstruiert wird (vgl. ebd.). Er spricht daher hier auch von „thinking through doing“ (Magnani 2009, S. 39). Magnani (vgl. Magnani 2001, 2004, 2009) liefert mit dem Konzept der manipulativen Abduktion einen geeigneten Ansatz, mit dem sich die semiotischen Ausführungen von Roth und Kollegen in Abschnitt 4.4 (vgl. z. B. Roth & McGinn 1997; Roth et al. 1999) und die kognitionswissenschaftlichen Arbeiten in Abschnitt 3.8 (siehe dort insbesondere Ausführungen zum interaktiven Diagrammverstehen nach Hegarty 2011) kombinieren lassen.

Unter *theoretischer Abduktion* versteht Magnani (2004) einen logischen Prozess komplexer, aufeinander aufbauender, größtenteils internalisierter Schlussfolgerungsaktivitäten, in denen einfache oder komplexe verbal/symbolische Erklärungshypothesen mental gebildet, evaluiert und bei Bedarf nach außen kommuniziert werden. Er fasst dies zusammen als:

„Theoretical abduction is the process of inferring certain facts and/or laws and hypotheses that render some sentences plausible, that *explain* or *discover* some (eventually new) phenomenon or observation; it is the process of reasoning in which explanatory hypotheses are formed and evaluated“ (ebd., S. 220).

In Hinblick auf die Konstruktion entsprechender Erklärungshypothesen differenziert Magnani (2004) die theoretische Abduktion weiter und unterscheidet zwischen *sententialer* und *modellbasierter* Abduktion. Die *sententiale Abduktion* ist

eine verbal/symbolisch formulierte Abduktion. Sie lässt sich in die kreative und die selektive Abduktion einteilen. Mittels *kreativer Abduktion* wird durch schlussfolgerndes Denken neues Wissen bzw. eine neue Erklärung konstruiert. Dagegen beschreibt die *selektive Abduktion* die Anwendung von Vorwissen in unveränderter Form. Aus bereits bestehenden Erklärungen wird eine geeignete Erklärung ausgewählt (selektiert), um damit einen Sachverhalt möglichst plausibel zu erklären (vgl. ebd.). Die ausgewählte Erklärung bzw. die neu konstruierte Erklärungshypothese kann anschließend in einen erkenntnistheoretischen Prozess eingebunden und dadurch in Hinblick auf ihre Erklärungskraft getestet werden (vgl. Magnani 2001).

In Abschnitt 7.2.4 wird das *Select-&-Test-Modell* (vgl. Ramoni et al. 1992; Magnani 1992) präsentiert, um die Einbindung kreativ und selektiv abduzierter Erklärungshypothesen in den Erkenntnisprozess des Diagrammverstehens zu beschreiben (zu einer ausführlichen Erläuterung siehe Abschnitt 7.2.4).

Neben der (verbalen/symbolischen) sententialen Abduktion, die häufig den strengen Regeln des syllogistischen Schlussfolgerns untergeordnet wird, rät Magnani (2004) dazu, das Abduzieren gleichzeitig auch in einem breiteren, konstruktivistischen Sinn zu betrachten. Dazu sei die Annahme einer sogenannten modellbasierten Abduktion notwendig (vgl. ebd.). Die *modellbasierte Abduktion* ermöglicht die (gedankliche) Konstruktion und Manipulation verschiedener Formen internaler Repräsentationen. Insbesondere im Zusammenhang mit dem Verstehen von Diagrammen und anderen visuellen Darstellungen spielt diese Form der Abduktion daher eine wichtige Rolle. Modellbasierte abduktive Prozesse finden beispielsweise unter Einbezug von mentalen Konstrukten, wie Vorstellungsbildern, statt (vgl. Magnani 2004).

Eine Kombination aus Ansätzen der sententialen und modellbasierten Abduktion scheint besonders geeignet, um das Vorgehen der Lernenden beim Entwickeln von Erklärungshypothesen im Kontext des Diagrammverstehens umfassend zu analysieren. So betont beispielsweise Magnani 2004:

„If we want to provide a suitable framework for analyzing the most interesting cases of conceptual changes in science we do not have to limit ourselves to the sentential view of theoretical abduction but we have to consider a broader inferential one which encompasses both sentential and what I call model-based sides of creative abduction“ (Magnani 2004, S. 225).

7.2.3. Abduktives und induktives Erklären

Im vorausgegangenen Abschnitt wurde beschrieben, dass sich Erklärungshypothesen durch Abduktionsprozesse bilden lassen. Erklärungshypothesen lassen sich allerdings nicht nur abduktiv, sondern auch induktiv bilden (vgl. Console & Saitta 2000). Die beiden Schlussfolgerungsarten, Abduktion und Induktion, bezeichnen Console und Saitta (2000) daher auch als „the basic means to generate explanations (hypotheses)“ (ebd., S. 140).

Abduktiv und induktiv und konstruierte Erklärungshypothesen unterscheiden sich allerdings erheblich voneinander (vgl. Console & Saitta 2000; vgl. Magnani 2001). Die jeweiligen Unterschiede lassen sich nach Console und Saitta (2000) darauf zurückführen, woher die jeweilige Erklärung kommt („*where the explanation comes from*“, ebd., S. 140).¹⁰⁶

Wie bereits im vorausgegangenen Abschnitt erläutert wurde, erklärt eine abduktiv gebildete Hypothese ein beobachtetes Phänomen in erster Linie mithilfe von Vorwissen, beispielsweise Wissen über eine domänenspezifische, kausale Theorie. Das Vorwissen ist daher hier von wesentlicher Bedeutung. Es wird zur Bildung einer oder mehrerer Erklärungshypothesen auf einen bereits zuvor beobachteten Sachverhalt angewandt und kann diesen dadurch erklärend elaborieren. Console und Saitta (2000) sprechen daher hier von einer Intension bzw. einer Erweiterung des spezifischen Informationsgehaltes (vgl. ebd.).

Nach Console und Saitta (2000) erklärt eine induktiv gebildete Hypothese ein Phänomen dagegen auf der Grundlage dessen, dass Ursache und Wirkung in dem jeweiligen Kontext bereits mehrfach in direkter Abfolge und unter identischen Bedingungen beobachtet wurden. Ein Sachverhalt wird daher im Rahmen einer induktiven Erklärung generalisiert. Dabei wird der zu erklärende Sachverhalt in eine bestimmte Kategorie oder ein Konzept aus zuvor beobachteten Sachverhalten eingeordnet, wodurch das entsprechende Konzept um einen neuen Sachverhalt erweitert wird. Console und Saitta (2000) sprechen daher hier auch von Extension oder Generalisierung. Umfassendes Vorwissen ist daher für das induktive Erklären nicht notwendig (vgl. ebd.).

¹⁰⁶ Die Überlegungen von Console und Saitta (2000) finden auf qualitativer Ebene statt. Werden statistische Konzepte, wie die Stichprobengröße, in die Überlegungen einbezogen, so fällt es zunehmend schwer, zwischen induktiven und abduktiven Erklärungen zu unterscheiden (vgl. z. B. Josephson 2000).

Die Differenzierung zwischen abduktiven und induktiven Erklärungen¹⁰⁷ verdeutlichen Console und Saitta (2000) anschaulich anhand des Beispiels des Leuchtens einer Lampe beim Betätigen eines Lichtschalters. Die Beobachtung, dass die Lampe nach Betätigung des Lichtschalters leuchtet, lässt sich sowohl abduktiv als auch induktiv erklären. Eine abduktive Erklärung erklärt das Leuchten unter Einbindung von domänenspezifischem, erklärendem Vorwissen über Elektrizität. Eine induktive Erklärung ähnelt dagegen eher einer Argumentation und basiert darauf, dass in der Vergangenheit bereits viele Male beobachtet wurde, dass die Lampe leuchtete, sobald der Lichtschalter betätigt wurde. Console und Saitta (2000) betonen, dass eine abduktive Erklärung in dem hier beschriebenen Zusammenhang sinnvoller erscheint, da nur diese in der Lage ist, Ursachen anzuführen, für den Fall, dass die Lampe nicht leuchtet, sobald der Lichtschalter betätigt wird (vgl. ebd.):

„If, at some moment, turning the switch on does not let the lightbulbs starts burning, the inductive explanation just fails, whereas the abductive one can supply hints for understanding what happened and for suggesting remedies“ (ebd., S. 140)

Es sei bereits darauf hingewiesen, dass die Unterscheidung zwischen induktiver und abduktiver Erklärung sich für die Analyse der Lernerantworten als essenziell erweisen wird (siehe insbesondere Abschnitt 7.6). Ferner sei darauf hingewiesen, dass die rein deduktive Bildung von Erklärungshypothesen in dieser Arbeit nicht näher analysiert wird. Entsprechend der zuvor beschriebenen Logik würden entsprechende Erklärungshypothesen aus dem Vorwissen deduziert werden, ohne dass dazu das Diagramm intensiver analysiert werden muss. Während also eine abduktiv gebildete Erklärung im Kontext des Diagrammverstehens dazu dient, Vorwissen auf ein zunächst unbekanntes Diagramm anzuwenden, mit dem Ziel dieses zu erklären und zu elaborieren, dient eine deduktiv gebildete Erklärung dazu, das Vorwissen bzw. die daraus abgeleiteten Konsequenzen mithilfe des Diagramms bzw. der Daten zu überprüfen. Im Fokus der hier durchgeführten Analyse steht jedoch das Verstehen unbekannter Diagramme und nicht das Prüfen von Erklärungshypothesen mithilfe von Diagrammen – obgleich dies ein wesentlicher Bestandteil des Experimentierens im naturwissenschaftlichen Unter-

¹⁰⁷ Hybride Erklärungen – aus induktiv-abduktiven-Schlussfolgerungen – übertragen dagegen beobachtete Sachverhalte auf nicht beobachtete Sachverhalte durch Generalisierungen aus der Theorie (vgl. Console & Saitta (2000)).

richt ist. Auch Console und Saitta (2000) stellen vergleichbar zu diesen eher diagrammspezifischen Überlegungen heraus, dass das deduktive Erklären im Vergleich zum induktiven und insbesondere zum abduktiven Erklären von eher untergeordneter Bedeutung für den Erkenntnisgewinn durch das Erklären ist:

„As the main motivation for wanting an explanation is to increase our knowledge about the world, deduction has to be excluded from our analysis, because adding consequences to a theory does not increase the amount of information we already have.“ (ebd. S. 149)

Obgleich entsprechend dieser Überlegungen das *deduktive Bilden von Erklärungshypothesen* kein essenzieller Bestandteil des Erklärens unbekannter Diagramme ist, stellt die *Deduktion von Vorhersagen auf Grundlage bereits (abduktiv) gebildeter Erklärungshypothesen* einen überaus wichtigen Schritt beim schlussfolgernden Analysieren unbekannter Diagramme dar. Das Zusammenspiel der Schlussfolgerungsarten Abduktion, Deduktion und Induktion in dem entsprechenden Erkenntnisprozess wird im nachfolgenden Abschnitt ausführlich beschrieben.

7.2.4. Interaktion von Schlussfolgerungsarten im Erkenntnisprozess

Im Folgenden wird vereinfachend angenommen, dass sich der Erkenntnisprozess anhand der drei Schlussfolgerungsarten *Abduktion*, *Deduktion* und *Induktion* vollständig strukturieren lässt. Ferner wird angenommen (siehe Abbildung 55), dass Diagrammleser*innen im Rahmen ihres Erkenntnisprozesses zunächst abduktiv, ausgehend von dem konkreten Diagramm, eine oder mehrere Erklärungshypothesen formulieren, um die Graphenverläufe des Diagramms zu erklären. Sie wählen eine der abduzierten Erklärungshypothesen aus und deduzieren ausgehend von dieser Erklärungshypothese Vorhersagen. Diese Vorhersagen (und damit letztendlich auch die zuvor abduzierte Erklärungshypothese) testen sie anhand der Daten (vgl. Flach & Kakas 2000; Magnani 2001, 2004).

Diese nur kurz dargelegten Überlegungen haben Ramoni et al. (1992) (siehe dazu auch Magnani 1992; Stefanelli & Ramoni 1992) mit verschiedenen Ansätzen aus der Problemlöseforschung (siehe dazu Abschnitt 3.6) zu einem generischen *epistemologischen Modell des datenbasierten Schlussfolgerns* verbunden, dem *Select-&-Test-Modell* (kurz ST-Modell, vgl. Ramoni et al. 1992; siehe Abbildung 56).

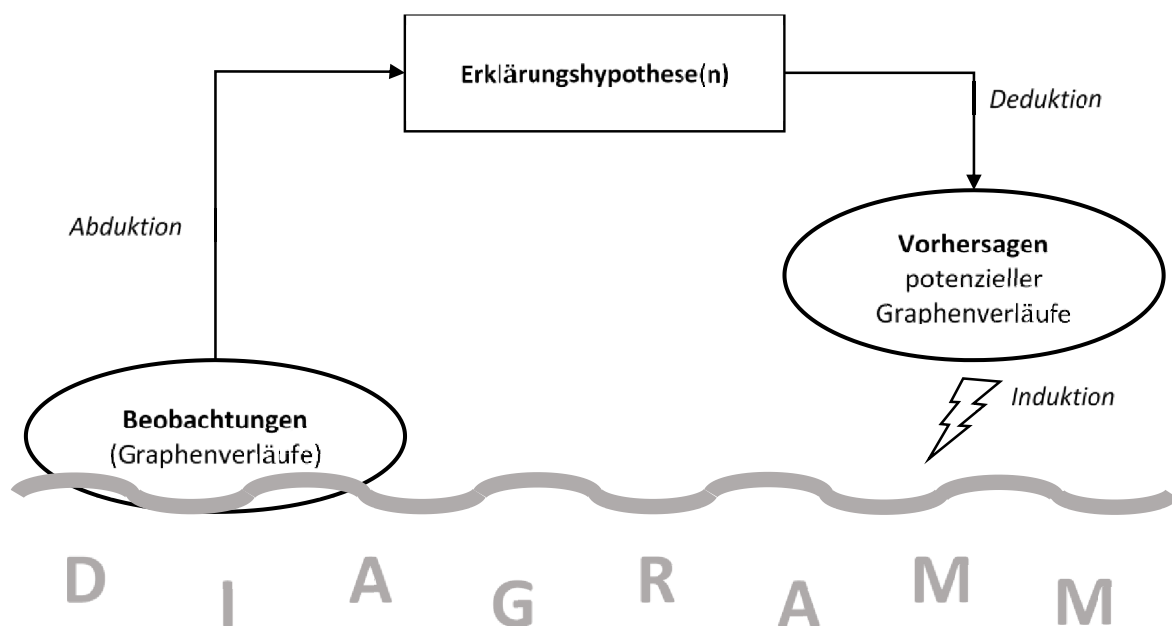


Abbildung 55. Naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinn durch Zusammenwirken von abduktiven, deduktiven und induktiven Schlussfolgerungen (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Flach & Kakas 2000, S. 7)

In ihrer Arbeit fokussieren Ramoni et al. (1992) auf medizinische Kontexte, die in Hinblick auf Datenanalyse viele Parallelen zum Erklären von Diagrammen im naturwissenschaftlichen Unterricht besitzen. So führt Magnani (2004) beispielsweise aus, dass es in der medizinischen Diagnostik nicht darum gehe, auf der Grundlage von Symptomen eine neue Krankheit zu entdecken, sondern durch Anwendung medizinischen Vorwissens eine geeignete Erklärung für beobachtete Symptome auszuwählen bzw. eine solche Erklärung in einem moderat-konstruktivistischen Sinne zu entwickeln (vgl. Magnani 2004).

In einem ersten Schritt, der *Abstraktion* (siehe Abbildung 56), abstrahieren Leser*innen von der perzeptuell zugänglichen Informationsdarstellung (z. B. einem Diagramm), isolieren relevante Problemcharakteristika und strukturieren die für sie relevanten Informationen reduktiv-organisierend in Form einer *Problemrepräsentation* (vgl. Ramoni et al. 1992; Magnani 1992; Stefanelli & Ramoni 1992; siehe Abbildung 56). Eine geeignete Problemrepräsentation könnte beispielsweise aus einzelnen Informationseinheiten bestehen. Stefanelli und Ramoni (1992) betonen, dass die gebildeten Informationseinheiten in nachfolgenden Prozessen wieder elaboriert werden können (vgl. ebd.). Vergleichbares wurde in dieser Arbeit für das Diagrammverstehen bereits anhand des Zusammenspiels von reduktiv-organisierenden und elaborativen Prozessen in Abschnitt 3.7.1 beschrieben.

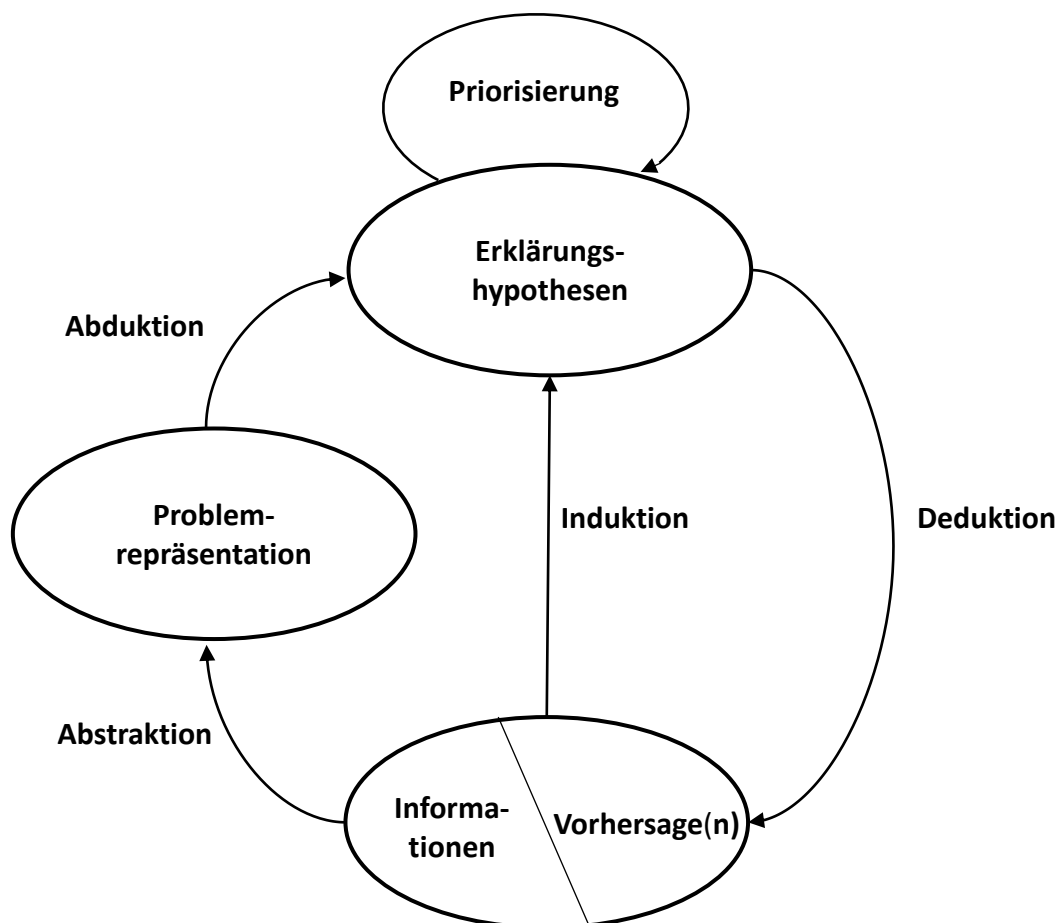


Abbildung 56. Interaktion von Schlussfolgerungsarten im Select-&-Test-Modell (aus dem Englischen und modifiziert durch den Verfasser nach Stefanelli & Ramoni 1992, S. 10; siehe dazu auch Ramoni et al. 1992, Magnani 1992)

Im Idealfall gelingt es den Leser*innen bereits während der Abstraktion, aufbauend auf der konstruierten Problemrepräsentation, einen potenziellen Lösungsraum bzw. einen geeigneten Hypothesensuchraum zu erschaffen. Diesen nutzen sie dann zur *Abduktion* von *Erklärungshypothesen*, mit deren Hilfe sich die Daten kausal erklären lassen (vgl. Ramoni et al. 1992; siehe dazu auch Magnani 1992; Stefanelli & Ramoni 1992; Klahr 2000; siehe Abbildung 56). Dazu konstruieren sie zunächst im Rahmen eines rückwärtsgerichteten Prozesses unfokussierter Abduktion (nicht in Abbildung 56 dargestellt) übergeordnete Hypothesenkategorien und entwickeln erste rudimentäre Erklärungshypothesen, um die Daten zu erklären. Mit voranschreitender Analyse werden die entwickelten Erklärungshypothesen dann zunehmend spezifischer (fokussierte Abduktion). Bestehende Hypothesen werden ausgeschärft, durch komplementäre Hypothesen ergänzt, durch alternative Hypothesen kontrastiert und – im Sinne eines nicht-monotonen Erkenntnisgewinns – sogar gegebenenfalls durch alternative Erklärungshypothesen ersetzt (vgl. Ramoni et al. 1992; Magnani 2004; Magnani 2001). Stefanelli und Ramoni (1992) nehmen dabei an, dass sich die

analysierende Person zunächst auf bestimmte Informationsaspekte konzentriert und andere ignoriert. Werden zuvor ignorierte Informationsaspekte in nachfolgende Analyseschritten einbezogen, kann dies zur Revision oder Modifikation bisheriger Erklärungshypothesen und zur Formulierung neuer Erklärungshypothesen führen (vgl. ebd.). Stefanelli und Ramoni (1992) betonen diesbezüglich:

„The expert has to be ready to withdraw paths of reasoning when they diverge from the correct path - that is, from the path that the expert would have taken if he had considered ignoring certain knowledge portions. Hence, nonmonotonicity turns out to be a foundational epistemological feature of the ST-MODEL of medical reasoning, since it is the result not of mere lack of information, but of reasoned limiting of information imposed by its own logical unsoundness“ (Stefanelli & Ramoni 1992, S. 13).

In einem Prozess der *Priorisierung* (siehe Abbildung 56) werden die konstruierten Hypothesen dann entsprechend ihrer (vermeintlichen) Erklärungskraft oder anderen domänenrelevanten Kriterien¹⁰⁸ geordnet, um sie effizienter testen zu können (vgl. Stefanelli & Ramoni 1992). Die Unsicherheit der zu Beginn der Analyse abduktiv formulierten Erklärungshypothese(n) ist dabei keinesfalls als nachteilig für den Erkenntnisgewinn zu verstehen. Vielmehr ist es gerade diese (kreative) Unsicherheit, die es ermöglicht, dass neue Erkenntnisse gewonnen werden können (vgl. Leuders & Philipp 2014; Philipp 2012).

Aufbauend auf bzw. ausgehend von den priorisierten, abduktiv formulierten Erklärungshypothesen werden *deduktiv Vorhersagen* aus den Erklärungshypothesen abgeleitet, um die jeweiligen Erklärungshypothesen anhand der Daten zu testen (vgl. Stefanelli & Ramoni 1992; siehe Abbildung 56). Die hypothetische, internalisierte Extrapolation eines Graphen – auf Grundlage einer oder mehrerer konkreter Erklärungshypothesen – könnte beispielsweise als eine derartige (deduktive) Vorhersage verstanden werden.

Die deduktiv auf Grundlage des bestehenden Erklärungsmodells prognostizierten Vorhersagen (z. B. der extrapolierte Graphenverlauf) werden, in einem informationsvergleichenden Prozess, *induktiv* anhand der Daten überprüft (siehe Abbildung 56). Die Induktion mediiert daher hier zwischen der Abduktion und der Deduktion „by testing the might be against what is“ (Stefanelli & Ramoni 1992, S. 12). Die einzelnen unsicheren und vorläufigen Erklärungshypothesen

¹⁰⁸ Im medizinischen Kontext, aus dem das Modell stammt, werden beispielsweise Sparsamkeit, Gefahr, Kosten und Heilungserfolg genannt (vgl. Stefanelli & Ramoni 1992, S. 11).

können auf diese Weise gestärkt oder alle bis auf eine bzw. wenige falsifiziert werden. In biologiedidaktischen Arbeiten wird diesbezüglich von Hypothesen-*revision* gesprochen (vgl. z. B. Hammann 2004). Magnani (1992) spricht hier von „inference to the best explanation“ (Magnani 1992, S. 26; vgl. dazu auch Lipton 2004; Harman 1965). Letztendlich wird mittels Induktion darüber entschieden, ob der Sachverhalt zufriedenstellend oder ‚bestmöglich‘ erklärt wurde (vgl. Stefanelli & Ramoni 1992; Ramoni et al. 1992).

7.2.5. Einordnung der Erkenntnisse in die bestehende theoretische Fundierung

In der Literaturstudie, die zur Beantwortung von Forschungsfrage 1 durchgeführt wurde, ließen sich nur wenige Forschungsarbeiten identifizieren, die das Erklären von Diagrammen analysieren. Im Rahmen der in Abschnitt 4.5 gewählten Differenzierung in Dimensionen und Forschungsperspektiven konnte daher bisher keine eigene Perspektive auf das Erklären von Diagrammen eingenommen werden. Durch Einbindung von Arbeiten zum logischen Schlussfolgern und insbesondere zum Abduzieren von Erklärungshypothesen ist es nun aber gelungen, eine solche Perspektive zu entwickeln. Um insbesondere den erkenntnistheoretischen Fokus dieser Perspektive zu betonen wird diese hier als *epistemische Perspektive* bezeichnet (siehe Abbildung 57). Weiterhin gilt jedoch, dass keine der vier Perspektiven alleine genügt, das Diagrammverstehen umfassend zu betrachten oder eine einzelne Dimension vollständig zu analysieren.

Der generische Charakter der im Rahmen der epistemischen Perspektive analysierten Arbeiten ermöglicht die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf das Diagrammverstehen. Von besonderer Relevanz sind dabei Ausführungen von Magnani (z. B. 2004), der sich intensiv mit der Abduktion von Erklärungshypothesen befasste (siehe Abschnitt 7.2.2), die Abgrenzung zwischen induktivem und abduktivem Erklären (siehe Abschnitt 7.2.3) sowie die im Rahmen des ST-Modells beschriebene Interaktion der drei Schlussfolgerungsarten Abduktion, Deduktion und Induktion (siehe Abschnitt 7.2.4). Insbesondere Ausführungen zur Revision und Modifikation von Erklärungshypothesen im Kontext der Datenanalyse sind dabei von zentraler Bedeutung, um die Lernerantworten vor diesem Hintergrund zu analysieren.

Mögliche Vorstellungen von Lernenden, die sich sowohl auf die Konstruktion als auch auf die Revision von Erklärungshypothesen auswirken können, werden in den nachfolgenden Abschnitten analysiert.

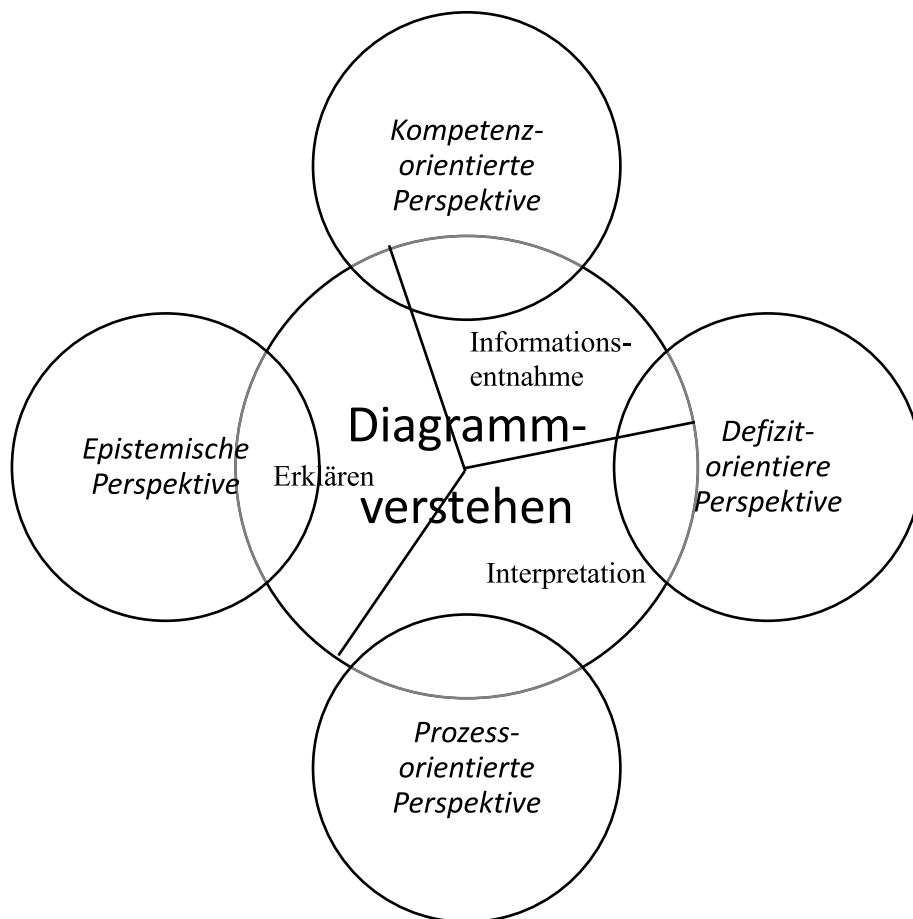


Abbildung 57. Erweiterung des perspektivischen Ansatzes aus Abschnitt 4.5 um eine epistemische Forschungsperspektive auf das Diagrammverstehen (eigene Darstellung)

7.3. Analyse von Lernervoraussetzungen

In drei Analyseschritten wurde explorativ ermittelt, mit welchen möglichen Voraussetzungen die Lernenden in die Analyse des Untersuchungsdiagramms starten könnten. Zunächst wurde in Abschnitt 7.3.1 der Vorwissenstest mittels explorativer Faktorenanalyse dahingehend untersucht, ob dieser – zusätzlich zu den bereits gewonnenen Erkenntnissen über das enzymatische Vorwissen der Lernenden (siehe Abschnitt 6.3.1) – weitere Hinweise auf Lernervoraussetzungen liefert. Um bei der Analyse der Lernerantworten zudem spezifische Schülervorstellungen berücksichtigen zu können, wurden mittels Literaturstudie potenzielle Vorstellungen zum Themenbereich Enzymatik identifiziert (siehe Abschnitt 7.3.2). Zusätzlich dazu wurde die von den Lernenden im Unterricht verwendete Schulbuchliteratur empirisch analysiert (siehe Abschnitt 7.3.3). Die durch diese drei Analyseschritte gewonnenen Erkenntnisse werden nachfolgend zur Kodierung der Lernerantworten und zur Operationalisierung des Diagrammverstehens verwendet (siehe Abschnitte 7.4 bis 7.7).

7.3.1. Vertiefende Analyse des Vorwissenstests

7.3.1.1 Ziele der Analyse

Das enzymatische Vorwissen der Lernenden wurde bereits in Abschnitt 6.3.1 mithilfe des Vorwissenstests untersucht. Es ist daher bereits bekannt, ob die jeweiligen Lernenden beim Analysieren des Diagramms auf geringes oder umfangreiches enzymatisches Vorwissen zurückgreifen konnten. Inwieweit die Lernenden aber zudem über spezifische Kompetenzen verfügten, die für das Erklären von Graphenverläufen und -abschnitten relevant erscheinen, wurde bisher noch nicht überprüft. Ziel der nachfolgenden Analyse war es daher, in dieser Hinsicht relevante, latente Informationen aus dem Vorwissenstest sichtbar zu machen. Die nachfolgende Analyse erfolgt spezifisch vor dem Hintergrund der Frage: *Welche Hinweise liefert der Vorwissenstest in Hinblick auf Problemlöse- und Schlussfolgerungsfähigkeiten der Lernenden, die sich auf das Diagrammverstehen auswirken können?*

7.3.1.2 Methode

Um die latenten Zusammenhänge des Vorwissenstests sichtbar zu machen, wurde eine Hauptkomponentenanalyse (engl. Principal Component Analysis - PCA) durchgeführt (vgl. Field et al. 2012; Backhaus et al. 2018; Brown 2014). Die Hauptkomponentenanalyse ist ein explorativer Ansatz (vgl. Bortz & Schuster 2010), mit dem sich eine größere Menge untereinander korrelierter, manifester Variablen (Itemwerte) zu wenigen, nicht direkt zu beobachtenden, latenten Variablen, den sogenannten Faktoren¹⁰⁹, zusammenfassen lassen (vgl. Backhaus et al. 2018). Ziel ist es, dass die neu konstruierten Faktoren dabei einen möglichst hohen Anteil der Gesamtvarianz auf sich vereinigen (vgl. Fahrmeier et al. 1996). Die notwendigen Bedingungen (vgl. Field 2012) zur Anwendung der Hauptkomponentenanalyse sind erfüllt: Die Stichprobe ist mit 504 Probanden ausreichend groß, der *Bartlett-Test für Sphärizität* (als Maß für die Korrelation der manifesten Variablen) ist statistisch höchstsignifikant ($\chi^2(276) = 1815.51, p < .001$) und das Ergebnis des KMO-Tests kann mit einem Wert von 0.86¹¹⁰ als sehr gut eingestuft

¹⁰⁹ Die ‚Faktoren‘ der Hauptkomponentenanalyse müssten eigentlich als Komponenten bezeichnet werden. Angelehnt an Maltby, Day & Macaskill (2011) wird hier zur Vereinfachung von Faktoren gesprochen (ebd. S. 928).

¹¹⁰ Fast alle KMO-Werte der Variablen (Items) liegen über .80; Werte unter 0.65 treten nicht auf.

werden (vgl. Field et al. 2012; Hutcheson & Sofroniou, 1999; Backhaus et al. 2015).

Die Entscheidung für eine bestimmte Anzahl an Faktoren und die Interpretation der entsprechenden Faktoren erfolgen vor dem Hintergrund forschungsrelevanter Überlegungen (vgl. Backhaus et al. 2018). Als theoretische Basis für die Interpretation der hier durchgeführten Hauptkomponentenanalyse (siehe nachfolgender Abschnitt) dienen insbesondere die in Abschnitt 3.6 vorgenommene Betrachtung von Diagrammverstehen als Problemlöseprozess sowie die in Abschnitt 7.2 geschilderten Ausführungen zum induktiven und abduktiven Erklären. So lässt sich beispielsweise annehmen – unter Vernachlässigungen der Ausführungen zu beidseitigen Strategien in Abschnitt 3.6 –, dass Diagramme vorwärtsgerichtet, ähnlich dem induktiven Erklären, und rückwärtsgerichtet, ähnlich dem abduktiven Erklären, analysiert bzw. erklärt werden können.

Um die Anzahl möglicher Faktoren zu bestimmen, werden der *Scree-Test* bzw. *Scree-Plot* (Eigenwertediagramm), die *Optimalkoordinaten-Methode* und die *Parallel-Analyse* verwendet (vgl. Wolff & Bacher 2010). In einem *Scree-Plot* werden die Eigenwerte der möglichen, einzelnen Faktoren grafisch aufgetragen (siehe Abbildung 58). Der Eigenwert eines Faktors ist der Betrag der Gesamtstreuung aller Variablen (Items), der durch den jeweiligen Faktor erklärt werden kann. Rechnerisch handelt es sich um die Summe über die quadrierten Faktorladungen bei einem Faktor (vgl. Fromm 2012).¹¹¹ Der Eigenwert kann als Maß für die Relevanz des Faktors in dem entsprechenden Kontext betrachtet werden. Häufig werden Faktoren in die Analyse einbezogen, deren Eigenwerte deutlich über 1 liegen (vgl. Fromm 2012, Field 2012). Neben der grafischen Identifikation von Faktoren mit hohen Eigenwerten kann der *Scree-Plot* auch genutzt werden, um die Anzahl möglicher Faktoren weiter zu reduzieren. Als Kriterium zur Entscheidung für eine bestimmte Anzahl an Faktoren dient der Verlauf des Graphen bzw. der Punkt des Graphen, ab dem dieser seine Steigung stark ändert. Es werden lediglich Faktoren zur Linken des entsprechenden Punktes, auch als *Knick* oder *Ellenbogen* bezeichnet, in die Analyse einbezogen (vgl. Field 2012). Für den hier dargestellten *Scree-Plot* (siehe Abbildung 58) könnte die Anwendung dieses Kriteriums zu einer einfaktoriellen, eher jedoch zu einer

¹¹¹ Dabei ist zu beachten, dass sich der erklärte Varianzanteil durch Rotation der Faktoren verändern kann (vgl. Fromm 2012).

dreifaktoriellen Lösung führen¹¹². Da die Verwendung des Ellenbogen-Kriteriums relativ subjektiv ist, raten verschiedene Autoren (zusätzlich) zur Verwendung nicht-grafischer Entscheidungskriterien (vgl. Streiner 1998; Raïche et al. 2013). Es werden daher zur Unterstützung die Parallel-Analyse (vgl. Horn 1965; Ruscio & Roche 2012) und die Optimalkoordinaten-Methode (vgl. Raïche et al. 2013) verwendet. Beide Methoden deuten ebenfalls auf eine dreifaktorielle Lösung hin (siehe Abbildung 58).

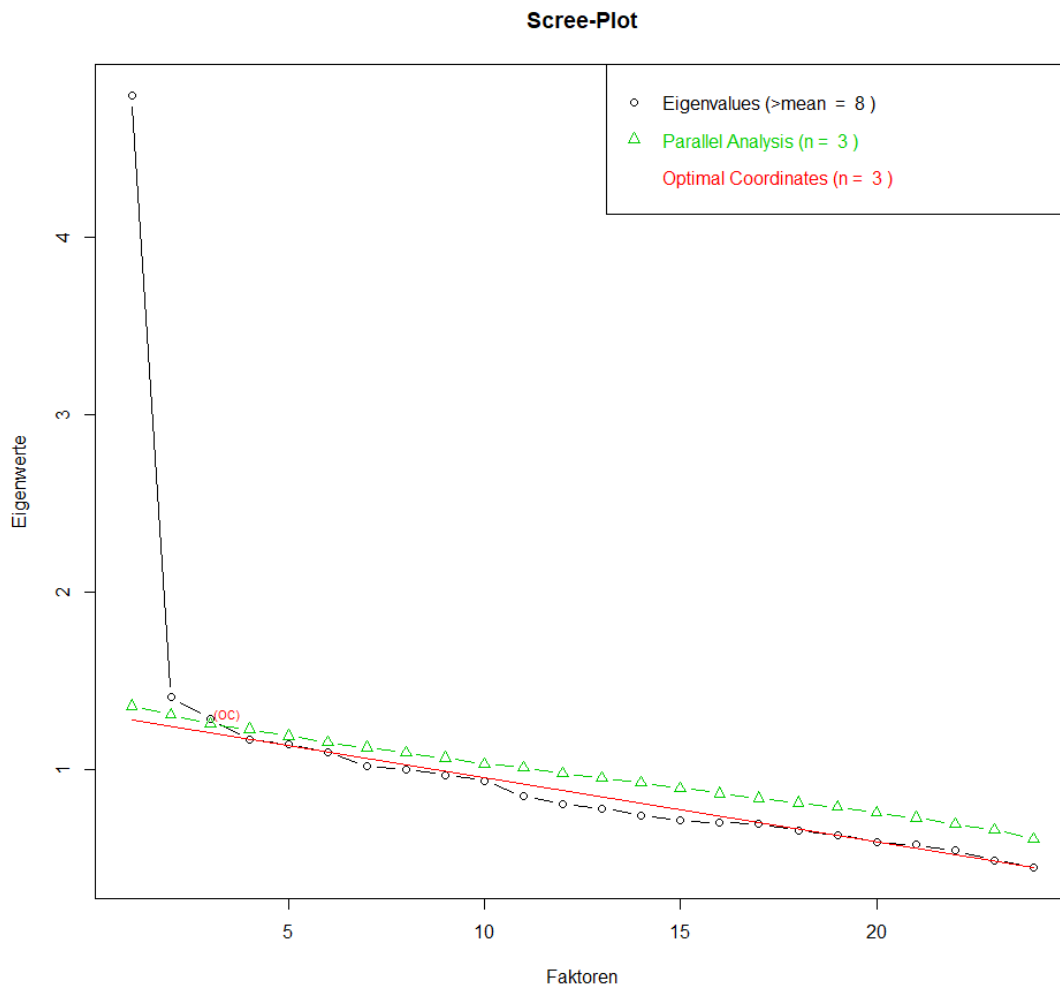


Abbildung 58. Scree-Plot der Hauptkomponentenanalyse (eigene Darstellung)

In der nachfolgenden Hauptkomponentenanalyse wird daher die Anzahl der zu extrahierenden Faktoren auf drei festgelegt und ermittelt, welche Variablen (Items) sich diesen drei Faktoren zuordnen lassen. Es wird empfohlen, die entsprechenden Faktoren dazu zu rotieren (vgl. Backhaus et al. 2018; Bortz & Schuster 2010). Die Rotation hat keinen Einfluss auf die insgesamt aufzuklärende Varianz, sondern nur auf die Erklärung der Varianz durch die jeweiligen

¹¹² Schermelleh-Engel, Werner und Moosbrugger (2007) sprechen sich in einem vergleichbaren Fall ebenfalls für eine dreifaktorielle Lösung aus (vgl. ebd.).

Faktoren (vgl. Fromm 2012). Die Entscheidung für eine bestimmte Art und Weise der Rotation ist vor dem Hintergrund des jeweiligen Forschungsdesigns bzw. des jeweiligen Stands der Theoriebildung zu treffen (vgl. Bortz & Schuster 2010). Da vor dem Hintergrund der Konzeption des Vorwissenstests angenommen werden kann, dass die drei Faktoren untereinander korrelieren, wurde zur Rotation die Rotationsmethode *Oblimin* verwendet (vgl. Field 2012).

7.3.1.3 Ergebnisse

Mithilfe der zuvor beschriebenen Hauptkomponentenanalyse ermittelte Faktormatrix der drei extrahierten Faktoren ist in Tabelle 15 dargestellt. Die Spalten der Faktormatrix zu den jeweiligen Faktoren geben die standardisierten Ladungen der Variablen (Items) wieder, mit denen diese auf die jeweiligen Faktoren laden (vgl. Stanton 2017). Um die Interpretation der Faktoren zu erleichtern, wurden die jeweiligen Variablen (Items) entsprechend ihren Faktorladungen in absteigender Reihenfolge den drei Faktoren zugeordnet. Sofern Variablen (zur Beschreibung der Ergebnisse wird im Folgenden nur noch von Items gesprochen) mit einer Ladung > 0.20 auf zwei Faktoren laden, wurden die Ladungen mit einem Stern gekennzeichnet (siehe Tabelle 15).

Die Ladungen der einzelnen Items auf die drei Faktoren unterscheiden sich deutlich voneinander (siehe Tabelle 15). Auf *Faktor 1* laden insbesondere 12 Items (siehe Items 23, 5, 15, 10, 24, 3, 25, 21, 14, 8, 2, 12, erste 12 Zeilen in Tabelle 15). Von diesen 12 Items liegt die Ladung von vier Items über 0.50, von vier Items über 0.40 und von den verbleibenden vier Items über 0.20. *Faktor 2* lassen sich neun Items zuordnen (siehe Items 17, 11, 18, 20, 22, 7, 19, 26, 16, Zeilen 13 bis 21 in Tabelle 15). Hier liegen zwei Ladungen über 0.50, vier Ladungen über 0.40 und drei Ladungen über 0.20. Auf *Faktor 3* laden lediglich drei Items (siehe Items 1, 6, 4, Zeilen 22 bis 24 in Tabelle 15). Hier liegen zwei Ladungen über 0.50 und eine Ladung über 0.40.

Die *Kommunalität* (siehe Spalte h^2) und der *Komplexitätsindex* (siehe Spalte K) liefern zusätzliche Informationen zu den Variablen (vgl. Stanton 2017). Die Kommunalität gibt an, wie viel an Varianz in einer Variablen durch die jeweiligen Faktoren erklärt werden kann. So lassen sich mithilfe der drei Faktoren beispielsweise 36 % der Varianz von Item 23 erklären (siehe Tabelle 15). Der *Komplexitätsindex* (K) gibt an, über wie viele Faktoren sich die Ladungen einer Variablen verteilen. Je näher dieser Wert bei 1 liegt, umso weniger Faktoren stehen in Relation zu dieser Variablen; je weiter der Wert über 1 liegt, umso größer ist

die Anzahl an Faktoren, die in Beziehung zu der jeweiligen Variablen stehen (vgl. Stanton 2017). So lässt sich beispielsweise Item 16 (*Ein allosterischer Aktivator steigert die Enzymaktivität, indem dieser die ...*, $K = 2,9$) nicht trennscharf einem einzelnen Faktor zuordnen. Stattdessen wird die Varianz durch alle drei Faktoren nahezu gleichermaßen erklärt. In dieser Hinsicht bildet Item 16 allerdings eine Ausnahme. Die meisten Items lassen sich relativ gut den einzelnen Faktoren zuordnen. Die durchschnittliche Komplexität beträgt 1.6.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Hauptkomponentenanalyse werden drei Subskalen gebildet. Diese drei Subskalen zeigen für die Faktoren 1 ($\alpha = 0.72$) und 2 ($\alpha = 0.70$) akzeptable Reliabilitätswerte (vgl. Bühner 2011; Tepner & Dollny 2014). Für Faktor 3, Items 1, 4, und 6, ist die Reliabilität mit $\alpha = 0.40$ allerdings sehr gering. Es sei darauf hingewiesen, dass die entsprechenden drei Items ausschließlich deklaratives Wissen erfassen und in dem Testinstrument vornehmlich den Zweck erfüllt haben, den Lernenden den Einstieg in den Vorwissenstest zu erleichtern (siehe Darstellung von Item 1 in Abbildung 59). Für die nachfolgende Analyse besitzen sie nur wenig Erklärungskraft. Sie werden daher von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Die beiden Faktoren 1 und 2 werden im nachfolgenden Abschnitt inhaltlich interpretiert.

1. Aus welchen Grundbausteinen sind die meisten Enzyme aufgebaut?

- Fettsäuren
- Nukleinsäuren
- Aminosäuren
- Zuckersäuren

Abbildung 59. Item 1 aus dem Vorwissenstest zur Erfassung des enzymatischen Vorwissens (eigene Darstellung)

Tabelle 15. Ergebnisse, der auf den Vorwissenstest angewandten Hauptkomponentenanalyse. Dargestellt sind Items des Vorwissenstests inklusive ihrer Ladungen auf die drei Faktoren.

Nr.	Item (Lösung in eckigen Klammern; Distraktoren nicht dargestellt)	(TC1)	(TC2)	(TC3)	h2	K
23	Die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym und Substrat aufeinandertreffen, kann gesteigert werden durch eine Erhöhung der ... [Substratkonzentration; Enzymkonzentration; Temperatur]	.63	-.18	.02	0.36	1.2
5	Enzyme beschleunigen chemische Reaktionen, indem sie die für die Reaktion notwendige Aktivierungsenergie ... [senken]	.57	.11	.13	0.42	1.2
15	Enzymatische Reaktionen lassen sich durch eine Erhöhung der Temperatur beschleunigen, weil bei höherer Temperatur ... [Enzym und Substrat sich schneller bewegen und deshalb häufiger aufeinandertreffen]	.53*	-.09	-.28*	0.30	1.6
10	Nachdem ein Enzym ein Substrat zu einem Produkt umgesetzt und sich das Produkt vom Enzym gelöst hat, steht das Enzym meist ... [unmittelbar für weitere Reaktionen zur Verfügung]	.52*	.26*	.03	0.43	1.5
24	Typischerweise gilt für Enzyme, dass diese ... [jeweils nur ein bestimmtes Substrat umsetzen; jeweils nur bei einer bestimmten Reaktion wirken]	.49*	-.18	.21*	0.28	1.7
3	Ein Enzym, das eine Reaktion katalysiert hat, geht aus dieser Reaktion typischerweise wie hervor? [unverändert]	.48	.16	.16	0.36	1.5
25	Im menschlichen Organismus sind Enzyme verantwortlich für ... [die Spaltung größerer Moleküle zu kleineren Molekülen; die Beschleunigung von Stoffwechselreaktionen]	.47*	.26*	-.03	0.36	1.6
21	Die maximal mögliche Anzahl an Produktmolekülen, die bei einer enzymatischen Reaktion entstehen können, lässt sich steigern durch eine Erhöhung der ... [Substratkonzentration]	.44*	.00	-.39*	0.28	2.0
14	Ohne Enzyme kann ein Mensch nicht überleben, weil ohne Enzyme zahlreiche chemische Reaktionen im Körper viel zu ... [langsam ablaufen würden]	.34	.04	.16	0.17	1.5
8	Wenn ein Enzym „denaturiert“ wird, dann wird dieses Enzym ... [in seiner räumlichen Struktur verändert]	.31	.16	.19	0.22	2.2
2	Ein Enzym-Substrat-Komplex ist dadurch charakterisiert, dass ein Substrat sich ... [vorübergehend mit einem Enzym verbindet]	.28	.22*	.09	0.19	2.1
12	Der Begriff Wirkungsspezifität drückt aus, dass jedes Enzym in der Regel nur ... [eine bestimmte Veränderung des Substrates bewirken kann]	.25	.01	.18	0.11	1.9

17	Ein kompetitiver Hemmstoff hemmt die Enzymaktivität umso stärker, je ähnlicher dieser dem ... [Substrat ist]	-0.18	.73	.01	0.49	1.1
11	Kompetitive Hemmstoffe binden an das ... [aktive Zentrum]	-0.02	.52	-0.11	0.25	1.1
18	Der hemmende Einfluss eines kompetitiven Hemmstoffes lässt sich verringern durch eine Erhöhung der ... [Substratkonzentration]	.10	.49	-0.03	0.28	1.1
20	Am aktiven Zentrum kann ... [das Substrat binden; ein kompetitiver Hemmstoff binden; die Umsetzung von Substrat zu Produkt stattfinden]	.37*	.47*	.07	0.48	1.9
22	Bei welchen Typen von Enzymhemmungen verringert eine Erhöhung der Substratkonzentration die Stärke der Hemmung? [kompetitive Hemmung durch einen Hemmstoff]	.23*	.45*	-0.02	0.31	1.5
7	Welcher Vorgang ist in der Abbildung (Abbildung zeigt Substratmolekül und Enzymmolekül mit allosterischen und aktiven Zentrum) dargestellt? [allosterische Hemmung]	.33*	.43*	.06	0.40	1.9
19	An welchen Vorgängen sind Enzyme beteiligt? [Abbau von Molekülen; Aufbau von Molekülen]	.12	.36	-0.04	0.16	1.3
26	Welche Bindungen sind entscheidend für die Ausbildung der Primärstruktur eines Enzyms? [Amidbindungen bzw. Peptidbindungen]	.11	.35	.19	0.22	1.8
16	Ein allosterischer Aktivator steigert die Enzymaktivität, indem er die ... [die räumliche Struktur eines Enzyms verändert]	.21*	.25*	.25*	0.24	2.9
1	Aus welchen Grundbausteinen sind die meisten Enzyme aufgebaut? [Aminosäuren]	-0.08	.03	.69	0.47	1.0
6	Die meisten Enzyme gehören zur Stoffgruppe der ... [Eiweiße bzw. Proteine]	.13	-0.08	.64	0.44	1.1
4	Welche Enzymstruktur lässt sich als langgezogene Kette darstellen? [Primärstruktur]	.12	.03	.46	0.25	1.1
Eigenwerte		3.22	2.54	1.73		
% der Varianz		0.13	0.11	0.07		
<i>Cronbachs Alpha</i> (α)		0.72	0.70	0.40		

Anmerkung. Die Items wurden entsprechend der Höhe ihrer Faktorladungen angeordnet. Items mit Ladungen > .20 wurden fett gedruckt; Items, die mit einer Ladung > .20 auf mehr als einen Faktor laden, wurden mit * gekennzeichnet.

7.3.1.4 Interpretation der Ergebnisse

Die inhaltliche Interpretation der Faktoren 1 und 2 erfolgt vor dem Hintergrund der in Abschnitt 3.6 beschriebenen Ansätze zur Problemlöseforschung. Um den Lesefluss zu erleichtern, werden diese Ansätze im Folgenden, zunächst auf Faktor 2 und anschließend auf Faktor 1 übertragen.

In der Problemlöseforschung lässt sich zwischen *vorwärtsgerichteten* und *rückwärtsgerichteten Problemlösestrategien* unterscheiden.¹¹³ Unter *vorwärtsgerichteten Strategien* versteht Appelrath (1985) Schlussfolgerungsstrategien, bei denen ausgehend von umfangreichem Vorwissen schrittweise (evtl. auch rekursiv) Wissen zur Beantwortung einer Frage im Sinne einer induktiven Logik bereitgestellt wird (vgl. ebd.). Zumbach et al. (2008) erläutern entsprechende Strategien anschaulich anhand des Vorgehens erfahrener Mediziner. Diese seien aufgrund ihres hohen Vorwissens und ihrer langjährigen Erfahrung durch Kombination oberflächlicher, leicht zugänglicher Informationen, wie Erscheinungsbild des Patienten, explizit geäußerter Beschwerden oder Röntgenbilder, sehr schnell dazu in der Lage aus den gegebenen Daten induktiv geeignete Schlussfolgerungen abzuleiten, um Interventionsmaßnahmen zu veranlassen (vgl. ebd.).

Alle hoch auf Faktor 2 ladenden Items (siehe Tabelle 15) lassen sich mithilfe solcher vorwärtsgerichteter Strategien lösen. Beispielhaft sei dies anhand von Item 11 (*Kompetitive Hemmstoffe binden an das ...*, Ladung von .52 auf Faktor 2; Ladung von .02 auf Faktor 1) und Item 17 (*Ein kompetitiver Hemmstoff hemmt die Enzymaktivität umso stärker, je ähnlicher dieser dem ...*, Ladung von .73 auf Faktor 2; Ladung von .18 auf Faktor 1) erläutert.

Um die beiden Items zu lösen, aktivieren Leser*innen mit hohem enzymatischem Vorwissen bereits beim Lesen des jeweiligen Itemstamms ihr Vorwissen über kompetitive Hemmstoffe. Kompetitive Hemmstoffe ähneln in ihrer chemischen Struktur dem Substratmolekül (vgl. Heinrich, Müller & Graeve 2014). Sie können daher an das aktive Zentrum eines Enzyms binden und verhindern dadurch, dass dort ein Substratmolekül binden kann. Leser*innen, die über dieses Vorwissen verfügen, sind in der Lage, die gesuchte Antwort unmittelbar

¹¹³ Zudem sei auf Literatur zur Unterscheidung von Oberflächenstrategien (*surface level approaches*) und Tiefenstrategien (*deep level approaches*) verwiesen. Bei der Verwendung von Oberflächenstrategien werden lediglich oberflächliche, leicht zugängliche Informationen aus dem Text extrahiert, während Lernende, welche Tiefenstrategien anwenden, versuchen, die Zusammenhänge zwischen den jeweiligen Informationen zu verstehen (vgl. z. B. Marton & Saljö 1976; Leopold 2009; Schlag 2011).

durch Reproduktion ihres Vorwissens (vgl. Hammann 2006) zu geben. Sie müssen dazu nicht, beziehungsweise nur sehr begrenzt, von der im Itemstamm beschriebenen Problemsituation abstrahieren und können sich die jeweiligen Vorgänge relativ konkret – zumeist unter Erinnerung an entsprechende Darstellungen in den Lehrwerken – vorstellen. Items, die ein solches Vorgehen ermöglichen, werden daher im Folgenden als vorwissensbasierte „*konkrete Items*“ bezeichnet, die Fähigkeit zum Lösen der entsprechenden Items wird analog dazu als *Fähigkeit zum kontextspezifischen konkreten Schlussfolgern* bezeichnet. Es wird angenommen, dass diese Fähigkeit durch Faktor 2 repräsentiert wird.

Die soeben beschriebene vorwärtsgerichtete Strategie ist dagegen zur Lösung der hoch auf Faktor 1 ladenden Items (siehe Tabelle 15) nicht anwendbar bzw. vor dem Hintergrund der Stichprobe (siehe Abschnitt 6.2.3) ist nicht zu erwarten, dass die Lernenden in der Lage sind, solche Items mithilfe der hier beschriebenen vorwärtsgerichteten Lösungsstrategien zu beantworten. Zu solchen Items gehören beispielsweise Item 15 (*Enzymatische Reaktionen lassen sich durch eine Erhöhung der Temperatur beschleunigen, weil bei höherer Temperatur ...* Ladung von .53 auf Faktor 1; Ladung von .09 auf Faktor 2) und Item 23 (*Die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym und Substrat aufeinandertreffen, kann gesteigert werden durch eine Erhöhung der ...*, Ladung von .63 auf Faktor 1, Ladung von .18 auf Faktor 2).

Um die beiden Items (sowie vergleichbare Items, siehe Tabelle 15) korrekt lösen zu können, müssen die Lernenden *rückwärtsgerichtete Lösungsstrategien* anwenden.¹¹⁴ Sie müssen den im Itemstamm benannten dynamischen Zielzustand, in dem mehrere Enzym- und Substratmoleküle auf Teilchenebene miteinander interagieren, mental simulieren. Davon ausgehend konstruieren sie – unter Einbezug ihres Vorwissens – kausale Erklärungshypothesen für diesen Zielzustand. Es kann durchaus angenommen werden, dass Lernende hier wie in dem ST-Modell beschrieben vorgehen (siehe Abschnitt 7.2.4) und in einem iterativen

¹¹⁴ Auch für das Beantworten von Items, die auf Faktor 1 laden, ist umfangreiches Vorwissen notwendig. Die beschriebene Lösungsstrategie besitzt daher neben rückwärtsgerichteten Prozessschritten auch vorwärtsgerichtete Prozessschritte und ähnelt damit der von Apperath (1985) beschriebenen zweiseitig-gerichteten Strategie (siehe Abschnitt 3.6). Da allerdings in den Items potenzielle Antwortmöglichkeiten bereits vorgegeben wurden, wurde die Notwendigkeit des Vorwissens stark reduziert. Es wird daher angenommen, dass zum Lösen der jeweiligen Items vornehmlich die Anwendung rückwärtsgerichteter Strategien entscheidend ist.

Schlussfolgerungsprozess, der vornehmlich auf der mental simulierten Teilchenebene stattfindet, ungeeignete Antwortmöglichkeiten (im Sinne eines Schlusses auf die beste Erklärung) so lange ausschließen, bis ihnen nur noch eine Antwortmöglichkeit geeignet erscheint. Zumbach et al. (2008) führen vergleichbar dazu bei ihrer Beschreibung *rückwärtsgerichteter Problemlösestrategien* aus, dass alle Erklärungshypothesen für einen Zielzustand in einem „zeitaufwendigem Vorgehen oftmals gegeneinander abgewogen [werden], bis schließlich die ‚wahrscheinlichste‘ Hypothese [...] übrig bleibt“ (ebd., S. 6; siehe dazu auch Abschnitt 3.6). Items, die hoch auf Faktor 1 laden, werden daher hier – in Abgrenzung zu den zuvor beschriebenen *konkreten Items* (Faktor 2) – als *abstrakte Items* bezeichnet. Die Fähigkeit zum Lösen dieser abstrakten Items wird als *Fähigkeit zum kontextspezifischen abstrakten Schlussfolgern* bezeichnet. Es wird angenommen, dass diese Fähigkeit durch Faktor 1 repräsentiert wird.

Eine zusammenfassende Beschreibung der beiden Faktoren, die in die nachfolgenden Analysen anhand ihrer Faktor-Scores einbezogen werden (vgl. Field et al. 2012), ist in Tabelle 16 dargestellt.

Tabelle 16. Übersicht über die aus dem Vorwissenstest extrahierten Schlussfolgerungsfaktoren

Faktor	Interpretation des Faktors
Faktor 1: Fähigkeit zum kontextspezifischen <i>abstrakten Schlussfolgern</i>	Beim kontextspezifischen <i>abstrakten Schlussfolgern</i> wird, aufbauend auf gegebenen Informationen, zunächst eine Problemrepräsentation (Zielzustand) konstruiert, um darauf aufbauend verschiedene Erklärungshypothesen für diesen Zielzustand im Sinne eines Schlusses auf die beste Erklärung gegeneinander abzuwägen.
Faktor 2: Fähigkeit zum kontextspezifischen <i>konkreten Schlussfolgern</i>	Beim kontextspezifischen <i>konkreten Schlussfolgern</i> wird, aufbauend auf dem Vorwissen (insbesondere durch Reproduktion des Vorwissens), mittels induktiver Logik (vorwärtsgerichtet) eine Schlussfolgerung formuliert wird.

Vor dem Hintergrund der Ausführungen zum Problemlösen in Abschnitt 3.6 und zum Erklären von Diagrammen mittels rückwärtsgerichteter Logik (siehe Abschnitte 3.4.3 und 7.2) wird angenommen, dass sich insbesondere die Fähigkeit zum *kontextspezifischen abstrakten Schlussfolgern* (Faktor 1) als hilfreich erweist, um Graphenverläufe eines Diagramms zu erklären.

7.3.1.5 Synthese der Erkenntnisse zu vier Analysetypen

Mittels Hauptkomponentenanalyse (PCA) konnte in den vorausgegangenen Abschnitten gezeigt werden, dass die Items des Vorwissenstests vornehmlich auf zwei Faktoren laden. Diese beiden PCA-Faktoren wurden als Fähigkeit zum kontextspezifischen *abstrakten Schlussfolgern* (Faktor 1) und Fähigkeit zum kontextspezifischen *konkreten Schlussfolgern* (Faktor 2) interpretiert.

Im Folgenden werden die Lernenden der Stichprobe in Hinblick auf die Ausprägung dieser beiden Faktoren voneinander unterschieden. Lernende werden hinsichtlich eines Faktors als leistungsstark beurteilt, wenn der jeweilige Faktor-Score über bzw. gleich dem Mittelwert ist, sie werden als leistungsschwach beurteilt, wenn der Faktor-Score unter dem Mittelwert liegt.

Die Lerner lassen sich dadurch, im Sinne einer explorativen Typologisierung, in einer vier Felder-Matrix¹¹⁵ einem von vier Quadranten zuordnen (vgl. Lazarsfeld 1937; siehe Tabelle 17). Vier Analysetypen können auf diese Weise voneinander unterschieden werden: kontextspezifische *Noviz*innen* und *Expert*innen* sowie kontextspezifische *Konkretisierer*innen* und *Abstrahierer*innen*. Zur Vereinfachung des Leseflusses wird im Folgenden auf den Hinweis „kontextspezifisch“ verzichtet. Die in Tabelle 17 dargestellten Zellen können vor dem Hintergrund der vorausgegangenen Ausführungen wie folgt interpretiert werden:

*Noviz*innen* verfügen über geringes domänenspezifisches Vorwissen. Sie sind nicht dazu fähig, die enzymatischen Sachverhalte auf Teilchenebene zu analysieren. Sowohl hinsichtlich der Fähigkeit zum abstrakten als auch hinsichtlich der Fähigkeit zum konkreten Schlussfolgern sind sie vergleichsweise leistungsschwach.

*Expert*innen* verfügen über hohes domänenspezifisches Vorwissen und können sich die Interaktion von Enzym- und Substratmolekülen auf Teilchenebene vorstellen. Sie zeigen vergleichsweise hohe Fähigkeiten hinsichtlich beider Faktoren. Durch Anwendung ihres Vorwissens sowie durch den Einsatz geeigneter

¹¹⁵ Es sei darauf hingewiesen, dass eine Zuordnung zu den gewählten Analysetypen häufig nicht die grafisch suggerierte Eindeutigkeit besitzt. Bei keinem der beiden Faktor-Scores ist eine wesentliche Abweichung von der Normalverteilung zu erkennen. Entsprechend lassen sich zahlreiche Lernende hinsichtlich ihrer Leistung in der Nähe des Mittelwertes einordnen. Die Zuordnung zu den jeweiligen Typen erfolgt daher teilweise aufgrund sehr geringer Unterschiede in der Leistung der Lernenden beim Lösen der jeweiligen Items. Obgleich daher hier nicht von einer eindeutigen Typologisierung zu sprechen ist, liefert die gewählte Klassifikation einen ersten Ansatz, um Erkenntnisse aus dem Vorwissenstest zu kontextspezifischen Schlussfolgerungsfähigkeiten der Lernenden in komprimierter Art und Weise in die Analyse der Lernerantworten einzubeziehen.

Schlussfolgerungsstrategien gelingt es ihnen, überdurchschnittlich viele Items des Vorwissenstests korrekt zu lösen.

Tabelle 17. Explorative Typologisierung von Lernenden in mögliche Analysetypen

		<i>Fähigkeit zum konkreten Schlussfolgern</i>	
		gering	hoch
<i>Fähigkeit zum abstrakten Schlussfolgern</i>	hoch	Abstrahierer*innen (94 Lernende)	Expert*innen (158 Lernende)
	gering	Noviz*innen (158 Lernende)	Konkretisierer*innen (94 Lernende)

*Konkretisierer*innen* scheinen über hohes reproduktionsnahes¹¹⁶ enzymatisches Vorwissen zu verfügen. Sie erweisen sich – ähnlich wie *Expert*innen* – als relativ erfolgreich bei der Beantwortung von konkreten Items, die sich durch Anwendung (häufig Reproduktion) von Vorwissen mittels vorwärtsgerichteter Lösungsstrategien lösen lassen. Ähnlich wie *Noviz*innen* zeigen *Konkretisierer*innen* allerdings erhebliche Schwierigkeiten beim Lösen abstrakter Items. Es scheint ihnen schwerzufallen, sich die Interaktionen von Enzym- und Substratmolekülen auf Teilchenebene vorzustellen.

*Abstrahierer*innen* sind Lernende, die über geringes reproduktionsnahes enzymatisches Vorwissen zu verfügen scheinen. Vorwärtsgerichtete Lösungsstrategien scheinen ihnen daher nicht oder nur sehr eingeschränkt zur Verfügung stehen. Ähnlich wie *Expert*innen* zeigen sie jedoch hohe Fähigkeiten bei Items, die sich durch Anwendung rückwärtsgerichteter Lösungsstrategien lösen lassen. Es wird vermutet, dass sie dazu in einem hypothesengenerierenden und -testenden Verfahren innerhalb eines mental konstruierten Lösungsraums unzutreffende Antwortalternativen so lange ausschließen, bis ihnen nur noch eine Antwortalternative geeignet erscheint.¹¹⁷ Entsprechende Schlussfolgerungsfähigkeiten könnten sich auch für das Diagrammverstehen als besonders hilfreich erweisen.

¹¹⁶ Vorwissen wird hier als reproduktionsnah verstanden, wenn dieses in enger Verbindung zu den Lehr-/Lerninhalten aus dem Schulunterricht, insbesondere Schulbuchtexten, steht (vgl. Hammann 2006).

¹¹⁷ Es könnte zudem vermutet werden, dass *Abstrahierer*innen* den Lösungsraum in geeigneter Art und Weise einschränken können als *Noviz*innen* und *Konkretisierer*innen* und es daher leichter haben, ungeeignete Antwortalternativen auszuschließen.

7.3.2. Schülervorstellungen zum Themenbereich Enzymatik

Der Themenbereich Enzymatik umfasst zahlreiche abstrakte Konzepte und stellt Lernende daher vor große Herausforderungen (vgl. Lau 2013; Justi 2002; Orgill & Bodner 2006, 2007; Özarslan & Çetin 2014; Van Mil et al. 2016). Problematisch ist insbesondere, dass Lernende relevante Vorgänge auf Teilchenebene nicht direkt beobachten und erfahren können. Auch computergesteuerte Animationen, die hier unterstützen könnten, scheinen – sofern diese den Schulen überhaupt zur Verfügung stehen – noch nicht hinreichend ausgereift zu sein (vgl. Lau 2013). Lernende müssen sich die jeweiligen Sachverhalte daher zumeist selbstgesteuert vorstellen. Um bei der Operationalisierung des Diagrammverstehens mögliche Schülervorstellungen berücksichtigen zu können, wurde vor dem Hintergrund der Frage *Welche Erkenntnisse existieren in der Forschung zu Schülervorstellungen über den Themenbereich Enzymatik?* theoretisch-explorativ eine Literaturstudie durchgeführt.

Dabei zeigte sich, dass trotz der erheblichen, hier nur angedeuteten, Herausforderungen mit denen Lernende im Themenbereich Enzymatik konfrontiert werden, Studien zu Schülervorstellungen in diesem Themenbereich, verglichen mit Themenbereichen wie Genetik, Ökologie, Evolution und Humanbiologie (zu einer Übersicht über entsprechende Studien siehe Hammann & Asshoff 2014), deutlich unterrepräsentiert sind.¹¹⁸ Linenberger und Bretz (2012) sprechen hier sogar von einem „lack of literature on enzyme-substrate misconceptions“ (ebd., S. 174). Um detailliertere Einblicke in Schülervorstellungen in diesem Themenbereich zu gewinnen, führten Linenberger und Bretz (2012, 2014, 2015) sowie Bretz und Linenberger (2012) daher verschiedene empirische Untersuchungen durch. Bei den Probanden der jeweiligen Studien handelte es sich allerdings nicht um Schüler*innen, sondern um Biochemiestudierende, die bereits über substanzielles Vorwissen über chemische und biologische Themen verfügten und die jeweiligen Inhalte auf einem Niveau ergründeten, das zum Teil weit über dem der gymnasialen Oberstufen lag.

Die Autorinnen nutzten in ihren Untersuchungen Interviews und einen Multiple-Choice-Test mit besonderem Fokus auf die Interaktion zwischen Substrat- und

¹¹⁸ Forschungsarbeiten, in denen „*misconceptions*“ von (Lehramts-)Studierenden zum Themenbereich Enzymatik behandelt werden, finden sich in türkischer Sprache (vgl. Kurt et al. 2013; Verweise auf die teilweise schwer zugänglichen Arbeiten finden sich insbesondere bei Özarslan & Çetin 2014).

Enzymmolekülen (*Enzyme-Substrate Interactions Concept Inventory*, kurz: *ESICI*). Sie berichten unter anderem, dass die Studierenden Schwierigkeiten hatten, hydrophobe Interaktionen sowie sterische Hinderung in ihren enzymatischen Erklärungen zu berücksichtigen. Zudem tendierten die Studierenden dazu, elektrostatische Erklärungsansätze als relevanter für das Auftreten einer chemischen Bindung anzusehen als geometrische Komplementarität (vgl. Linenberger & Bretz 2014). Obgleich diese Befunde zunächst wenig relevant für den didaktisch reduzierten Biologieunterricht erscheinen mögen, zeigen die Ergebnisse der Autorinnen, dass auch Lernende mit umfangreichen Vorwissen erhebliche Probleme haben können, sich die Interaktion von Enzym und Substrat mental auf verschiedenen Interaktionsebenen vorzustellen (vgl. Linenberger & Bretz 2012, 2014, 2015; Bretz & Linenberger 2012). Überraschend – und von direkter Relevanz für den Biologieunterricht – war zudem, dass fast 16 % der Studierenden davon ausgingen, dass das aktive Zentrum ein Teil des Substratmoleküls sei. Ein Drittel der Studierenden nahm sogar an, dass ein Inhibitor an das Substrat (und nicht an das Enzym) binde. Zudem gingen fast 21 % der Studierenden davon aus, dass ein Enzymmolekül nicht Teil des Übergangszustandes sei, sondern erst an diesen ‚Zustand‘ binden würde (vgl. Bretz & Linenberger 2012, S. 232; Linenberger & Bretz 2015, S. 221). Weitere Forschungsarbeiten fokussieren vornehmlich auf die Gestaltung von Lehrbüchern oder die Interaktion von Lernenden mit entsprechenden Texten und Abbildungen. In diese Arbeiten wird in erster Linie defizitorientiert beschrieben, inwiefern Lehrbücher in ihren Erklärungen unzureichend seien, fachwissenschaftlich inkorrekte Vereinfachungen treffen oder Fehlvorstellungen von Lernenden potenziell fördern könnten (vgl. Justi 2002; Sindhu & Sharma 1999; Yip 1998). Insbesondere wurde über Schwierigkeiten von Lernenden im Umgang mit Analogien, wie dem Schlüssel-Schloss-Prinzip, berichtet (vgl. Orgill & Bodner 2006, 2007; Bean, Searles & Cowen 1990). Die Analyse der einzelnen Forschungsarbeiten lassen sich dahingehend zusammenfassen, dass Lernende im Themenbereich Enzymatik Schwierigkeiten haben, von den in Lehrwerken grafisch veranschaulichten Sachverhalten zu abstrahieren und Konzepte miteinander zu vernetzen (siehe dazu insbesondere auch Van Mil et al. 2013). Stattdessen scheinen die Lernenden die Informationen aus Lehrwerken – ähnlich wie im Fall von Diagrammen – oberflächlich zu verarbeiten und darauf aufbauend (fachlich ungeeignete) Konzepte zu konstruieren. Auf-

bauend auf dieser Erkenntnis wird im folgenden Abschnitt eine empirische Analyse der Schulbuchliteratur vorgenommen, die von Lernenden, die an der hier durchgeführten Untersuchung teilgenommen haben, verwendet wurde.

7.3.3. Empirische Analyse der Schulbuchliteratur

7.3.3.1 Ziele der Analyse

Im Folgenden wird analysiert, inwieweit Schulbuchdiagramme und begleitende Texte aus dem Themenbereich Enzymatik sich als mögliche Quelle für Unterrichtsvorstellungen (vgl. Hammann & Asshoff 2014) erweisen können. Dabei wird insbesondere auf Schulbuchdiagramme konzentriert, die in Hinblick auf Syntax oder Inhalt dem Untersuchungsdiagramm ähneln. Die Analyse erfolgt somit vor dem Hintergrund der Frage *mit welchen möglichen Unterrichtsvorstellungen, ausgehend von im Unterricht verwendeten Schulbüchern, Lernende in die Analyse Untersuchungsdiagramms starten könnten*. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Analyse der Lernerantworten in Abschnitt 7.6 dieser Arbeit. Es sei vorweggenommen, dass verschiedene Lernerprobleme beim Diagrammverstehen, in enger Verbindung mit entsprechenden Schulbuchdiagrammen zu stehen scheinen (siehe dazu insbesondere Abschnitt 7.6.3).

7.3.3.2 Methode

Insgesamt wurden fünf Schulbücher analysiert, die von Lernenden, die an der hier durchgeführten Untersuchung teilgenommen haben, in der Einführungsphase (EF) bzw. der Klasse 11 verwendet wurden. Tabelle 18 gibt einen Überblick über die analysierten Schulbücher. Um den schulpraktischen Bezug zu betonen, werden im Folgenden die jeweiligen Lehrwerke nicht entsprechend der Autor*innen zitiert, sondern entsprechend der in Tabelle 18 dargestellten Abkürzungen *Linder*, *Grüne Reihe*, *Natura*, *Biologie heute* und *BIOskop*.

Tabelle 18. Übersicht über die analysierten Schulbücher

Titel des Schulbuchs	Druck	Autor*innen	Herausgeber*innen	abgekürzt als	analy-sierte Seiten
<i>Linder Biologie. Lehrbuch für die Oberstufe. 23. Auflage. Nordrhein-Westfalen Einführungsphase.</i>	2014	Bayrhuber, H. & Drös, R. Unter Mitarbeit von Dietmair, C.; Feldermann, D.; Hansen, T.; Harms, U.; Hauber, W.; Heilemann, J.; Müller, O.; Renke, B.; Vorwerck, K.	H. Bayrhuber; W. Hauber; U. Kull,	Linder	76-89
<i>Grüne Reihe. Materialien S II. Biologie: Stoffwechsel-physiologie.</i>	2014	Christian, A.; Mackensen-Friedrichs, I.; Wendel, C.; E. Westendorf-Bröring	s. Autor*innen	Grüne Reihe	24-31
<i>Natura. Biologie für Gymnasien: Oberstufe.</i>	2016	Beyer, I.; Bickel, H.; Gropengießer, H.; Kluge, S.; Knauer, B.; Kronberg, I.; Krull H.-P.; Lichtner H.-D.; Schneeweiß, H.; Ströhla, G.; Tischer, W.	/	Natura	46-55
<i>Biologie heute S II. Nordrhein-Westfalen: Einführungsphase.</i>	2014	Hector, U.; Walory, M.; Westendorf-Bröring, E.	M. Walory & E. Westendorf-Bröring	Biologie heute	68-77
<i>BIOskop. Einführungsphase S II. Nordrhein-Westfalen</i>	2014	Emmler, P.; Frankenberg, T.; Hausfeld, R.; Klaßen, D.; Peters, J.; Ratermann, M.; Schmalz, R.; Schulenberg, W.; Stoppel, F.; Toben, B.	R. Hausfeld & W. Schulenberg	BIOskop	68-83

7.3.3.3 Ergebnisse der Schulbuchanalyse

Die Analyse der jeweiligen Schulbücher zeigte, dass Diagramme im Themenbereich Enzymatik häufig und in sehr ähnlicher Art und Weise zur Erläuterung enzymatischer Sachverhalte verwendet werden. Insbesondere konnten Schulbuchdiagramme identifiziert werden, die dem Untersuchungsdiagramm (siehe Abbildung 42 in Abschnitt 6.2.1.1) hinsichtlich Syntax, also perzeptuell, ähneln und in allen Schulkassen, die an der Untersuchung teilgenommen haben, lediglich in geringfügiger Variation zum Einsatz gekommen sind (vgl. Grüne Reihe 2014, S. 28 - 30; Natura 2016, S. 50-53; Biologie heute 2014, S. 72; BIOskop 2014, S. 72, 79; Linder 2014, S. 80). Über die jeweiligen Diagramme und Abbildungen wird im Folgenden anhand prototypischer Darstellungen (siehe Abbildung 60 und Abbildung 62), die den Schulbuchdarstellungen in Hinblick auf die relevanten Charakteristika und Merkmale entsprechen, berichtet.

Eine hohe perzeptuelle Ähnlichkeit zum Untersuchungsdiagramm besitzen vor allem Schulbuchdiagramme, die den Zusammenhang zwischen der *Reaktionsgeschwindigkeit* (v) einer enzymatischen Reaktion und der eingesetzten *Substratkonzentration* veranschaulichen. Abbildung 60 zeigt ein solches Diagramm, das als prototypischer Vertreter für die analysierten Schulbuchdiagramme betrachtet werden kann.

Eines dieser für das Diagrammverstehen problematischen Merkmale ist beispielsweise, dass in allen analysierten Lehrwerken der Zusammenhang zwischen Reaktionsgeschwindigkeit und Substratkonzentration unter Verwendung durchgezogener Linien (siehe Graphen in Abbildung 60) veranschaulicht wird. Bei Lernenden kann so leicht der Eindruck entstehen, dass es sich um einen einzelnen Versuch handelt, in dem die Substratkonzentration im Zeitverlauf sukzessive erhöht wird. Aufgetragen sind allerdings Datenwerte aus einer Vielzahl von Versuchen mit unterschiedlichen Substratkonzentrationen, bei denen jeweils die Anfangsgeschwindigkeit der enzymatischen Reaktion ermittelt wird (vgl. Dettmer 2005; Moyes & Schulte 2008). Die Gefahr einer etwaigen Missinterpretation scheint verschiedenen Fachbuchautor*innen bewusst zu sein. Sie weisen daher explizit darauf hin, dass die X-Achse *keine Zeitachse* darstellt, und vermitteln, um das Verstehen der referierten Inhalte zu erleichtern, zusätzlich Wissen über den experimentellen Sachverhalt (vgl. Dettmer 2005; Moyes & Schulte 2008). So formuliert beispielsweise Dettmer (2005): „Es ist wichtig, sich klar zu machen, was dieses Diagramm darstellt: Jeder Punkt des Graphen steht für eine Reaktionsgeschwindigkeit bei einer ganz bestimmten Substratkonzentration“ (ebd.,

S. 16). Bereits bei angemessener grafischer Darstellung, z. B. durch Verwendung einzelner Datenpunkte statt einer durchgezogenen Linie, werden an Diagrammleser*innen immer noch hohe kognitive Anforderung gestellt, um das Diagramm bzw. die referierten Inhalte mental zu rekonstruieren und das Diagramm korrekt und umfassend zu verstehen. Diagrammleser*innen müssen sich dazu eine Vielzahl einzelner Versuchsansätze mit unterschiedlichen Substratkonzentrationen auf Teilchenebene vorstellen. Insbesondere vor dem Hintergrund der Ausführungen in dieser Arbeit zu den kognitiven Anforderungen, die an das Diagrammverstehen mittels analytischer Problemlösestrategien gestellt werden (siehe dazu Abschnitt 4.3.2.3), ist zu erwarten, dass die Konstruktion eines derart komplexen Situationsraums nicht allen Lernenden möglich ist. Vor dem Hintergrund dieser Ausführungen erscheint es wahrscheinlicher, dass zahlreiche Lernende statt der fachlich korrekten Vorstellung einer Vielzahl von Versuchsansätzen unterschiedlicher Substratkonzentrationen (unter Anwendung intuitiver Lösungsstrategien) die fachlich inkorrekte (Fehl-)Vorstellung eines *einzelnen Versuches* konstruieren, in dem die Substratkonzentration im Verlauf der Zeit kontinuierlich erhöht wird.

Reaktionsgeschwindigkeit [v]

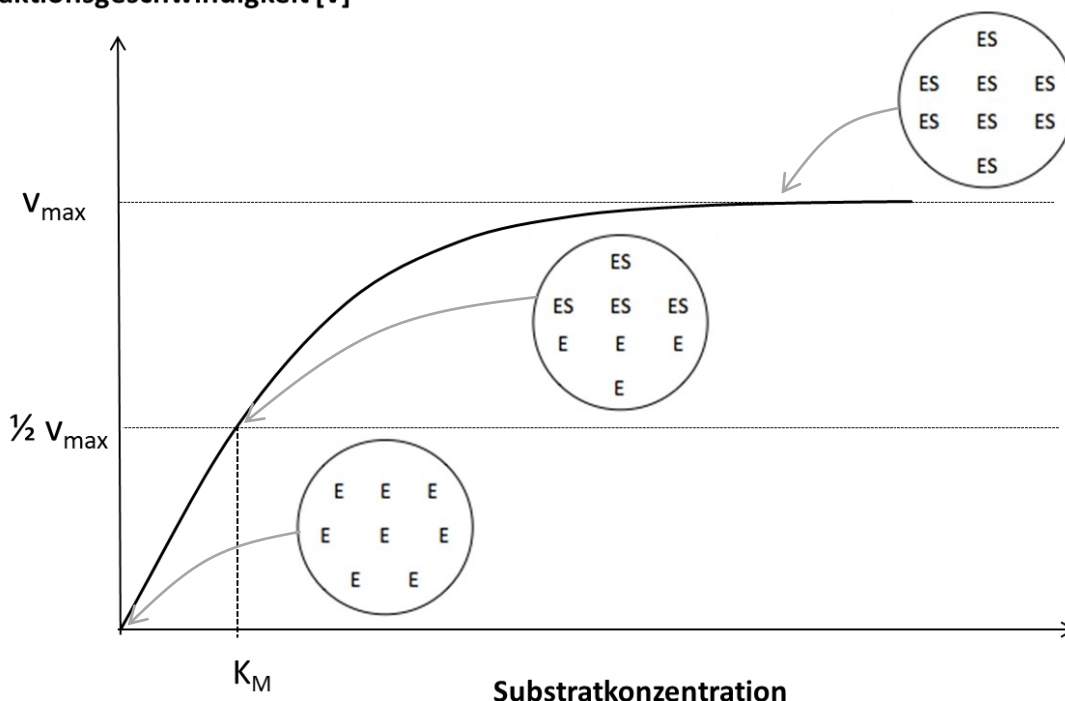


Abbildung 60. Exemplarische Rekonstruktion eines Schulbuchdiagramms aus dem Themenbereich Enzymatik, das den Zusammenhang zwischen der Reaktionsgeschwindigkeit einer enzymatischen Reaktion und der Substratkonzentration veranschaulicht (modifiziert durch den Verfasser nach Grüne Reihe 2014, S. 28).

Empirische Hinweise dafür, dass Lernende tatsächlich zu der Konstruktion einer solchen (Fehl-)Vorstellung neigen, wurden bereits in dieser Arbeit bereits am Beispiel der Untersuchungen von Keller (2008, siehe Abschnitt 4.2.3.1.2) und Janvier (1998, siehe Abschnitt 4.3.1.3) diskutiert. Ihre Untersuchungen zeigen, dass Lernende Experimente bzw. Versuche, bei denen Ergebnisse einzelner Ansätze mittels Punkt- oder Liniendiagrammen dargestellt werden, mental zu einem einzigen langgezogenen Versuchsansatz im zeitlichen Verlauf zusammenfassen (vgl. Janvier 1998, Keller 2008). Janvier (1998) spricht in Zusammenhang mit derartigen Darstellungsweisen auch von einer erkenntnistheoretischen Hürde („epistemological obstacle“, ebd. S. 79).

In Hinblick auf die in diesem Zusammenhang in den jeweiligen Schulbüchern verwendeten Diagramme (siehe Abbildung 60 als prototypischen Vertreter) könnte das bedeuten, dass die Lernenden bei der mentalen (Re-)Konstruktion der Diagramminhalte nicht die Variable *Substratkonzentration* auf die X-Achse mappen, sondern stattdessen – fachlich inkorrekt – die Variable *Zeit*. Eine derart fehlkonstruierte (Unterrichts-)Vorstellung mit der Variablen Reaktionsgeschwindigkeit auf der Y-Achse und der Variablen *Zeit* auf der X-Achse könnte wie in Abbildung 61 aussehen und würde dem in dieser Untersuchung verwendeten Untersuchungsdiagramm (siehe Abbildung 42 auf Seite 172), in dem die Produktkonzentration gegen *Zeit* aufgetragen ist, perzeptuell stark ähneln.

Es ist erscheint daher zumindest möglich, dass in der hier durchgeführten Untersuchung Erklärungen einzelner Lernender, durch eine entsprechende, aus dem Unterricht transportierte (Fehl-)Vorstellung (siehe Abbildung 61), konfundiert werden.

Die Analyse der Schulbuchliteratur zeigte zudem, dass auch die kontinuierlichen Texte der mentalen Konstruktion der soeben beschriebenen Unterrichts- bzw. Fehlvorstellung eines einzelnen langgezogenen Versuches, in dem die Substratkonzentration kontinuierlich im Verlauf der *Zeit* erhöht wird, nicht direkt widersprechen und diese ggf. sogar fördern könnten. In den Schulbüchern finden sich Formulierungen wie „[m]it steigender Substratkonzentration“ (Biologie Heute, S. 72) oder „[a]b einer bestimmten Substratkonzentration“ (ebd., S. 72). Derartige Formulierungen sind zwar fachlich nicht falsch, stehen aber auch nicht in Konflikt zu der beschriebenen Fehlvorstellung eines zeitlichen Verlaufes. Formulierungen wie „[d]urch eine weitere Erhöhung“ (ebd., S. 72) unterstützen die Konstruktion einer Vorstellung, in der die Substratkonzentration im zeitlichen Verlauf sukzessive erhöht wird, möglicherweise sogar direkt.

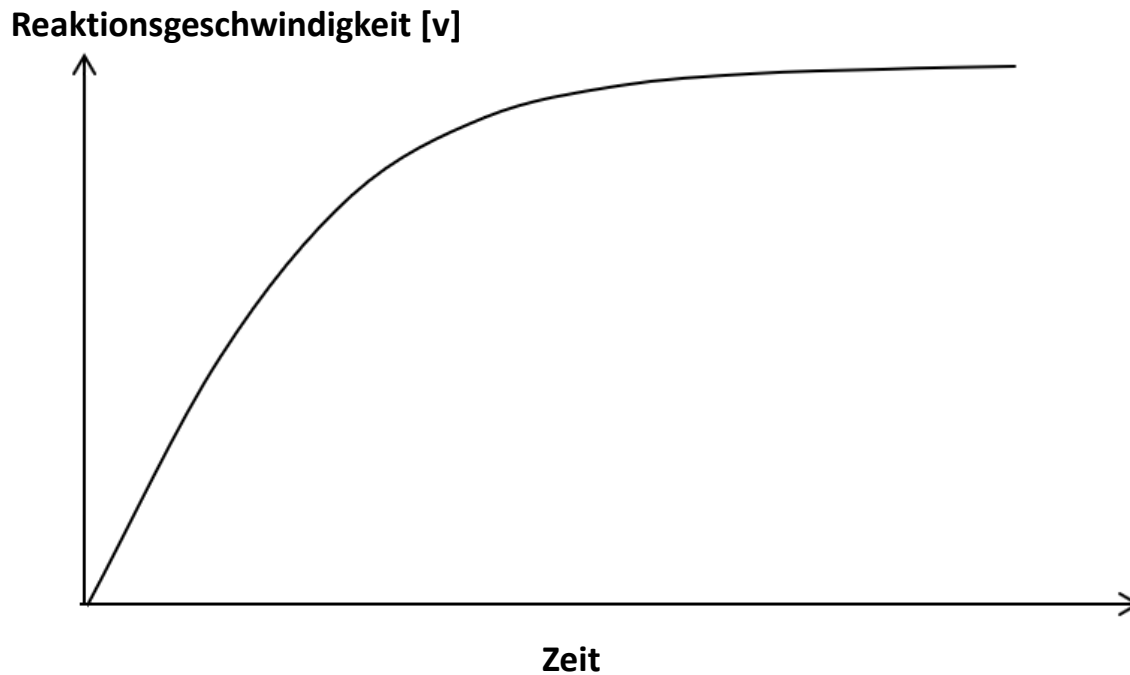


Abbildung 61. Potenzielle (Fehl-)Vorstellung über den Zusammenhang der Reaktionsgeschwindigkeit und der (Reaktions-)zeit, die von Lernenden auf Grundlage der analysierten Schulbuchtexte möglicherweise entwickelt werden könnte (eigene Darstellung).

Ferner zeigte die Schulbuchanalyse, dass in den jeweiligen kontinuierlichen Texten, die zumeist in direkten Zusammenhang mit dem in Abbildung 60 dargestellten Diagramm stehen, häufig über die Ausbildung von Enzym-Substrat-Komplexen (ES) berichtet wird. Allerdings wird dabei zumeist nicht (noch einmal) explizit erläutert, dass der Enzym-Substrat-Komplex (ES) nur ein vorübergehender Zustand ist. Es finden sich Sätze, durch die der Eindruck entstehen könnte, dass der Enzym-Substrat-Komplex ein längerfristiger Zustand oder ein fester bzw. schwerlöslicher Komplex sei. Es wird beispielsweise formuliert: „Bei geringer Substratkonzentration liegen zunächst nur wenige Enzym-Substrat-Komplexe vor“ (Biologie Heute 2014, S. 72, siehe fettgedruckte Formulierungen unten), „Es entstehen mehr Enzym-Substrat-Komplexe, die Reaktionsgeschwindigkeit ist höher“ (ebd.); „Ab einer bestimmten Substratkonzentration liegen alle Enzym-Moleküle als Enzym-Substrat-Komplexe vor, die maximale Reaktionsgeschwindigkeit v_{max} ist erreicht (ebd.)“; „Bei einer bestimmten Substratkonzentration sind alle Enzymmoleküle an der Substratumsetzung beteiligt“ (Linder 2014, S. 81). Ein Hinweis darauf, dass die Enzymmoleküle nach der Katalyse direkt wieder für weitere Reaktionen zur Verfügung stehen, fehlt entweder auf den jeweiligen Seiten oder findet sich erst am Ende der entsprechenden Textabschnitte.

Vor welche Herausforderungen die Lernenden dadurch gestellt werden, sei anhand eines kurzen Textabschnitts aus einem der analysierten Schulbücher (Biologie Heute 2014, siehe unten) verdeutlicht. Die zuvor bereits zitierten Sätze wurden in dem Textabschnitt hervorgehoben, um ihre Einbettung in den Kontext zu verdeutlichen. Auf der gesamten Seite, aus der dieser Textabschnitt entnommen wurde, wird nicht explizit klargestellt, dass es sich beim Enzym-Substrat-Komplex nur um einen Übergangszustand handelt. Mögliche Hinweise darauf, lassen sich auch bei bewusster Suche nach entsprechenden Informationen nur durch sehr intensives und konzentriertes Lesen schlussfolgern. Zudem wird die Konstruktion einer fachlich korrekten Vorstellung dadurch erschwert, dass erst gegen Ende des Textabschnitts ein Verweis auf die Umsetzung des Substratmoleküls erfolgt (vgl. Biologie Heute 2014, siehe unten, Zeile 9). Bis dahin haben die Lernenden möglicherweise bereits die fachlich inkorrekte, aber kognitiv leichter zu verarbeitende und daher für die Lernenden durchaus attraktive Vorstellung der festen Verbindung von Enzym- und Substratmolekülen zu schwerlöslichen Enzym-Substrat-Komplexen konstruiert.

1 „Auf Teilchenebene kann man diese Beobachtung folgendermaßen erklären: Bei
2 **geringer Substratkonzentration liegen zunächst nur wenige Enzym-Substrat-**
3 **Komplexe vor.** Die Reaktionsgeschwindigkeit ist entsprechend niedrig. Mit stei-
4 gender Substratkonzentration nimmt auch die Wahrscheinlichkeit für das Zusam-
5 mentreffen von Enzym- und Substrat-Molekülen zu. **Es entstehen mehr Enzym-**
6 **Substrat-Komplexe, die Reaktionsgeschwindigkeit ist höher. Ab einer be-**
7 **stimmten Substratkonzentration liegen alle Enzym-Moleküle als Enzym-**
8 **Substrat-Komplexe vor, die maximale Reaktionsgeschwindigkeit v_{max} ist er-**
9 **reicht.** Durch eine weitere Erhöhung der Substratkonzentration lässt sich die Re-
10 aktionsgeschwindigkeit nicht mehr steigern, da Enzyme stets die gleiche Zeit be-
11 nötigen, um das Substrat zu binden und **umzusetzen**. Eine Steigerung der Reakti-
12 onsgeschwindigkeit ist dann nur durch eine Erhöhung der Enzymkonzentration
13 möglich“

(Biologie Heute 2014, S. 72; Hervorhebungen wurde nachträglich durch den Ver-
fasser vorgenommen).

Es sei zudem darauf hingewiesen, dass Lernende abgrenzungsfähiges Wissen (vgl. Oser, Hascher & Spychiger 1999; Ehmer 2008) benötigen, um diesen und vergleichbare Textabschnitte verstehen zu können. Didaktisch verkürzte Beschreibungen zur *Enzymsättigung* (vgl. Linder 2014, S. 80; siehe unten, Zeile 2),

wie zum Beispiel die Aussage, dass der konstante Abschnitt des Graphen in zu Abbildung 60 vergleichbaren Diagrammen einem Zustand entspricht, in dem „alle Enzymmoleküle Substrate in ihrem aktiven Zentrum gebunden haben“ (Linder 2014, S. 80), unterscheiden sich beispielsweise von fachlich inkorrekten Aussagen lediglich durch das Adjektiv *fest*. Den entscheidenden Unterschied in diesen beiden Aussagen, nämlich, dass diese Verbindung nicht fest ist, sondern nur *vorübergehend*, müssen die Lernenden häufig eigenständig konstruieren. Wurde die Vorstellung einer festen Verbindung von Enzym- und Substratmolekül aber einmal in den Köpfen der Lernenden konstruiert, steht sie meist nicht in Konflikt zu nachfolgenden Erläuterungen und insbesondere auch nicht zu den jeweils abgedruckten Diagrammen.

1 „Wenn **alle Enzymmoleküle Substrate in ihrem aktiven Zentrum gebunden**
2 **haben**, also eine Enzymsättigung eingetreten ist, zeigt die weitere Erhöhung der
3 Substratkonzentration keine Wirkung mehr, und die Reaktionsgeschwindigkeit
4 kann nicht weiter erhöht werden. Den höchsten erreichbaren Aktivitätswert be-
5 zeichnet man als maximale Reaktionsgeschwindigkeit v_{max} . Trägt man die Ge-
6 schwindigkeitswerte gegen unterschiedliche Substrat-Ausgangskonzentrationen
7 auf, erhält man eine Sättigungskurve (Abb. 80.2)“
(Linder 2014, S. 80; Hervorhebungen wurde nachträglich durch den Verfasser vor-
genommen).

Problematisch ist insbesondere, dass die fachlich inkorrekte Vorstellung einer längerfristigen oder festen Verbindung von Enzym- und Substratmolekülen sich nicht nur mit den jeweiligen Diagrammen in Übereinstimmung bringen lässt, sondern darüber hinaus auch mit anderen diskontinuierlichen Texten.

In nahezu jedem analysierten Lehrwerk (vgl. Natura 2016, S. 50; Linder 2014, S. 80; Grüne Reihe 2014, S. 28; BIOskop 2014, S. 72; Biologie Heute 2014, S. 72) werden in begleitenden Abbildungen Zustände geringer, mittlerer und hoher Substratkonzentration dargestellt, in denen Substratmoleküle, sukzessive und nicht zufällig-dynamisch, an die noch freien Enzymmoleküle binden. Enzymmoleküle, die bereits mit einem Substratmolekül zu einem Enzym-Substrat-Komplex verbunden sind, bleiben es in solchen Darstellungen auch. Eine prototypische Darstellung dieser Zusammenhänge zeigt Abbildung 62 auf der nachfolgenden Seite (siehe dazu auch Abbildung 60).

Die fachlich inkorrekte Vorstellung einer festen Verbindung von Enzym- und Substratmolekülen könnte zusätzlich dadurch verstärkt werden, dass sich in den

jeweiligen Abbildungen keine Hinweise auf die eigentlichen Produkte der enzymatischen Reaktion finden. Grafisch dargestellt werden in diesen Abbildungen ausschließlich Enzym- (E) und Substratmoleküle (S) sowie Enzym-Substrat-Komplexe (ES); *Produktmoleküle* werden nicht dargestellt. In den Fließtexten wird allerdings trotzdem explizit auf entsprechende Produkte bzw. Produktmoleküle verwiesen. So findet sich beispielsweise in direkter Relation zu einer der zuvor erwähnten Abbildungen die Formulierung „Um die Geschwindigkeit einer enzymkatalysierten Reaktion zu ermitteln, kann man die Menge an Produkt, die pro Zeiteinheit gebildet wird, bestimmen“ (vgl. Biologie heute 2014, S. 72). Vor dem Hintergrund dieser Ausführungen scheint es zumindest möglich, dass Lernende mit der Vorstellung in die Analyse des Untersuchungsdiagramms starten, dass Enzym-Substrat-Komplexe (ES) Produktmoleküle enzymatischer Reaktionen darstellen.

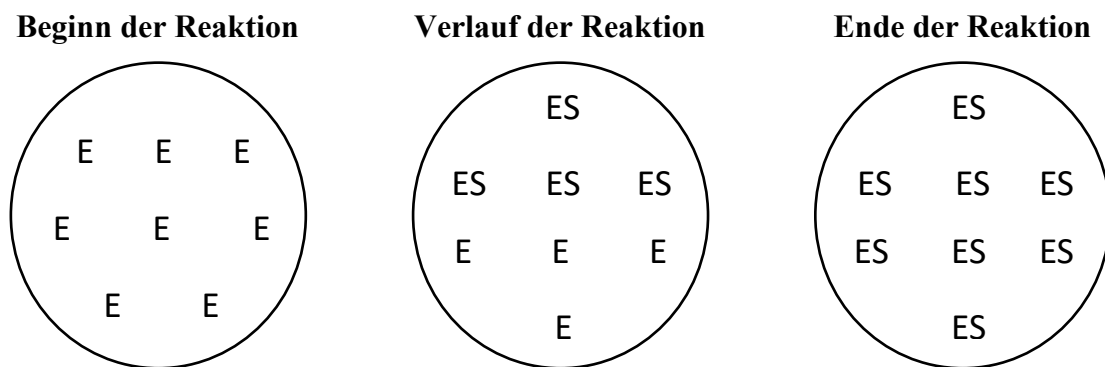


Abbildung 62. Exemplarische Rekonstruktion von Schulbuchdarstellungen, die enzymatische Reaktionen auf Teilchenebene im zeitlichen Verlauf veranschaulichen (modifiziert durch den Verfasser nach Grüne Reihe 2014, S. 28)

Positiv ist hervorzuheben, dass die jeweiligen Lehrwerks-Autor*innen versuchen, Lernenden die dynamisch-probabilistischen Zusammenhänge enzymatischer Reaktionen nahezubringen – obgleich dies ohne Verwendung von Computersimulationen nicht einfach ist (siehe Abschnitt 7.3.2). Sie formulieren zum Beispiel „Mit steigender Substratkonzentration nimmt auch die Wahrscheinlichkeit für das Zusammentreffen von Enzym- und Substrat-Molekülen zu“ (Biologie Heute 2014, S. 72) oder „Dies lässt sich anschaulich damit erklären, dass bei höherer Substratkonzentration jedes Enzymmolekül statistisch von einer größeren Menge an Substratmolekülen umgeben ist und daher die Wahrscheinlichkeit für die Umsetzung steigt“ (Linder 2014, S. 80). Entsprechende Ausführungen sind allerdings überaus komplex und alles andere als „anschaulich“ (ebd.).

Um die referierte Situation mental zu konstruieren, müssen die Lernenden die Interaktion der Teilchen im zeitlichen Verlauf simulieren und in Wahrscheinlichkeiten denken. Gerade das Denken in Wahrscheinlichkeiten fällt Lernenden aber häufig schwer (vgl. Buiatti & Longo 2013; Garvin-Doxas & Klymkowsky 2008; Fiedler, Tröbst & Harms 2017; Fiedler 2018; Hammann & Asshoff 2014; Meir et al. 2005).

Es lässt sich daher zusammenfassen, dass es vor dem Hintergrund der von den Lernenden dieser Untersuchung verwendeten Schulbuchtexte zumindest möglich, ggf. sogar wahrscheinlich, erscheint, dass einzelne Lernende mit fachlich inkorrekten Vorstellungen (Unterrichtsvorstellungen, vgl. Hammann & Asshoff 2014) in die Analyse des Untersuchungsdiagramms starten.

Solche Lernende könnten sich beispielsweise vorstellen, dass zur Untersuchung der Reaktionsgeschwindigkeit enzymatischer Reaktionen die Substratkonzentration im Verlauf der Zeit innerhalb eines einzelnen Versuchsansatzes kontinuierlich erhöht wird (siehe Sättigungskurven in Abbildung 60 und Abbildung 61) und/oder dass bei enzymatischen Reaktionen (insbesondere im Fall von Sättigungskurven) freie Enzymmoleküle sukzessive von Substratmolekülen besetzt werden und mit diesen zu festen Enzym-Substrat-Komplexen reagieren, die dann das ‚Produkt‘ enzymatischer Reaktionen darstellen.

7.4. Forschungsmethodik zur Beantwortung von Forschungsfrage 4

Als Grundlage zur Operationalisierung des latenten Konstruktes Diagrammverstehens fungieren die bereits zur empirischen Beantwortung von Forschungsfrage 3 (siehe Kapitel 0) verwendeten Lernerantworten. Die Operationalisierung erfolgt durch kontextspezifische Kodierung. Die Lernerantworten werden dabei in einem mehrschrittigen, iterativen Prozess durch deduktiv-induktive Kategorienbildung in Verstehensniveaus unterschieden (vgl. Hammann & Jördens 2014; Mayring 2003; Mayring & Fenzl 2014).

Das Kategoriensystem wurde zunächst deduktiv auf Grundlage der vorausgegangenen Ausführungen entwickelt (siehe dazu deduktive Kategorienbildung in Abschnitt 7.5) und anschließend induktiv mithilfe der Lernerantworten spezifiziert (siehe Abschnitt 7.6). Die induktive Spezifizierung wird exemplarisch anhand ausgewählter Lernerantworten beschrieben. Die Antworttexte der Lernenden werden dabei – soweit möglich – unverändert wiedergegeben. Redigiert (vgl.

Krüger & Riemeier 2014) wurde bewusst nur dann, wenn dies für das Verständnis der jeweiligen Antworten unbedingt erforderlich war. Die damit verbundene umfangreiche Form der Darstellung erwies sich insbesondere deshalb als notwendig, da in der vorausgegangenen Literaturstudie eine erhebliche Forschungslücke hinsichtlich der Analyse von Verstehensprozessen im Kontext komplexer quantitativer Diagramme identifiziert wurde. Eine substanziierte Synthese der Erkenntnisse erforderte daher zunächst die ausführliche Darstellung der Lern- und Verstehensprozesse.

Ergebnis dieser überaus aufwendigen deduktiv-induktiven Kategorienbildung ist ein ordinal geordnetes Kategoriensystem bestehend aus insgesamt sechs Verstehensniveaus (siehe Tabelle 19 in Abschnitt 7.7), das in dieser Arbeit – vor dem Hintergrund von Forschungsfrage 5 – zur erweiterten Evaluation der Wirksamkeit der instruktionalen Maßnahmen in Hinblick auf das Diagrammverstehen verwendet wird (siehe Kapitel 8).

7.5. Theoretische Entwicklung des Kategoriensystems

Im Folgenden werden aufbauend auf den vorausgegangenen Erkenntnissen dieser Arbeit zunächst deduktiv vorläufige Kategorien gebildet, um das Verstehen des Untersuchungsdiagramms theoriegeleitet zu strukturieren. Es sei vorweggenommen, dass die aus der Theorie deduzierten Kategorien sich alle in den Lernerantworten wiederfinden. Bei der Analyse der Lernerantworten (siehe nachfolgende Abschnitte) zeigte sich allerdings darüber hinaus, dass sich einzelnen Kategorien noch in Subkategorien unterscheiden lassen.

Die aus der Theorie deduzierten Kategorien sind grafisch in Abbildung 63 dargestellt. Auf der rechten Seite sind jeweils die Fähigkeiten bzw. Kompetenzen abgebildet, über die Lernende verfügen müssen, um das ihnen unbekanntes Diagramm umfassender und tiefer analysieren und verstehen zu können. Auf der linken Seite sind jeweils Antwortkategorien abgebildet, von denen angenommen wird, dass Lernende diese verschriftlichen, wenn sie nicht über die notwendigen Kompetenzen verfügen, um das Diagramm umfassender bzw. tiefergehend analysieren zu können.

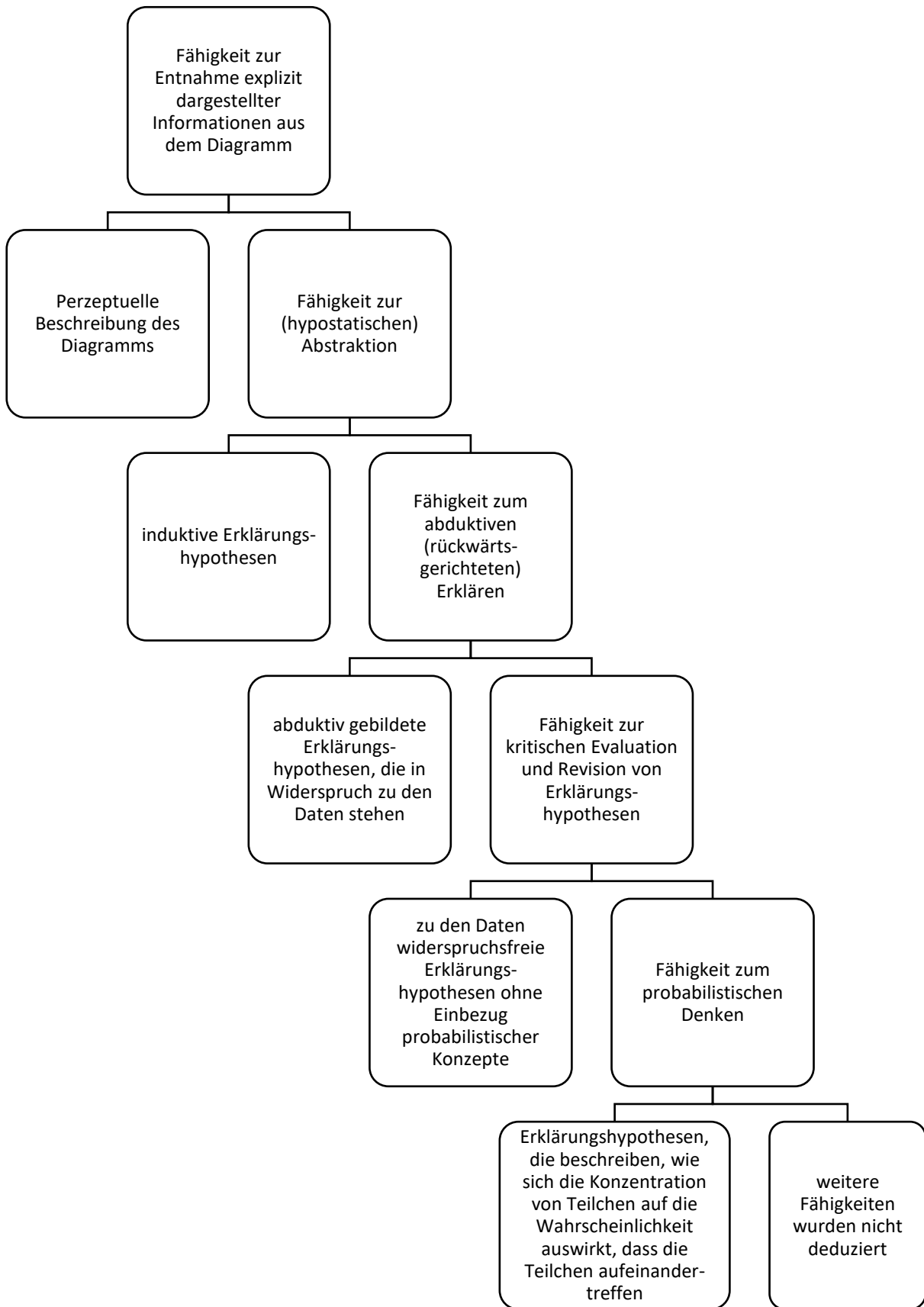


Abbildung 63. Deduktiv gebildete Kategorien des Diagrammverstehens (eigene Darstellung)

Aufbauend auf den in Rahmen von Forschungsfrage 1 (siehe Kapitel 4) gewonnenen theoretischen Erkenntnissen lassen sich zunächst zwei grundlegende Fähigkeiten voneinander unterscheiden (siehe Abbildung 63): die Fähigkeit zur Entnahme explizit dargestellter Informationen aus dem Diagramm und die Fähigkeit zum inhaltlichen Interpretieren des Diagramms. Anhand der Untersuchung von Preece und Janvier (1992, 1993) wurde beispielsweise in Abschnitt 4.4.2.2.2 erläutert, dass Lernende immer dann eine *perzeptuelle Beschreibung* eines Diagramms anfertigen, wenn es ihnen nicht möglich ist, in einem interpretativen Prozess von der grafischen Darstellung zu abstrahieren und sich die in dem Diagramm referierte Situation inhaltlich vorzustellen.

Lernende, die ein Diagramm ausschließlich perzeptuell beschreiben, verbleiben während ihrer gesamten Analyse vollständig im Graphenraum. Im Graphenraum ist es den Lernenden zwar möglich, dem Diagramm explizit dargestellte Informationen zu entnehmen, allerdings können sie dort keine Erklärungen für den Graphenverlauf entwickeln. Um inhaltliche Erklärungshypothesen für den Verlauf der Graphen entwickeln zu können, ist ein interpretativer Wechsel in den Situationsraum notwendig.

Lernende, denen es gelingt, von der grafischen Darstellung zu abstrahieren (siehe insbesondere Abschnitt 4.4.1.2) und interpretativ in den Situationsraum zu wechseln, können dort inhaltliche Schlussfolgerungen über die Diagramminhalte entwickeln. Zwei Arten von Schlussfolgerungen können hier unterschieden werden: induktives und abduktives Schlussfolgern. In Abschnitt 7.2.3 wurde bereits erläutert, dass beide Schlussfolgerungsarten zum Erklären verwendet werden können. Induktive Erklärungen sind argumentative Verallgemeinerungen von beobachteten, korrelativen Zusammenhängen; abduktive Erklärungen sind (mehr oder weniger kreative) Beschreibungen möglicher Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge auf der Grundlage des Vorwissens (zu verschiedenen Arten der Abduktion siehe Abschnitt 7.2.2).¹¹⁹

Nur Lernende, denen es unter Verwendung ihres Vorwissens auf Grundlage des Diagramms gelingt, abduktiv (rückwärtsgerichtet) Erklärungshypothesen für die

¹¹⁹ Deduktive Erklärungen werden hier nicht als eine eigene Kategorie (von Erklärungen) betrachtet (siehe dazu Ausführungen in Abschnitt 7.2.3). Vor dem Hintergrund der theoretischen Ausführungen zu den Schlussformen Abduktion, Deduktion und Induktion in dieser Arbeit würde eine deduktive Erklärung der Entwicklung von Erklärungshypothesen entsprechen, die zwar vom Vorwissen der das Diagramm lesenden Personen ausgehen, aber losgelöst vom Kontext, dem konkreten Diagramm, erfolgen.

Graphenverläufe zu entwickeln, können das Diagramm bzw. die referierten Inhalte erklärend elaborieren und das Diagramm dadurch tiefergehend analysieren. Lernende, die nicht dazu fähig sind, können maximal (vorwärtsgerichtet) *induktive Erklärungshypothesen* – im Sinne einer Generalisierung der dargestellten Zusammenhänge – aus dem Diagramm ableiten.

Das in Abschnitt 7.2.4 beschriebene Select-&-Test-Modell nach Ramoni et al. (1992) bietet einen geeigneten Ansatz, um das abduktive Generieren von Erklärungshypothesen differenziert zu analysieren. Aufbauend auf dem Modell kann zwischen abduktiv gebildeten Erklärungshypothesen unterschieden werden, die a) im Widerspruch zu den Daten stehen und b) sich widerspruchsfrei mit den Daten in Übereinstimmung bringen lassen. Widersprüche können von Lernenden aber nur dann aufgelöst werden, wenn sie über die Kompetenz verfügen, ihre abduzierten Erklärungshypothesen kritisch vor dem Hintergrund der grafisch gegebenen Evidenzen zu evaluieren und ungeeignete Erklärungshypothesen zu revidieren. Es ist anzunehmen, dass Lernende, die lediglich über die Fähigkeit verfügen, abduktiv Erklärungshypothesen zu entwickeln, diese aber nicht anhand der Daten prüfen oder revidieren können, *Erklärungshypothesen formulieren, die in Widerspruch zu den Daten stehen*.

Auch *zu den Daten widerspruchsfreie Erklärungshypothesen* können sich in ihrer (fachlichen) Qualität unterscheiden. Im Folgenden wird angenommen, dass die Erklärungen von Lernenden anspruchsvoller sind, je mehr erklärungsrelevante Ebenen sie in ihren Erklärungen miteinander vernetzen (vgl. Hammann 2019; Hammann & Asshoff 2014; Jördens et al. 2018; Knippels & Waarlo 2018; siehe Abschnitt 3.7.2).

In dem hier verwendeten enzymatischen Kontext, aus dem das Untersuchungsdiagramm stammt, sind in dieser Hinsicht Erklärungen voneinander zu unterscheiden, in denen auf Teilchenebene ohne Einbezug probabilistischer Konzepte erklärt wird und Erklärungen, in die unter Verknüpfung von Makro- und Mikroebene probabilistische Konzepte eingebunden werden. Die zuletzt genannten Erklärungen könnten insbesondere Ausführungen darüber beinhalten, wie sich die *Konzentration von Teilchen auf die Wahrscheinlichkeit auswirkt, dass die Teilchen aufeinandertreffen*. Entsprechende Erklärungen werden als besonders anspruchsvolle Erklärungen betrachtet und scheinen nur Lernenden möglich zu sein, die zum (abstrakten) probabilistischen Denken fähig sind.

Den nachfolgenden Ausführungen sei vorweggenommen, dass durch Spezifizierung der hier zunächst deduktiv gebildeten Kategorien anhand der Lernerantworten (siehe nachfolgende Abschnitte) insbesondere erkannt wurde, dass die induktiv gebildeten Erklärungshypothesen weiter in fachlich korrekte und fachlich inkorrekte Erklärungshypothesen differenziert werden können. Zudem lieferten Erklärungen von Lernenden, die probabilistisch argumentieren, Hinweise auf ein eingeschränktes und auf ein umfassendes Denken in Wahrscheinlichkeiten.

7.6. Spezifizierung der Kategorien anhand von Lernerantworten

Vor dem Hintergrund der zuvor beschriebenen, deduktiv gebildeten Kategorien (siehe Abbildung 63) wurden die Lernertexte in mehrere Zyklen (re-)kodiert. Das deduktiv gebildete Kategoriensystem wurde auf die Lernantworten angewandt und induktiv zu insgesamt sechs empirisch fundierten, konkreten Verstehensniveaus spezifiziert: *perzeptuelles Analysieren* (Niveau 1), *induktives Erklären* (Niveau 2), *abduktives Erklären* (Niveau 3), *abduktives Erklären unter kritischer Evaluation von Schlussfolgerungen* (Niveau 4), *eingeschränktes Denken in Wahrscheinlichkeiten* (Niveau 5) und *umfassendes Denken in Wahrscheinlichkeiten* (Niveau 6).

Die sechs Niveaus werden im Folgenden vorgestellt. Dazu werden einzelne Lernerantworten beispielhaft analysiert. Es wird jeweils angegeben, aus welcher Untersuchungsgruppe die jeweiligen Lernenden stammen und ob sie in Hinblick auf ihre Schlussfolgerungsfähigkeiten (siehe Abschnitt 7.3.1) als Expert*innen, Abstrahierer*innen, Konkretisierer*innen oder Noviz*innen zu betrachten sind.

7.6.1. Niveau 1: Perzeptuelles Analysieren

Im Rahmen der Analyse der Lernerantworten konnten Lernende identifiziert werden, die das Diagramm wie ein Bild beschreiben, anstatt es inhaltlich zu interpretieren (siehe dazu insbesondere Ausführungen von Preece und Janvier 1992, 1993 in Abschnitt 4.4.2.2.2). Solche Lernende verbleiben vollständig im Graphenraum. Ihnen gelingt es zwar dem Diagramm explizit dargestellte Informationen zu entnehmen, allerdings sind sie nicht dazu fähig, von der grafischen Darstellungen zu abstrahieren und einen Situationsraum zu konstruieren. Im Folgenden wird dies anhand einzelner Lernerantworten veranschaulicht. Am Ende

dieses Abschnittes werden die dadurch gewonnenen Erkenntnisse zu Verstehensniveau 1, *perzeptuelles Analysieren des Diagramms*, synthetisiert.

7.6.1.1 Analyse der Lernerantworten

Das Vorgehen von Lernenden, die Niveau 1 zugeordnet werden, sei beispielhaft anhand der ‚Erklärung‘ des Lernenden BITA23 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Novize, siehe vollständige Erklärung auf nächsten Seite) erläutert. Es sei vorweggenommen, dass seine ‚Erklärung‘ eher einer abstrakten bildlichen Beschreibung des Diagramms als der in der Aufgabenstellung geforderten Erklärung auf Teilchenebene entspricht. BITA23 ist dabei durchaus bewusst, dass er eine kausale, inhaltliche Erklärung für die Verläufe der Graphen des Diagramms liefern soll. Er leitet in seine Ausführungen daher mit der Formulierung ein „Weil bei Versuch A [...]“ (Zeile 1; siehe dazu auch Zeile 3). Es gelingt ihm aber nicht, aufbauend auf dem Diagramm einen Situationsraum zu konstruieren. Er kann sich die in dem Diagramm referierte enzymatische Reaktion nicht auf Teilchenebene vorstellen. BITA23 verbleibt daher – bedingt durch die vom ihm gewählte oberflächliche Problemlösestrategie (siehe Abschnitt 4.3.2.3) – vollständig im Graphenraum und beschreibt den Graphenverlauf perzeptuell. So spricht er beispielsweise davon, dass sich die Graphen „schneiden“ bzw. in dem gleichen Punkt „treffen“ (Zeile 2, siehe dazu auch Zeile 4: „trifft es sich nicht“). BITA23 verbindet dadurch, fachlich inkorrekt, die Versuche im Graphenraum, obwohl diese im Situationsraum unabhängig voneinander stattfinden (Zeilen 1 – 2).

Darstellung der vollständigen Erklärung von BITA23 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Novize):

- 1 Weil bei Versuch A die Substratkonzentration bei 6 und beim Versuch EK0,5 bei
- 2 6 liegt, schneiden sich bzw. treffen sich die Graphen am Ende und kommen zum
- 3 gleichen Punkt.
- 4 Darüber hinaus ist es aber beim Versuch SK0,5 nicht so, weil sie eine Substrat-
- 5 konzentration von 3 hat, trifft es sich nicht am letzten Punkt mit den anderen Ver-
- 6 suchen.
- 7 Zugleich kann man sagen, dass der Versuch bei A und beim Versuch SK0,5 die
- 8 gleichen Enzymkonzentrationen haben (6), aber der Versuch EK0,5 nur ein Wert
- 9 von 3.

(vollständige Erklärung von BITA23)

Es könnte vermutet werden, dass Lernende wie BITA23 den Arbeitsauftrag missverstanden haben oder versuchen, mithilfe ihrer (perzeptuellen) Beschreibung eine möglicherweise nachfolgende Erklärung vorzubereiten. Beides erscheint vor dem Hintergrund der empirischen Evidenzen jedoch unwahrscheinlich. So konnten bei den Lernenden, die Niveau 1 zugeordnet wurden, an keiner Stelle der Untersuchungs- bzw. Lernmaterialien kausale Erklärungen identifiziert werden. Zudem zeigten solche Lernende eine perzeptuelle Analyse auch dann, wenn sie das Diagramm zuvor – wie beispielsweise in der Kontrollgruppe K-Be-Erk gefordert – bereits ausführlich beschrieben hatten. Es konnte sogar beobachtet werden, dass einzelne Lernende im Rahmen ihrer perzeptuellen Analyse explizit auf eine von ihnen zuvor angefertigte Beschreibungen des Diagramms verweisen.

Beispielhaft sei hier der Lernende PEAC28 (Kontrollgruppe K-Be-Erk, Novize, siehe vollständige Erklärung auf der nächsten Seite) genannt. PEAC28 nimmt bereits in Zeile 3 seiner ‚Erklärung‘ auf die von ihm zuvor erstellte Beschreibung des Diagramms Bezug: „Der Graph des Versuches A verläuft so, wie in Aufgabe 1 beschrieben“ (Zeile 3). In dieser Beschreibung (hier nicht dargestellt) führt PEAC28 beispielsweise aus, dass sich einzelne Graphen „kreuzen“ und dass die drei Graphen dem Nullpunkt nacheinander „entspringen“ würden. Genau wie BITA23 scheint auch PEAC28 grundsätzlich zu erkennen, dass sich die Aufgabe das Diagramm zu erklären, von der Aufgabe das Diagramm zu beschreiben, unterscheidet. Er zeigt dies ebenfalls durch die Verwendung von Konjunktionen wie „weil“ (Zeile 3 und Zeile 5). Allerdings scheint auch PEAC28 nicht über die notwendigen Fähigkeiten zu verfügen, um aufbauend auf der grafischen Darstellung des Diagramms einen Situationsraum konstruieren zu können. Auch bei ihm folgen auf die Konjunktion „weil“ (Zeile 3, Zeile 5) keinerlei kausale Erklärungen. PEAC28 reproduziert hier lediglich unreflektiert und ohne sich dabei Interaktionen von Enzym- und Substratmolekülen auf Teilchenebene vorzustellen, Informationen, die er der Legende oder dem Informationstext auf einer oberflächlichen, perzeptuellen Ebene entnommen hat. So spricht er zwar davon, dass sich die auf der Y-Achse des Diagramms aufgetragene Produktkonzentration (Zeile 2) verändert, erklärt dies aber lediglich durch Verweis darauf, dass die Enzym- und die Substratkonzentrationen innerhalb der einzelnen Versuche „gleich“ (Zeile 4) oder unterschiedlich seien (Zeilen 5-6). Er erkennt dabei nicht, dass das Verhältnis von Enzym- und Substratmolekülen *innerhalb* eines

einzelnen Versuches keinerlei Erklärungskraft zur Erklärung der Graphenverläufe besitzt. Erklärungskraft resultiert erst aus dem Vergleich der jeweiligen Teilchenkonzentrationen der drei Versuche miteinander.

Darstellung der vollständigen Erklärung von PEAC28 (Kontrollgruppe K-Be-Erk, Novize):

- 1 Das Diagramm zeigt drei Graphen, die wiederum drei Versuche darstellen, die
- 2 zeigen, wie sich die Produktkonzentration verändert in den jeweiligen Versuchen.
- 3 Der Graph des Versuches A verläuft so, wie in Aufgabe 1 beschrieben, weil die
- 4 Enzym- und Substratkonzentration in diesem Versuch gleich sind und der zweite
- 5 und dritte Graph verlaufen so, weil in diesen Versuchen jeweils weniger Enzym-
- 6 konzentration vorhanden ist oder weniger Substratkonzentration.

(vollständige Erklärung von PEAC28)

Ähnlich wie die zuvor beschriebenen Lernenden erweckt auch die Lernende GÜNE18 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Novizin, siehe vollständige Erklärung auf der nächsten Seite) durch Verwendung kausaler Konjunktionen wie „weil“ (Zeile 1) oder „Dadurch“ (Zeile 2) den Anschein, die Zusammenhänge erklären zu können. Allerdings scheint auch sie nicht fähig zu sein, die referierten Inhalte im Situationsraum zu rekonstruieren. Stattdessen scheint sie den Graphenraum nach möglichen Erklärungen zu durchsuchen. Sie verfällt dabei in einen Zirkelschluss (vgl. Hahn 2011) und betrachtet die Variable Produktkonzentration als ein Attribut der Graphen, das die Graphen besitzen („haben“, Zeile 2). Darstellung der vollständigen Erklärung von GÜNE18 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Novizin):

- 1 Die drei Graphen verlaufen so, weil alle drei Graphen verschiedene Enzymkon-
- 2 zentrationen und verschiedene Substratkonzentrationen haben. Dadurch haben sie
- 3 auch verschiedene Produktkonzentration und verlaufen alle anders.

(vollständige Erklärung von GÜNE18)

7.6.1.2 Synthese zu Niveau 1

Die beispielhaft beschriebenen Lernerantworten zeigen, dass es einzelnen Lernenden der Untersuchung nicht möglich war, über die bloße Informationsentnahme hinaus, einen inhaltlichen Zugang zu den grafisch zusammengefassten Inhalten zu finden. Die Lernenden interpretierten die Graphenverläufe als Linien, die zwar unterschiedlich verlaufen, aber darüber hinaus keine inhaltliche Bedeutung besitzen. Solche Lernenden verstehen die einzelnen Graphen nicht

als Zeichen, die für etwas Anderes stehen, sondern als eigenständige Objekte „in and of itself“ (Moore & Thompson 2015, z. B. S. 784; siehe dazu auch Ausführungen in dieser Arbeit zu Untersuchungen von Roth & Bowen 1999; Swatton & Taylor 1994; Preece & Janvier 1992, 1993). Verschiedene Autor*innen sprechen in solchen Fällen von einem „literal reading“ (vgl. z. B. Kosslyn 1989, S. 189; Curcio 1989, S. 5).

Entsprechende Lernende, die keinen Zugang zu den grafisch referierten Inhalten finde, beschreiben das Diagramm wie ein Bild, anstatt es zu erklären. Ähnliches wurde bereits von Preece und Janvier (1992,1993) beschrieben (siehe Abschnitt 4.4.2.2.2). Die Autor*innen machen insbesondere mangelndes inhaltliches Vorwissen für dieses Problem verantwortlich: „If a pupil is unfamiliar with the context he/she will tend to give a graphical interpretation in which the graphical features are described in detail with little reference to context“ (Preece & Janvier 1993, S. 211). Auch in der hier durchgeführten Untersuchung zeigte sich, dass insbesondere Lernende mit niedrigem Vorwissen von solchen Problemen betroffen zu sein scheinen. Zumeist handelte es sich dabei um Lernende, die vor dem Hintergrund der Ausführungen in Abschnitt 7.3.1 als Noviz*innen zu bezeichnen sind.

In dieser Arbeit wird, angelehnt an Leinhardt et al. (1990), davon gesprochen, dass die jeweiligen Lernenden nicht in der Lage sind, einen Situationsraum zu konstruieren beziehungsweise nicht dazu fähig sind, vom Graphen- in den Situationsraum zu wechseln. Stattdessen verbleiben sie während ihrer Analyse vollständig im Graphenraum. Ein (umfassendes) Verstehen des Diagramms und der referierten Inhalte ist den Lernenden im Graphenraum aber nicht möglich.

Es ist anzunehmen, dass die jeweiligen Lernenden während ihrer Analyse die grafische Darstellung in eine bildhafte Vorstellung enkodieren, die der visuellen Beschreibung nach Pinker 1990 (siehe Abschnitt 3.8.2.1) bzw. einer bildhaften Vorstellung nach Bannert und Schnotz (2006) (siehe Abschnitte 3.8.1.4 und 4.3.2.1) entspricht (siehe grüner Pfeil in Abbildung 64). Die visuelle Beschreibung übersetzen sie in eine propositionale Repräsentation. Die propositionale Repräsentation externalisieren sie in Textform. Die Analyse des Diagramms erfolgt dabei, ohne, dass die Lernenden die gegebenen Informationen in einen Erkenntnisprozess aus Abduktion, Deduktion und Induktion integrieren (siehe Abschnitt 7.2.4). Der mögliche Erkenntnisgewinn wird folglich (erkenntnistheoretisch) kurzgeschlossen. Da der Situationsraum in dieser Arbeit als eine Art mentales Modell der referierten inhaltlichen Situation verstanden werden kann (siehe

Abschnitt 3.7), ließe sich hier, vor dem Hintergrund des Modells des multimedialen Bildverstehens nach Schnotz und Bannert (1999, 2003; Bannert & Schnotz 2006, siehe Abschnitt 4.3.2.1), von einem *visuellen Kurzschluss* sprechen.

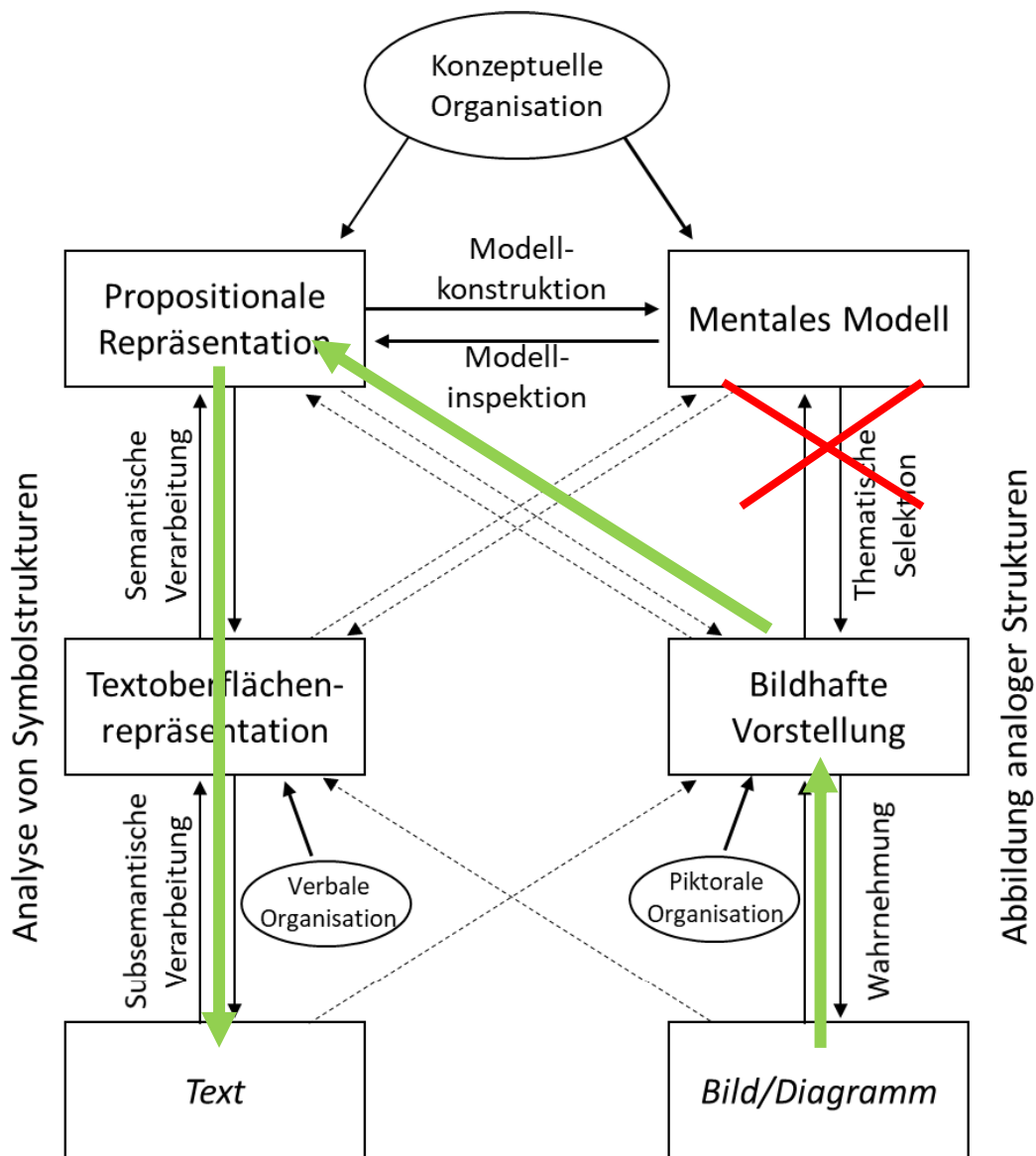


Abbildung 64. Visueller Kurzschluss beim Diagrammverstehen (eigene Darstellung aufbauend auf dem Modell des Text- und Bildverstehens nach Bannert & Schnotz 2006, S. 76)

Lernende, die einem solchen visuellen Kurzschluss unterliegen, analysieren das Diagramm folglich ausschließlich perzeptuell und beschreiben das Diagramm bzw. die vermeintlichen Inhalte bildlich, ohne ein mentales Modell der in dem Diagramm referierten inhaltlichen Zusammenhänge zu konstruieren (siehe Pfeile in Abbildung 64). Sie werden im Folgenden Niveau 1, dem *perzeptuellen Analysieren* von Diagrammen, zugeordnet.

7.6.2. Niveau 2: Induktives Erklären

Es konnten verschiedene Lernende identifiziert werden, die das Diagramm durch Verallgemeinerung der grafischen Informationen induktiv erklären (siehe Abschnitt 7.2.3). Ähnlich wie Lernende auf Niveau 1 verbleiben auch diese Lernenden während ihrer Analyse vornehmlich im Graphenraum. Wenn überhaupt, dann konstruieren sie einen oberflächlichen, wenig elaborierten Situationsraum. Die induktiven Erklärungen der Lernenden können in fachlich korrekte und inkorrekte induktive Erklärungen unterschieden werden. Sie werden im Folgenden vorgestellt.

7.6.2.1 Analyse der Lernerantworten

7.6.2.1.1. Fachlich korrekte induktive Erklärungen

Beispielhaft für die Erläuterung fachlich korrekter, induktiver Erklärungen sei die Erklärung der Lernenden EVSE01 (Kontrollgruppe K-Be-Erk, Konkretisiererin, siehe vollständige Erklärung auf der nächsten Seite) angeführt. EVSE01 zeigte in dem Vorwissenstest zwar ein sehr hohes deklaratives enzymatisches Vorwissen, gleichzeitig aber nur geringe Fähigkeiten beim abstrakten Schlussfolgern (siehe Abschnitt 7.3.1). Vor dem Hintergrund der Ausführungen in Abschnitt 7.3.1 kann daher vermutet werden, dass es ihr schwerfällt, von der grafischen Darstellung zu abstrahieren.

Ähnlich wie Lernende auf Niveau 1 beschreibt auch EVSE01 das Diagramm zunächst sehr ausführlich bildlich. Anders als Lernende auf Niveau 1, die das Diagramm ausschließlich beschreiben, zieht EVSE01 aber bereits Schlussfolgerungen auf Grundlage des Diagramms. Ihre Schlussfolgerungen sind allerdings induktiver und nicht abduktiver Natur. Anstatt kausale Erklärungshypothesen für die Graphenverläufe zu abduzieren, tätigt sie argumentative Aussagen wie „dieser Versuch zeigt“ (Zeile 1) und „Es wird deutlich, dass“ (Zeile 2). Ihre Beobachtungen fasst sie induktiv¹²⁰ erklärend zu einer für sie finalen Erkenntnis zusammen: „Je mehr Substratkonzentration vorhanden ist, desto höher ist auch die Produktkonzentration“ (Zeile 4 – 5).

¹²⁰ Es sei betont, dass es sich hier nicht um eine deduktive Schlussfolgerung handelt, die EVSE01 zu Beginn ihrer Erklärung, ausgehend von ihrem Vorwissen formuliert und danach mithilfe der gegebenen grafischen Evidenzen testet. Ihre Schlussfolgerung erfolgt am Ende ihrer ‚Erklärung‘ und stellt eine generalisierte Aussage dar, die sie aus den zuvor analysierten Evidenzen ableitet.

Darstellung der vollständigen Erklärung von EVSE01 (Kontrollgruppe K-Be-Erk, KonkretisiererIn):

1 Dieser Versuch zeigt, dass das Entnehmen der halben Substratkonzentration eine
2 ganz andere Wirkung auf die Produktkonzentration hat als das Entnehmen der hal-
3 ben Enzymkonzentration. Es wird deutlich, dass eine höhere Produktkonzentra-
4 tion erreicht werden kann, auch wenn die halbe Enzymkonzentration fehlt, anders
5 als bei der halben Substratkonzentration. Je mehr Substratkonzentration vorhan-
6 den ist, desto höher ist auch die Produktkonzentration.

(vollständige Erklärung von EVSE01)

Der argumentative, induktive Charakter der Erklärung von EVSE01 ist auf den ersten Blick womöglich schwer zu erkennen. Deutlicher tritt dieser hervor, wenn die drei inhaltlichen Begriffe „halbe Substratkonzentration“ (Zeile 1), „halbe Enzymkonzentration“ (Zeile 2) und „Produktkonzentration“ (Zeile 3) zur Veranschaulichung durch die Variablen X, Z und Y ersetzt werden (siehe eckige Klammern):

Dieser Versuch zeigt, dass das Entnehmen von [X] eine ganz andere Wirkung auf [Y] hat, als das Entnehmen von [Z]. **Es wird deutlich**, dass eine höhere [Y] erreicht werden kann, auch wenn [X] fehlt, anders als bei [Z]. **Je mehr** [X] vorhanden ist, **desto** höher ist auch [Y].

(durch den Verfasser modifizierte Erklärung von EVSE01)

Anders als EVSE01 beginnt die Lernende ANFR02 (Kontrollgruppe K-Be-Erk, Novizin, siehe vollständige Erklärung unten) ihre Erklärung mit einer ausgehend von dem Informationsmaterial bzw. dem Diagramm (siehe dazu Beschreibung in den Zeilen 1 – 3) induktiv gebildeten Erklärungshypothese: „Es kann natürlich sein, dass die Substratkonzentration dafür sorgt, dass eine möglichst hohe Produktkonzentration in den Experimenten vorherrscht“ (Zeilen 4 – 5). Ausgehend von dieser Erklärungshypothese scheint sie, ohne dies jedoch explizit in ihrer Erklärung so zu verbalisieren, die Vorhersage zu deduzieren, dass wenn die Substratkonzentration kausal für die („möglichst hohe“) Produktkonzentration ist, daraus folgt, dass die beiden Versuche A und EK0,5, in denen jeweils die gleichen (hohen) Substratkonzentration vorliegen, gegen Ende des Versuches die gleichen, (hohen) Produktkonzentration besitzen müssen. Während die Formulierung dieser Vorhersage in ihrer Erklärung nicht explizit enthalten ist, formuliert sie das Ergebnis der Prüfung dieser Vorhersage explizit. Sie formuliert: „Auch lässt sich dies [die Konsequenzen, die sich aus ihrer Erklärungshypothese

deduktiv ableiten lassen und damit zugleich auch die Erklärungshypothese an sich] bestätigen, weil A und Ek0,5 nach einer gewissen Zeit auf der Konstanten liegen“ (Zeilen 5 – 6).

Darstellung der vollständigen Erklärung von ANFR02 (Kontrollgruppe K-Be-Erk, Novizin):

- 1 Wie bereits vorhin beschrieben, verhalten sich alle drei Kurven unterschiedlich.
 - 2 Kurve A und Ek0,5 verlaufen so, wie sie verlaufen, weil die Substratkonzentration
 - 3 höher ist als bei Sk0,5.
 - 4 Es kann natürlich sein, dass die Substratkonzentration dafür sorgt, dass eine mög-
 - 5 lichst hohe Produktkonzentration in den Experimenten vorherrscht.
 - 6 Auch lässt sich dies bestätigen, weil A und Ek0,5 nach einer gewissen Zeit auf der
 - 7 Konstanten liegen.
 - 8 Sk0,5 hat zwar eine Enzymkonzentration von 6 mmol/l, aber eine Substratkon-
 - 9 zentration von 3 mmol/l.
 - 10 Es lässt sich sagen, dass die Substratkonzentration für die Produktkonzentration
 - 11 verantwortlich ist.
- (vollständige Erklärung von ANFR02).

Ihre vornehmlich induktiv gewonnenen Erkenntnisse nutzt sie aber nachfolgend nicht, um weitere Graphenverläufe (rückwärtsgerichtet) zu erklären (siehe Ausführungen zu Versuch SK05 in den Zeilen 7 und 8). EVSE01 scheint aus ihrer anfänglich induktiv gebildeten Erklärungshypothese (siehe Zeilen 2 – 3) zwar Vorhersagen deduzieren und diese mithilfe der Graphenverläufe (bestätigend) prüfen zu können (siehe dazu Abbildung 56 in Abschnitt 7.2.4), den Situationsraum scheint sie aber nicht über ihre diese Erklärungshypothese hinausgehend elaborieren zu können. Stattdessen führt sie am Ende ihrer Erklärung generalisierend (vorwärtsgerichtet) – und letztendlich substituierend zu ihrer bereits anfänglich gebildeten Erklärungshypothese (siehe Zeilen 2 – 3) – aus: „Es lässt sich sagen, dass die Substratkonzentration für die Produktkonzentration verantwortlich ist“ (Zeile 9).

7.6.2.1.2. Fachlich inkorrekte induktive Erklärungen

Während die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Lernenden fachlich korrekte, induktive Erklärungen geben, finden sich ebenso Lernende, die in vergleichbarer Art und Weise fachlich inkorrekte Schlussfolgerungen ziehen.

Die Lernende ELTH08 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Novizin, siehe vollständige Erklärung auf der übernächsten Seite) zeigte in dem Vorwissenstest ein

geringes enzymatisches Vorwissen und erhebliche Schwächen beim Abstrahieren. Ihre Schlussfolgerungen sind daher rein induktiv und orientieren sich fast ausschließlich an dem perzeptuellen Verlauf der einzelnen Graphen. Sie gliedert ihre Erklärung in zwei Teile: Teil 1 nennt sie „Erklärung“ (Zeilen 1 – 8), und meint damit eigentlich Beschreibung, und Teil 2, das sie als „Fazit“ (Zeilen 8 – 13) bezeichnet und in dem sie ihre Schlussfolgerungen expliziert.

Um zu ihrem Fazit zu gelangen, wählt ELTH08 einen ungeeigneten Vergleich: Anstatt die Konzentration der Teilchen zwischen den Versuchen zueinander in Relation zu setzen, setzt sie – wie bereits in Abschnitt 7.6.1 für den Lernenden PEAC28 beschrieben – fachlich inkorrekt die Konzentration von Enzym- und Substratmolekülen innerhalb eines Ansatzes zueinander in Relation. Dieses Vorgehen deutet darauf hin, dass ELTH08 bei ihrer Interpretation fast vollständig im Graphenraum verbleibt. Würde ELTH08 einen Situationsraum konstruieren und in diesem agieren, so würde sie dort a) erkennen, dass die absolute Anzahl an Substratmolekülen, und nicht ihre relative Anzahl, die maximal erreichbare Produktkonzentration bestimmt und b) dass durch eine Erhöhung der Teilchenzahl – egal ob von Substrat- oder Enzymmolekülen – unter ansonsten gleichen Bedingungen die Wahrscheinlichkeit des Aufeinandertreffens von Enzym- und Substratmolekülen zunimmt; eine Erniedrigung der Teilchenzahl hätte demnach das Gegenteil zur Folge (siehe Abschnitt 6.2.1.1 für eine Erläuterung der fachwissenschaftlichen Grundlagen). Stattdessen kommt ELTH08, bedingt durch ihren ungeeigneten, oberflächlichen Vergleich der Konzentrationen innerhalb der einzelnen Ansätze, zu dem Schluss, dass die maximal mögliche Anzahl an Produktmolekülen nur dann erreicht werden kann, „wenn [innerhalb eines Ansatzes] die Substratkonzentration die größere oder die gleiche wie die Enzymkonzentration ist“ (Zeilen 8 – 10).

Wird das Diagramm ausschließlich im Graphenraum analysiert, so steht eine solche (fachlich inkorrekte) Schlussfolgerung nicht in Widerspruch zu den grafischen Evidenzen, erst die Analyse im Situationsraum, auf der inhaltlichen submikroskopischen Ebene, zeigt Widersprüche auf. Probleme, die aus ihrer eingeschränkten Analyse resultieren, zeigen sich auch in nachfolgenden Schlussfolgerungen von ELTH08. Sie führt aus, dass eine identische („gleiche“, Zeile 10) Konzentration von Substrat- und Enzymteilchen zu einer schnelleren Reaktion führe (siehe Zeilen 10 – 11) und dass die (von ihr nicht näher definierte) maximale Produktkonzentration nicht erreicht werden könne, wenn die Substratkonzentration geringer als die Enzymkonzentration sei (siehe Zeilen 11 – 13).

Darstellung der vollständigen Erklärung von ELTH08 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Novizin):

1 Erklärung: Das Halbieren der Substratkonzentration hat eine starke Auswirkung
2 auf die Produktkonzentration. Die Produktkonzentration ist nur halb so hoch wie
3 bei Versuch A und EK0,5 und erreicht nach einer Zeit von 12 min bereits das
4 Maximum. Eine Verringerung der Substratkonzentration hat nur eine Auswirkung
5 auf die Reaktionsgeschwindigkeit, das Maximum wird dennoch erreicht. Bei ei-
6 nem Ausgleich von Substrat- und Enzymkonzentration ist das Maximum nach ca.
7 15 Minuten.
8 Fazit: Die Anzahl der Produktmoleküle ist nur dann beim Maximum, wenn die
9 Substratkonzentration die größere oder die gleiche wie die Enzymkonzentration
10 ist. Die gleiche Anzahl von Substraten und Enzymen bezweckt eine schnellere
11 Reaktion, das Maximum unterscheidet sich jedoch sich nicht. Falls die Substrat-
12 konzentration jedoch geringer als die Enzymkonzentration ist, wird das Maximum
13 nicht erreicht.

(vollständige Erklärung von ELTH08).

Wie attraktiv solche oberflächlichen, häufig perzeptuellen Vergleiche innerhalb des Graphenraums für die Lernenden sein können, zeigt sich auch bei der Lernenden JUAN02 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Novizin, siehe vollständige Erklärung auf der nächsten). Genau wie ELTH08 zeigte auch JUAN02 in dem Vorwissenstest nur ein geringes domänenspezifisches Vorwissen und sehr geringe Fähigkeiten beim Abstrahieren. Ebenso wie die anderen Lernenden auf Niveau 2 verbleibt auch sie bei ihrer Analyse vornehmlich im Graphenraum. JUAN02 führt ähnlich wie ELTH08 am Ende ihrer Argumentation aus, dass das relative Verhältnis von Enzym- zu Substratkonzentration *innerhalb* eines Ansatzes entscheidend für den Verlauf der Graphen sei. Sie schlussfolgert fachlich inkorrekt, dass die Produktkonzentration immer dann langsamer zunehme, wenn die Enzymkonzentration innerhalb eines Ansatzes größer als die Substratkonzentration (siehe Zeilen 6 – 8) oder die Substratkonzentration kleiner als die Enzymkonzentration (siehe Zeilen 9 – 11) sei. Redundanzen und Widersprüche in ihrer Argumentation, die deutlich werden, wenn die Versuche im Situationsraum rekonstruierten werden, erkennt sie nicht (siehe Argumentation in den Zeilen 6 – 11).

Darstellung der vollständigen Erklärung von JUAN02 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Novizin):

1 In dem Diagramm sieht man, dass bei Versuch A, also gleiche Enzymkonzentra-
2 tion und Substanzkonzentration (6 mmol/l), die Produktkonzentration zu Beginn
3 ziemlich schnell steigt, jedoch nach ca. 5 Minuten nur noch langsamer.
4 Bei Versuch EK0,5 steigt die Produktkonzentration langsamer als in Versuch A,
5 aber erreicht nach der gleichen Zeit den gleichen Maximalwert.
6 Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Produktkonzentration bei höherer En-
7 zymkonzentration als Substratkonzentration zwar langsamer zunimmt, als wenn
8 es ausgeglichen ist, aber den gleichen Maximalwert erreicht.
9 Ist jedoch die Substratkonzentration geringer als die Enzymkonzentration, so ist
10 die Zunahme der Produktkonzentration langsamer und erreicht einen viel geringe-
11 ren Maximalwert.

(vollständige Erklärung von JUAN02)

Andere Lernenden ziehen auf der Grundlage einer vergleichbaren Argumentation – basierend auf perzeptuellen Vergleichen zwischen den Graphen zu EK05 und SK05 – die Schlussfolgerung, dass Substratmoleküle ‚wichtiger‘ für die enzymatische Reaktion seien als Enzymmoleküle. So führt beispielsweise die Lernende SAMI09 (Kontrollgruppe K-Be-Erk, Konkretisiererin), aufbauend auf einer ausführlichen Beschreibung des Diagramms, aus: „[...] Somit ist zu sehen, dass für eine enzymatische Reaktion die Substratkonzentration wichtiger als die Enzymkonzentration ist [...]“ (SAMI09). In vergleichbarer Art und Weise schlussfolgert die Lernende MOCH09 (Kontrollgruppe K-Be-Erk, Novizin): „Substrate sind beim Aufbau von Molekülen offensichtlich wichtiger als Enzyme“ (MOCH09).

7.6.2.2 Synthese zu Niveau 2

Lernende, die auf Niveau 2 agieren, sind, ähnlich wie Lernende auf Niveau 1, nicht dazu in der Lage, den Verlauf der Graphen durch Bezug auf die inhaltliche Situation abduktiv, rückwärtsgerichtet (kausal) zu erklären. Es gelingt ihnen zwar besser als Lernenden auf Niveau 1, die bei ihren Erklärungen vollständig im Graphenraum verbleiben, sich Aspekte der referierten Situation inhaltlich vorzustellen, aber sie sind immer noch nicht in ausreichendem Maße zur Abstraktion fähig.

Anstatt das Diagramm zu erklären, nutzen sie die grafischen Evidenzen, um aus dem Informationsmaterial bzw. den Graphenverläufen durch induktives Schlussfolgern Verallgemeinerungen abzuleiten. In Abschnitt 7.2.3 wurden solche Verallgemeinerungen als induktive Erklärungen bezeichnet. Induktive Erklärungen beruhen auf der Beobachtung korrelativer Zusammenhänge und sind von abduktiven Erklärungen zu unterscheiden, die aufbauend auf dem Vorwissen über Mechanismen und Theorien rückwärtsgerichtet Kausalzusammenhänge explizieren. Die induktiven Erklärungen der Lernenden auf Niveau 2 sind häufig generalisierende Aussagen über die Beziehung zwischen Enzymen und Substraten. Eine Vernetzung der Erklärungsebenen im Situationsraum, sofern die Lernenden aus dem Graphenraum überhaupt in diesen wechseln, erfolgt dabei nicht. Die drei Versuche erfüllen nach Meinung solcher Lernenden den Zweck, etwas zu zeigen oder Erwartungen zu bestätigen. Es finden sich daher auch häufig Formulierungen wie „also“ („wird also“, „hat also“); „somit; „daher“; „offensichtlich“; „lässt sich schlussfolgern“, „es wird deutlich“; „der Versuch zeigt“; „man sieht, dass“. Die betreffenden Lernenden entwickeln dabei häufig eine ausführliche Argumentation, um ihre induktiven Schlussfolgerungen zu rechtfertigen (siehe dazu auch Ausführungen zum vorwärtsgerichteten Argumentieren bei Gott & Duggan 2007 bzw. Gott & Roberts 2008). Ihren induktiven Erklärungen gehen meist, ähnlich wie bereits für Lernende auf Niveau 1 beschrieben, ausführliche perzeptuelle Beschreibungen des Diagramms voraus. Die Schlussfolgerungen der Lernenden befinden sich häufig am Ende ihrer Beschreibung bzw. ihrer Argumentation.

Das argumentative Vorgehen der Lernenden auf Niveau 2 ist aber nicht prinzipiell als inkorrekt zu beurteilen. So verstehen beispielsweise auch verschiedene Wissenschaftler*innen eine Erklärung als Argumentation (vgl. z. B. McNeill et al. 2006; Ruiz-Primo et al. 2010). In dem hier durchgeführten Forschungsvorhaben wird sich allerdings an den Ausführungen von Osborne und Patterson (2011) orientiert, die eine Erklärung von einer Argumentation wie folgt abgrenzen (siehe dazu auch Ausführungen zum mechanistischen Erklären in Abschnitt 3.5):

„[...] explanations consist of a subset of descriptions where new entities or properties are brought into being or invented to provide a causal account. [...] In an argument, however, there is not so much a feature or behavior to be explained but a claim to be justified“ (Osborne & Patterson 2011, S. 629).

Zudem sei betont, dass die Argumentation der Lernenden auf Niveau 2 nicht der hier geforderten Aufgabenstellung entspricht. Die Aufgabenstellung lautete: *Erklären Sie das Diagramm ausführlich, d. h. begründen Sie auf Molekülebene, wieso die Graphen so verlaufen, wie sie verlaufen.*

Wesentlich für die Einordnung dieser Lernenden auf ein niedriges Verstehensniveau ist zudem, dass sie einem verkürzten Verstehens- bzw. Erkenntnisprozess unterliegen. Vergleichbar zu Lernenden auf Niveau 1, für die ein visueller Kurzschluss im Verstehensprozess angenommen wird, wird für Lernende auf Niveau 2 – vor dem Hintergrund des in Abschnitt 7.2.4 beschriebenen ST-Modells – ein (erkenntnistheoretischer) *induktiver Kurzschluss* angenommen (siehe grüne Pfeile in Abbildung 65). Bei einem solchen induktiven Kurzschluss finden zwar deduktive Schlussfolgerungen statt, allerdings dienen diese nur dazu, die induktiv gebildeten Erklärungshypothesen, ohne dass es hier zu einem echten Erkenntnisgewinn kommt, zu bestätigen; abduktive Prozesse unter kreativ-konstruktivistischer Einbindung des Vorwissens erfolgen dabei nicht. Da abduktive Erklärungen unter Einbindung des Vorwissens für das Diagrammverstehen aber von essenzieller Bedeutung sind (siehe Abschnitt 7.2), ist bei Lernenden auf Niveau 2 mit einem – verglichen mit Lernenden auf höheren Niveaustufen – reduziertem Erkenntnisgewinn zu rechnen.

Es lässt sich zusammenfassen, dass Lernende auf Niveau 2 nicht ausreichend von der grafischen Darstellung abstrahieren und den Situationsraum nicht ausreichend elaborieren. Die Inhalte, die auf der Teilchenebene bzw. der abstrakteren probabilistischen Ebene stattfinden, sind ihnen weitestgehend unzugänglich. Entsprechende Lernende wählen eine Problemlösestrategie, bei der sie – im Sinne einer *verallgemeinernden Argumentation*¹²¹ – induktiv Schlussfolgerungen aus den Daten ableiten, anstatt kausale Erklärungshypothesen für die Daten zu abduzieren. Ihre Erklärungen sind daher vornehmlich durch konsekutive

¹²¹ Hier ließe sich auch von einer *induktivistischen Argumentation* sprechen. Dieser Begriff ist jedoch eng verbunden mit wahrscheinlichkeitstheoretischen Überlegungen und bezeichnet dort ein „*probabilistisches* Rasonieren“ (Stegmüller 1973, S. 90 f.). Eine derartige differenzierte und abstrakte Betrachtung unter Einbezug inferenzstatistischer Überlegungen wird von Lernenden hier aber keinesfalls (reflektiert) vorgenommen. Da in diesem Forschungsvorhaben zudem auf den höheren Niveaus auch das Denken in Wahrscheinlichkeiten an Relevanz gewinnt – damit aber eher das Denken in hohen und niedrigen Konzentrationen und der damit bedingten Wahrscheinlichkeit des Aufeinandertreffens von Enzym- und Substratmolekülen gemeint ist –, wird der Begriff *induktivistisch* in dieser Arbeit bewusst vermieden.

Konnektoren (*also, somit* etc.) geprägt, kausale Konnektoren finden sich eher selten.

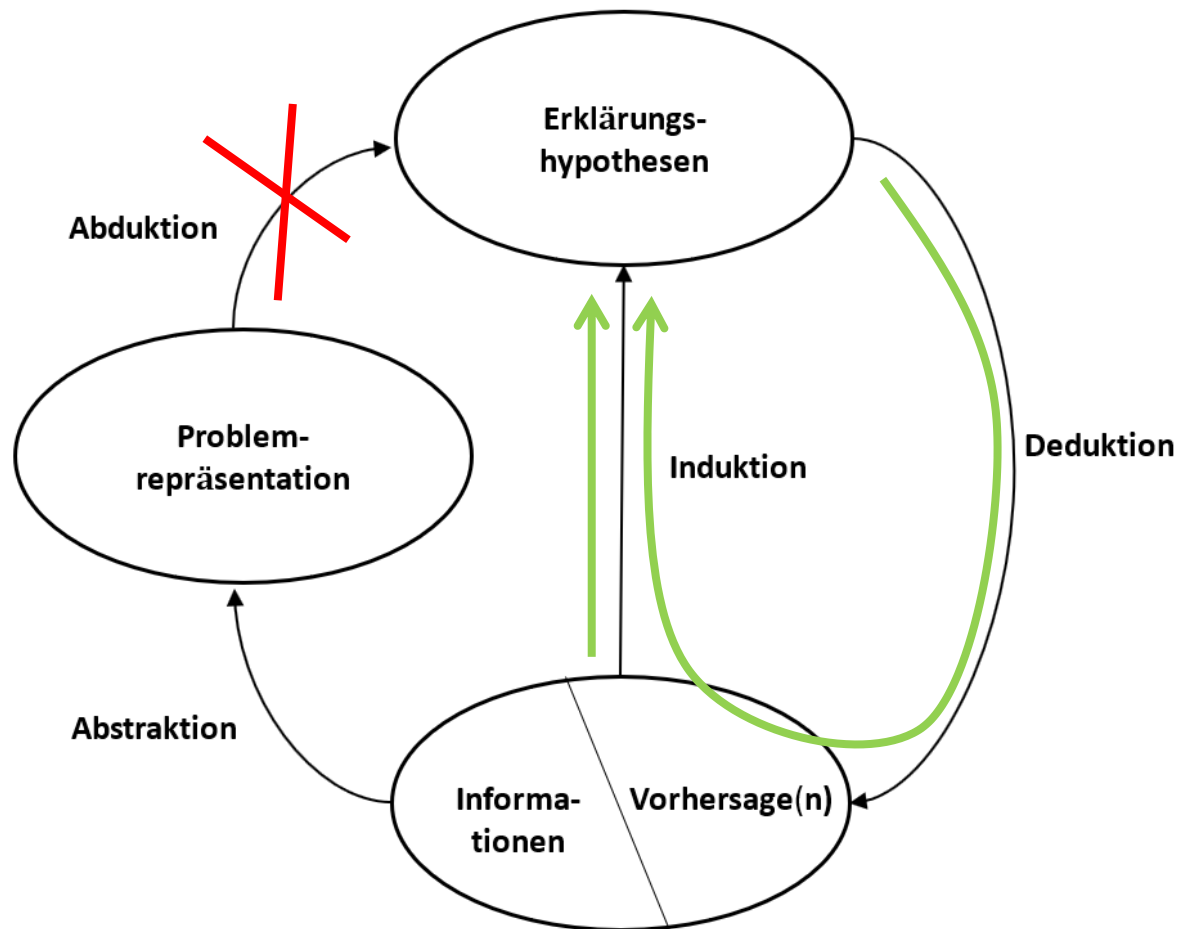


Abbildung 65. Induktiver Kurzschluss beim Diagrammverstehen (eigene Darstellung aufbauend auf dem ST-Modell nach Stefanelli & Ramoni 1992, S. 10)

7.6.3. Niveau 3: Abduktives Erklären

Lernende auf Niveau 3 sind anders als Lernende auf Niveau 2 zur Abduktion von Erklärungshypothesen fähig. Ihre abduzierten Erklärungshypothesen stehen jedoch in Widerspruch zu den Daten¹²². Ursächlich für die fachlich inkorrekten Erklärungshypothesen erscheinen Vorstellungen der Lernenden (vgl. Hammann & Asshoff 2014). Im Folgenden werden die am häufigsten beobachteten Probleme beim Abduzieren vor dem Hintergrund dieser Vorstellungen beschrieben.

¹²² Es sei darauf hingewiesen, dass die Lernenden grundsätzlich eine Vielzahl an Problemen offenbart haben, deren vollständige und umfassende Analyse weit über das in dieser Arbeit mögliche Maß hinausgeht. Aus chemiedidaktischer Perspektive erscheint hier beispielsweise eine Analyse des Denkens in Konzentration relevant, aus sprachsensibler Perspektive könnten die Argumentationsstrukturen der Lernenden analysiert werden.

7.6.3.1 Kategorisierung von Schülervorstellungen

In der Untersuchung offenbarten sich verschiedene Vorstellungen von Lernenden, die sich erheblich auf ihr Diagrammverstehen auswirkten. Die Vorstellungen (siehe Abbildung 66) werden in Unterrichts- und Schülervorstellungen differenziert (vgl. Hammann & Asshoff 2014).

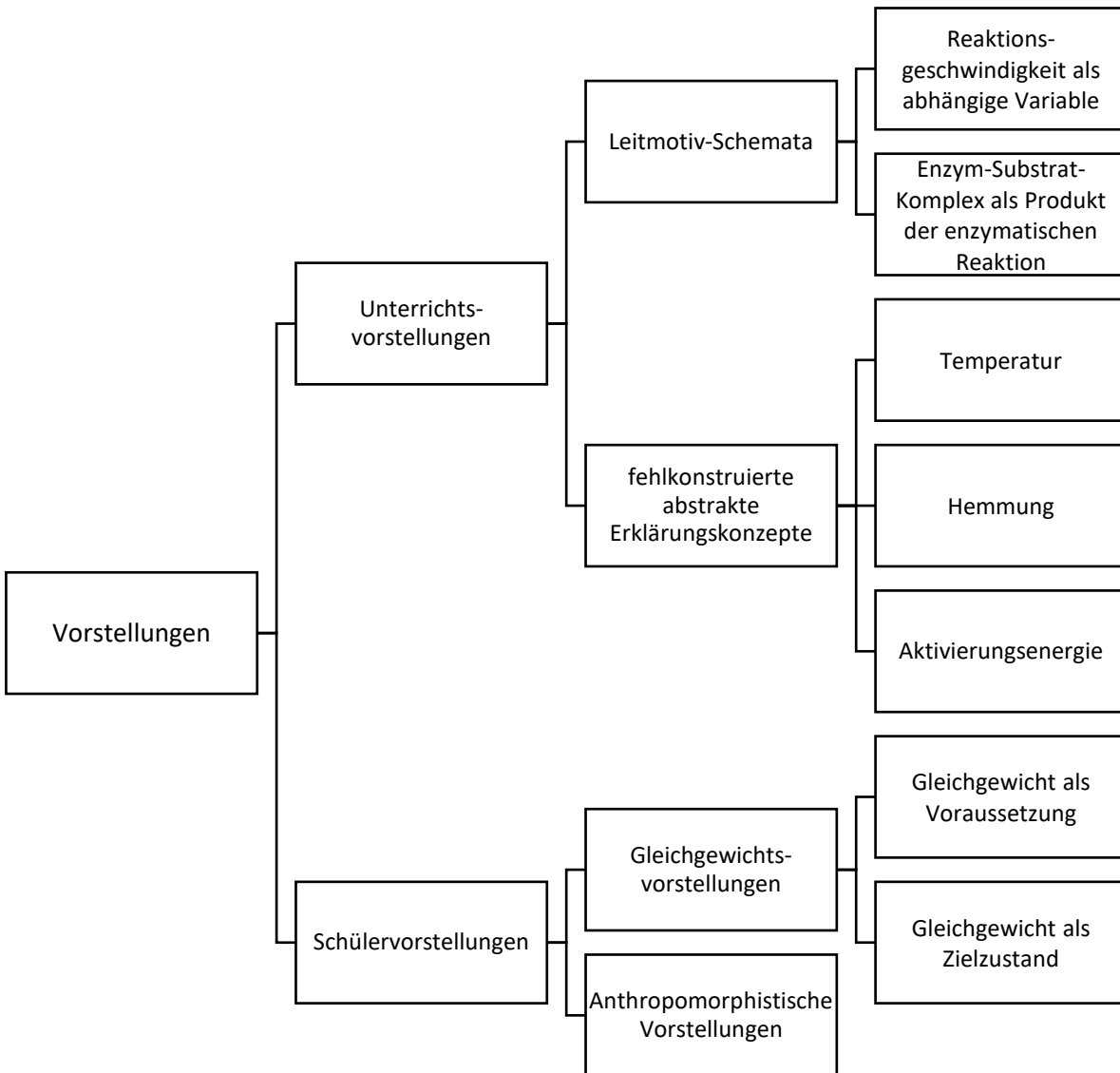


Abbildung 66. Vorstellungen von Lernenden, die in der hier durchgeführten empirischen Untersuchung identifiziert werden konnten (eigene Darstellung)

Die identifizierten *Unterrichtsvorstellungen* sind spezifisch und scheinen den im Unterricht behandelten enzymatischen Inhalten zu entstammen (siehe zu möglichen Ursachen Ausführungen in Abschnitt 7.3.3). Sie können unterschieden werden in die in Abschnitt 4.3.2.2 definierten, und insbesondere an die Ausführungen von Paivio (1990) angelehnten, Leitmotiv-Schemata sowie fehlkonstruierte abstrakte Erklärungskonzepte.

Als *Leitmotiv-Schemata* werden in dieser Arbeit besondere Diagramm- bzw. Interpretationsschemata bezeichnet, die durch bestimmte Graphenverläufe in einem Diagramm aktiviert werden (siehe Abschnitt 4.3.2.2). Es wird angenommen, dass entsprechende Interpretationsschemata von den Lernenden beim Interpretieren von häufig im Schulunterricht verwendeten Liniendiagrammen (siehe Abschnitt 7.3.3.3) erlernt wurden und dass insbesondere Lernende, welche entsprechende Schulbuchdiagramme nicht hinreichend verstanden haben, die jeweiligen Erläuterungen (aus Unterricht oder Schulbuch) als prototypische Interpretationsstrategien auf andere Diagramme anwenden. Potenziell lernhinderliche Darstellungen in Schulbüchern, die zum Missverstehen der Diagramme beitragen könnten, wurden in Abschnitt 7.3.3.3 ausführlich beschrieben. Eine unreflektierte Anwendung der Leitmotiv-Schemata auf unbekannte Diagramme, die den aus dem Unterricht bekannten Diagrammen zwar hinsichtlich Syntax ähneln, aber nicht hinsichtlich der referierten Inhalte, führt zwangsläufig zu einer Missinterpretation der unbekannteren Diagramme und zu einer fachlich inkorrekten Konstruktion des Situationsraums. Die aus einem solchen, fehlkonstruierten Situationsraum abduzierten Erklärungshypothesen sind ungeeignet, um damit die Graphenverläufe des Untersuchungsdiagramms zu erklären (siehe Abschnitt 4.3.2.2). Insbesondere zwei Leitmotiv-Schemata, das Leitmotiv *Reaktionsgeschwindigkeit als abhängige Variable* und das Leitmotiv *Enzym-Substrat-Komplex als Produkt der enzymatischen Reaktion*, konnten in den Lernerantworten identifiziert werden. Die beiden Leitmotive werden nachfolgend in Abschnitt 7.6.3.2 ausführlich beschrieben.

Unter *fehlkonstruierten abstrakten Erklärungskonzepten* werden im Folgenden Vorstellungen von Lernenden zu abstrakten Inhalten aus dem Themenbereich Enzymatik verstanden, die sie – ähnlich wie Leitmotiv-Schemata – aus dem vorausgegangenen Unterricht in die Analyse des Untersuchungsdiagramms transportieren. Während Leitmotiv-Schemata bereits frühzeitig zur (Miss-)Interpretation des Untersuchungsdiagramms und zur Fehlkonstruktion des Situationsraums beitragen und damit indirekt zu Fehlern bei der Abduktion von Erklärungshypothesen führen, scheinen sich fehlkonstruierte Erklärungskonzepte direkt auf die Abduktion von Erklärungshypothesen auszuwirken. Lernende, die bedingt durch fehlkonstruierte abstrakte Erklärungskonzepte fachlich ungeeignete Erklärungshypothesen abduzieren, können zuvor durchaus einen geeigneten

Situationsraum konstruiert haben. Berichtet wird im Folgenden (siehe Abschnitt 7.6.3.3) über die fehlkonstruierten Erklärungskonzepte *Temperatur*, *Hemmung* und *Aktivierungsenergie*.

Die in dieser Arbeit identifizierten *Schülervorstellungen* scheinen dagegen eher dem Alltag zu entstammen und beinhalten *Gleichgewichtsvorstellungen* und *anthropomorphistische Vorstellungen* (vgl. Hammann & Asshoff 2014). Die genannten Schülervorstellungen wirken sich – ähnlich wie Leitmotive – sowohl auf die (Miss-)Interpretation des Diagramms und damit auf die (Fehl-)Konstruktion des Situationsraums aus als auch – ähnlich wie die genannten fehlkonstruierten Erklärungskonzepte – auf das Abduzieren von Erklärungshypothesen. Lernerantworten, in denen Gleichgewichtsvorstellungen in Zusammenhang mit einer Missinterpretation des Diagramms identifiziert werden konnten, werden in Abschnitt 7.6.3.4 beschrieben; Lernerantworten, in denen anthropomorphistische Vorstellung in Zusammenhang mit einer Missinterpretation identifiziert werden konnten, in Abschnitt 7.6.3.5.

7.6.3.2 Analyse: Leitmotiv-Schemata

Insbesondere zwei Arten von Leitmotiv-Schemata konnten identifiziert werden, die zu einer Missinterpretation des Untersuchungsdiagramms beitragen könnten: das Leitmotiv Reaktionsgeschwindigkeit als abhängige Variable sowie das Leitmotiv Enzym-Substrat-Komplex als Produkt der enzymatischen Reaktion. Die den jeweiligen Schemata zu Grunde liegenden Leitmotive werden in Zusammenhang mit den Erklärungen der Lernenden erläutert (siehe dazu auch die Analyse der Schulbuchliteratur in Abschnitt 7.3.3).

7.6.3.2.1. Leitmotiv Reaktionsgeschwindigkeit als abhängige Variable

Eine der in dieser Untersuchung am häufigsten beobachteten Unterrichtsvorstellungen (vgl. Hammann & Asshoff 2014) ist das Leitmotiv *Reaktionsgeschwindigkeit als abhängige Variable*. Lernende, die von diesem Leitmotiv-Schemata betroffen sind, mappen bei ihrer Interpretation des Untersuchungsdiagramms anstatt der in dem Diagramm dargestellten Variable Produktkonzentration überaus konsequent die Variable Reaktionsgeschwindigkeit¹²³ auf die Y-Achse. Sie

¹²³ Die Variable Reaktionsgeschwindigkeit ist implizit in dem Diagramm in Form der Steigung dargestellt und könnte als Z-Variable beschrieben werden.

(miss-)interpretieren dadurch die konstanten Graphenabschnitte des Untersuchungsdiagramms als Zustand maximaler Reaktionsgeschwindigkeit, anstatt sie fachlich korrekt als Zustand maximaler Produktkonzentration zu identifizieren (siehe dazu insbesondere Abbildung 61 in Abschnitt 7.3.3). Im Folgenden wird hinsichtlich dieses Problems nur noch verkürzt von dem Leitmotiv *Reaktionsgeschwindigkeit* gesprochen.

Hinweise auf das Leitmotiv Reaktionsgeschwindigkeit finden sich beispielsweise in der Erklärung der Lernenden ANCH06 (Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk, Novizin). Die Lernende ANCH06 führt in ihrer Erklärung beispielsweise für die konstanten Graphenabschnitte aus: „Der Graph wird konstant, weil die Enzyme irgendwann nicht schneller arbeiten können. Ihre maximale Produktionsgeschwindigkeit ist dann erreicht“ (vollständige Erklärung von ANCH06). Fachlich korrekt wäre jedoch die Interpretation, dass in diesen Abschnitten nur noch Produktmoleküle in der Lösung vorliegen und daher überhaupt keine Reaktion mehr stattfinden kann. Die konstanten Graphenabschnitte repräsentieren daher – diametral zur Interpretation von ANCH06 – nicht die maximale Reaktionsgeschwindigkeit, sondern die geringste Reaktionsgeschwindigkeit. Es erscheint naheliegend, dass Erklärungen, die aufbauend auf einer solchen Missinterpretation erfolgen, fachlich nicht korrekt sein können.

Ausführlicher sei dies anhand der Erklärung des Lernenden VEAL30 (Interventionsgruppe I-S-EI-Erk, Novize, siehe vollständige Erklärung auf der nächsten Seite) verdeutlicht. VEAL30 scheint zu Beginn seiner Erklärung Schwierigkeiten zu haben, das Diagramm inhaltlich zu interpretieren. Er unterbricht seine Erklärung frühzeitig, da er nicht erklären kann, warum alle Graphen „am Anfang schneller als am Ende“ steigen (Zeilen 2 – 3). Als er erneut zum Erklären ansetzt (Zeile 4 ff.), scheint VEAL30 Vorstellungen bzw. Vorstellungsbilder zu ihm aus dem Unterricht bekannten (Schulbuch-)Diagrammen aktiviert zu haben, die wiederum das Leitmotiv Reaktionsgeschwindigkeit zu triggern scheinen. Er nutzt das Leitmotiv Reaktionsgeschwindigkeit nachfolgend zur Interpretation des Untersuchungsdiagramms (Zeilen 5 – 8). So führt er beispielsweise inkorrekt aus, dass im Verlauf der Reaktion „immer mehr Substrate“ (Zeile 6) hinzukommen würden und dass die Reaktionsgeschwindigkeit („Aktivität“, z. B. Zeile 6) steigen würde (Zeilen 5 – 6). VEAL30 scheinen die durch das Leitmotiv Reaktionsgeschwindigkeit entstehenden Widersprüche in seiner Erklärung bzw. seiner Interpretation (zumindest teilweise) bewusst zu sein. Da er diese im Verlauf seiner Erklärung allerdings nicht eigenständig auflösen kann, bricht er seine Erklärung

ab (siehe Zeile 9) und vermutet, dass die Graphen vertauscht seien. Er führt zweifelnd aus: „Entweder habe ich gerade einen totalen Logikfehler oder die Graphen von Ek0,5 und Sk0,5 sind vertauscht“ (Zeilen 9 – 10).

Darstellung der vollständigen Erklärung von VEAL30 (Interventionsgruppe I-S-EI-Erk, Novize):

- 1 Auf dem Diagramm kann man erkennen wie sehr sich die Produktkonzentration
2 über 20 min hinweg verändert. Alle Graphen steigen am Anfang schneller als am
3 Ende, was darauf schließen lässt, dass [Erklärung von VEAL30 unterbrochen].
4 Die Graphen sind am Anfang steiler als am Ende, weil am Anfang mehr Enzyme
5 als Substrate vorhanden sind und somit jedes Substrat binden kann, da jedoch die
6 Aktivität steigt, kommen immer mehr Substrate hinzu, sodass nicht mehr jedes
7 Substrat binden kann, deshalb wird es „langsamer“. Irgendwann hat es dann den
8 Punkt erreicht, dass die Aktivität gar nicht mehr steigen kann, da Substrate in
9 Überfluss da sind.
10 Entweder habe ich gerade einen totalen Logikfehler oder die Graphen von Ek0,5
11 und Sk0,5 sind vertauscht.
(vollständige Erklärung von VEAL30)

Der Lernende NAPE28 (Interventionsgruppe I-S-EI-Erk, Experte, siehe vollständige Erklärung auf der nächsten Seite) missinterpretiert die abhängige Variable ebenfalls als Reaktionsgeschwindigkeit („Umsetzungsgeschwindigkeit“, z. B. Zeile 3). Widersprüche zwischen den Daten und seiner Interpretation, die ihm insbesondere bei der Erklärung von Versuch SK05 bewusst zu werden scheinen, löst er – fachlich inkorrekt, aber für ihn zufriedenstellend – auf, indem er erklärt, dass jedes Enzym „eine bestimmte maximale Umsetzungsgeschwindigkeit“ habe (Zeilen 7 – 8). NAPE28 ignoriert dabei, dass in allen Ansätzen die gleichen Enzyme und Substrate verwendet wurden und sich die Wechselzahl der Enzyme und ihre Affinität zum Substrat daher nicht unterscheiden. Ähnlich wie bereits für den Lernenden VEAL30 beschrieben, treten weitere Widersprüche zwischen NAPE28s Interpretation und den Daten des Untersuchungsdiagramms auf, weil NAPE28 – beeinflusst durch das Leitmotiv Reaktionsgeschwindigkeit – annimmt, dass die Reaktionsgeschwindigkeit im Verlauf der Zeit zunehme (siehe Zeilen 3, 4 – 5). Allerdings scheint er gleichzeitig¹²⁴ zu erkennen, dass die Graphenverläufe das Gegenteil zeigen, nämlich dass die Reaktionsgeschwindigkeit

¹²⁴ Siehe Ausführungen zur *Kompartimentalisierung von Vorstellung* in Abschnitt 7.6.3.6 (vgl. Vinner, Hershkowitz & Bruckheimer 1981; Vinner & Dreyfus 1989)

in allen Versuchen im Verlauf der Zeit abnimmt. Um diesen Widerspruch aufzulösen, postuliert er fachlich inkorrekt, dass die Reaktionsgeschwindigkeit im Verlauf der Zeit, d. h. „nach Beginn der Zusammenführung (Enzym und Substrat) [...] von 0 aufwärts erst aufgebaut werden“ müsse (Zeilen 11 – 13).

Darstellung der vollständigen Erklärung von NAPE28 (Interventionsgruppe I-S-EI-Erk, Experte):

- 1 Die verschiedenen Umsetzungsgeschwindigkeiten lassen sich wie folgt erklären:
 - 2 In Versuch A ist das Verhältnis viel-viel optimal, daher der schnelle Anstieg und
 - 3 die hohe Umsetzungsgeschwindigkeit.
 - 4 Im Versuch EK0,5 ist das Verhältnis viel (Substrat)- wenig (Enzym), die Kurve
 - 5 steigt dadurch langsamer erreicht jedoch dieselbe Umsetzungsgeschwindigkeit.
 - 6 In SK0,5 hat man weniger Substrate und viele Enzyme. Diese Kombination ist
 - 7 langsamer, da jedes Enzym eine bestimmte maximale Umsetzungsgeschwindig-
 - 8 keit hat.
 - 9 Durch die enzyspezifische maximale Umsetzungsgeschwindigkeit lässt sich
 - 10 auch die Sättigung erklären, deswegen können die Graphen nicht linear verlaufen.
 - 11 Der Anstieg zu Beginn ist größer, da zu Beginn der Zusammenführung (Enzym
 - 12 und Substrat) die Geschwindigkeitsmessung beginnt und die Umsetzungsge-
 - 13 schwindigkeit von 0 aufwärts erst aufgebaut werden muss.
- (vollständige Erklärung von NAPE28.

7.6.3.2.2. Leitmotiv Enzym-Substrat-Komplex als Produkt der enzymatischen Reaktion

Neben dem Leitmotiv Reaktionsgeschwindigkeit konnte ein weiteres Leitmotiv in dieser Untersuchung identifiziert werden: das Leitmotiv *Enzym-Substrat-Komplex als Produkt der enzymatischen Reaktion*. Das Schemata basiert auf der Vorstellung, dass als Produkt der hier beschriebenen enzymatischen Reaktion *Enzym-Substrat-Komplexe (ESK)* entstehen würden. Im Folgenden wird daher hier verkürzt vom Leitmotiv *Enzym-Substrat-Komplex* gesprochen. Lernende, die von diesem Leitmotiv bei ihrer Interpretation des Untersuchungsdiagramms beeinflusst werden, scheinen sich dabei – vorzustellen, dass der Enzym-Substrat-Komplex (ESK) ein (schwerlöslicher) Komplex sei, der als Produkt aus der enzymatischen Reaktion hervorgeht. Fachwissenschaftlich gesehen ist eine derartige Vorstellung jedoch nicht korrekt. Der Enzym-Substrat-Komplex (ESK) ist ein kurzweiliger (10^{-5} bis 10^{-3} Sekunden) Übergangszustand und keinesfalls das

Produkt einer enzymatischen Reaktion (vgl. Löffler & Petrides 1990). In Abschnitt 7.3.3 wurden ungünstige Darstellungen in Schulbüchern beschrieben, die zur Entwicklung einer solchen (Fehl-)Vorstellung beitragen können.

Das Leitmotiv *Enzym-Substrat-Komplex* tritt häufig in Kombination mit dem zuvor beschriebenen Leitmotiv Reaktionsgeschwindigkeit auf. Lernende, die von diesem Leitmotiv betroffen sind, missinterpretieren die konstanten Graphenverläufe als (zeitlichen) Abschnitt, in dem sich Enzymmoleküle mit Substratmolekülen zu schwerlöslichen Enzym-Substrat-Komplexen verbinden. Die Lernende GIJO11 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Abstrahiererin) spricht daher hier beispielsweise vom „Erreichen des vollständigen Enzym-Substrat-Komplexes“ (GIJO11).

Beispielhaft sei das Leitmotiv *Enzym-Substrat-Komplex* anhand der Erklärung der Lernenden CHKL08 (Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk, Expertin, siehe vollständige Erklärung auf der nächsten Seite) erläutert. Diese formuliert in enger Anlehnung an die Darstellungen in den Schulbüchern: „Im dritten Abschnitt haben alle Versuche ihre maximale Produktkonzentration erreicht, da an dieser Stelle alle Enzyme von Substraten besetzt sind“ (Zeilen 6 – 7). Die Erklärung von CHKL08 ist aufgrund dieser Fehlvorstellung inkohärent und in sich widersprüchlich. Eigentlich müsste CHKL08, die über hohes enzymatisches Vorwissen verfügt, erkennen, dass im Falle einer solchen Vorstellung in den Versuchen A und EK05 nicht die gleiche ‚Produktkonzentration‘ erreicht werden kann, da in Versuch EK05 nur halb so viele Enzymmoleküle wie in Versuch A vorliegen. Entsprechende Widersprüche erkennt sie aber entweder nicht von alleine oder ignoriert sie vollständig. Stattdessen erklärt sie, dass in beiden Versuchen „das selbe Maximum“ (Zeile 10) erreicht werde, weil dort „alle Enzyme gleichzeitig beschäftigt werden“ (Zeilen 10 – 11). Unter ‚Beschäftigung‘ versteht sie das „Umsetzen der Substrate“ (Zeile 5) in einem anscheinend endlosen Prozess. Sie scheint zu schlussfolgern, dass die ‚Beschäftigung‘ der Enzyme zentral für die Höhe der Graphen sei. Sie überträgt diese Vorstellung auf den Versuch SK05 und erklärt, dass hier nicht „dasselbe Maximum“ (Zeile 10) wie in den Versuchen A und EK05 erreicht werden könne, weil hier mehr Enzymmoleküle als Substratmoleküle vorhanden sind und daher nicht alle Enzyme gleichzeitig „beschäftigt sind“ (Zeilen 12 – 13).

Darstellung der vollständigen Erklärung von CHKL08 (Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk, Expertin):

- 1 Zunächst steigen alle Graphen, da das Substrat erst beginnt auf die Enzyme zu
- 2 treffen. Der Grund wieso sie unterschiedlich schnell steigen, liegt an der Menge
- 3 des Substrates bzw. der Menge der Enzyme.
- 4 In dem zweiten Abschnitt steigt die Reaktionsgeschwindigkeit (v) langsamer, da
- 5 fast alle Enzyme am Umsetzen der Substrate sind.
- 6 Im dritten Abschnitt haben alle Versuche ihre maximale Produktkonzentration er-
- 7 reicht, da an dieser Stelle alle Enzyme von Substraten besetzt sind.
- 8 Die Kurve von Versuch A steigt steiler als die von Versuch Ek0,5, da sie sowohl
- 9 mehr Enzyme als auch Substrate vorfinden.
- 10 Versuch Ek0,5 und A haben dasselbe Maximum, da dort alle Enzyme gleichzeitig
- 11 beschäftigt werden und Versuch Sk0,5 hat ein anderes Maximum, da bei dem Ver-
- 12 such mehr Enzyme als Substrate vorhanden sind und somit nicht alle Enzyme be-
- 13 schäftigt sind.

(vollständige Erklärung von CHKL08)

Als besonders kreativ darin, Widersprüche ‚aufzulösen‘, erweist sich auch die Lernende MIFR15 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, KonkretisiererIn, siehe vollständige Erklärung auf der nächsten Seite). MIFR15 kann, beeinflusst durch das Leitmotiv *Enzym-Substrat-Komplex*, keine Erklärung dafür entwickeln, warum in Versuch EK05 die gleiche Produktkonzentration entsteht wie in Versuch A. Sie verbleibt in der Vorstellung, dass die Hälfte der Substratmoleküle „übrigbleiben“ (Zeile 4) und sich irgendwo anders binden müssen (siehe Zeilen 4 – 5). Allerdings scheint sie sich nicht vorstellen zu können, wo und wie das der Fall sein könnte. Diesen Aspekt offenlassend, versucht sie daher zunächst den Graphen zu Versuch SK05 zu erklären. Beeinflusst durch das Leitmotiv vermutet sie auch für Versuch SK05, dass aufgrund der reduzierten Substratkonzentration, die Hälfte der Enzymmoleküle übrigbleiben (siehe Zeilen 6 – 8) bzw. „verloren“ (Zeile 12) gehen müsse. Da der Verlauf des Graphen SK05 mit ihrer Vorstellung zumindest bei Analyse im Graphenraum vereinbar ist, scheint sie das in ihrer Vorstellung zu bestärken. Sie wendet sich daher in Zeile 9 erneut dem bisher noch ungeklärten Verlauf des Graphen EK05 zu und sucht nach einer Erklärung dafür, wo die übriggebliebenen Substratmoleküle (siehe vorausgegangene Ausführungen zu Zeilen 4 – 5) binden können. MIFR15 kommt fachlich inkorrekt

zu dem Schluss, dass sich in diesem Versuch neue Enzyme bilden würden (siehe Zeilen 9 – 11 bzw. 13 – 14).

Darstellung der vollständigen Erklärung von MIFR15 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, KonkretisiererIn):

1 Da sie in Versuch A von beiden gleichviel nahmen, konnten sie besser miteinander
2 reagieren und so gab es eine schnelle Bildung.

3 Da in Versuch Ek0,5 nur die halbe Enzymkonzentration vorhanden war, dauerte
4 es länger, da drei Substratmoleküle übrigbleiben und sich auch mit etwas binden
5 müssen.

6 Im Versuch Sk0,5 ist es ebenso, aber da sich das Substrat ans Enzym bindet, aber
7 nur drei vorhanden sind, dauert es länger und erreicht die Maximalhöhe nicht, da
8 drei übrigbleiben.

9 Beim Versuch Ek0,5 dagegen können die drei sich woanders binden, es bilden
10 sich neue Enzyme.

11 Nachträgliche Erklärung: Die Enzymkonzentrationen gehen beim Versuch Sk0,5
12 verloren, da Sk0,5 nur halb vorhanden ist. Dadurch kann es nie höher steigen als
13 6, da 6 die Hälfte von 12 ist. Bei den anderen beiden Versuchen ist dies möglich,
14 da sich die Enzymkonzentration neu bilden kann.

(vollständige Erklärung von MIFR15)

Die Lernende SUJU28 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, AbstrahiererIn, siehe vollständige Erklärung unten) wird von dem Leitmotiv *Enzym-Substrat-Komplex* sogar so stark beeinflusst, dass sie Enzym- und Substratmoleküle als „nutzlos“ (Zeile 3 und 8) bezeichnet, wenn sich diese nicht mit einem Partner zu dem vermeintlichen „Produkt“ verbinden können (siehe Zeilen 1 – 3).

Darstellung der vollständigen Erklärung von SUJU28 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, AbstrahiererIn):

1 Da in Versuch A die Konzentrationen von Enzym und Substrat gleich hoch sind,
2 können so auch viele Produkte gebildet werden. Deshalb hat man in kurzer Zeit
3 viele Produkte entwickeln können. Kein Enzym oder Substrat ist nutzlos.

4 Durch die Erniedrigung der Enzymkonzentration können nur halb so viele Pro-
5 dukte entstehen, aber da die Reaktion schnell abläuft, werden die restlichen Sub-
6 strate nach und nach umgewandelt, die Reaktionen verlaufen also langsamer.

7 Wenn die Substratkonzentration erniedrigt wird, dann werden die restlichen En-
8 zyme nutzlos und müssen für immer auf neue Substrate warten.

(vollständige Erklärung von SUJU28)

7.6.3.3 Analyse: fehlkonstruierte abstrakte Erklärungskonzepte

Verschiedene Lernende nutzten abstrakte enzymatische Konzepte, um die Verläufe der Graphen des Untersuchungsdiagramms kausal zu erklären. Häufig scheinen die Lernenden diese Konzepte aus Vorstellungen abzuleiten, die sie in Zusammenhang mit Unterrichtsdiagrammen erworben haben. Beispielhaft werden im Folgenden Lernerantworten präsentiert, in denen Lernende Konzepte aus den Themenbereichen Temperatur, Hemmung und Aktivierungsenergie fachlich inkorrekt auf das Untersuchungsdiagramm übertragen haben.

7.6.3.3.1. Temperatur

In den Schulbüchern wird vermittelt, dass mit zunehmender Temperatur die Teilchenbewegung von Substrat- und Enzymmolekülen zunimmt. Dadurch treffen Enzym- und Substratmolekül häufiger aufeinander. Bei zu hoher Temperatur *denaturiert* das Enzymmolekül jedoch. Entsprechend besitzt jedes Enzym ein (*Temperatur-*)*Optimum*, bei dem die Reaktionsgeschwindigkeit aufgrund der beschleunigten Teilchenbewegung erhöht ist, die jeweiligen Enzymmoleküle aber noch nicht denaturieren (vgl. z. B. Natura 2016, S. 50 f.).

Einzelne Lernende übertragen die genannten Konzepte unreflektiert und fachlich inkorrekt auf das Untersuchungsdiagramm. So nutzt die Lernende CHWI28 (Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk, Expertin, siehe vollständige Erklärung unten) beispielweise das Konzept „Denaturierung“ (Zeilen 1 – 2, 3), um zu erklären, warum die Graphen in dem Untersuchungsdiagramm gegen Ende der Reaktion nicht weiter steigen.

Darstellung der vollständigen Erklärung von CHWI28 (Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk, Expertin):

- 1 Wenn der Graph abflacht und parallel zur x-Achse verläuft findet die Denaturie-
- 2 rung statt, was bedeutet, dass sich die Struktur im aktiven Zentrum ändern und
- 3 sich keine Substrate mehr binden können. Diese Denaturierung findet bei dem
- 4 Versuch A und SK0,5 ziemlich zeitgleich statt. Also die Sättigung, wenn alle En-
- 5 zyme gebunden wurden.

(vollständige Erklärung von CHWI28)

SUST07 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Expertin, siehe vollständige Erklärung unten) konfundiert dagegen verschiedene Konzepte aus dem Themenbereich Enzymatik mit den Inhalten des Untersuchungsdiagramms. So erklärt SUST07 beispielsweise fachlich inkorrekt hinsichtlich Versuch EK05, vermutlich unter Erinnerung des Einflusses der Temperatur auf die Reaktionsgeschwindigkeit enzymatischer Reaktionen, „dass die Enzyme sich mit geringerer Enzymkonzentration nicht so schnell binden wie sonst, da sie sich nicht so schnell bewegen und dadurch seltener aufeinandertreffen“ (Zeilen 6 – 8). In Versuch EK05 bräuchten die Enzyme daher länger um „ein gewisses Optimum“ (Zeile 8) zu erreichen. SUST07 versteht das von ihr referierte Optimum als einen Zustand, in dem die Enzyme „ausgelastet sind und [...] die Reaktionen am schnellsten ablaufen“ (Zeilen 9 – 10). Für Versuch SK05 – der sich nicht mithilfe der zuvor aufgestellten Überlegungen erklären lässt – erklärt SUST07, dass hier kein „höheres Optimum“ (Zeile 13 – 14) erreicht werde, weil das Substrat bei einem ‚höheren Optimum‘ denaturiere (siehe Zeile 14).

Darstellung der vollständigen Erklärung von SUST07 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Expertin):

- 1 Der Verlauf der drei Kurven kann durch die verschiedenen Konzentrationen des
 - 2 Substrates oder des Enzyms erklärt werden.
 - 3 Bei der zweiten Kurve (EK05) wurde im Vergleich zu der ersten Kurve (A) die
 - 4 Enzymkonzentration um die Hälfte verringert. Als Ergebnis lässt sich sagen, dass
 - 5 dort die Reaktion in ca. gleicher Zeit, jedoch mit unterschiedlicher und geringerer
 - 6 Produktkonzentration abläuft. Dies zeigt, dass die Enzyme sich mit geringerer En-
 - 7 zymkonzentration nicht so schnell binden wie sonst, da sie sich nicht so schnell
 - 8 bewegen und dadurch seltener aufeinandertreffen. Allerdings erreichen sie am
 - 9 Ende ein gewisses Optimum, wo sie ausgelastet sind und wo die Reaktionen am
 - 10 schnellsten ablaufen.
 - 11 Die dritte Kurve, bei der nur mit halber Substratkonzentration gearbeitet wurde,
 - 12 zeigt den schnellsten Prozess der Reaktion, bei der Hälfte der Produktkonzentra-
 - 13 tion der anderen beiden Versuche. Das Substrat kann jedoch kein höheres Opti-
 - 14 mum erreichen, da sonst dieses denaturiert werden würde, d. h. das aktive Zentrum
 - 15 würde seine Form und Struktur verändern. Dadurch könnte sich das Enzym nicht
 - 16 mehr an dieses binden und es würde eine kompetitive Hemmung stattfinden.
- (vollständige Erklärung von SUST07)

SAIN11 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Abstrahiererin, siehe vollständige Erklärung unten) nutzt zur Erklärung ebenfalls das Konzept Optimum, versteht darunter allerdings anders als SUST07 „die bestmögliche Maximalgeschwindigkeit bei der bestmöglichen Produktivität“ (Zeilen 5 – 6). Sie nimmt an, dass Enzyme das intentionale Bestreben hätten (Enzyme „versuchen“, Zeile 9), eine „bestmögliche Geschwindigkeit zu erreichen“ (Zeilen 10 – 11). Sie vermutet, dass Enzyme, sobald sie ihr Optimum (siehe Zeilen 5 – 6) erreicht haben, nicht mehr schneller arbeiten können (siehe Zeile 8, 13, 16 – 17). Das Optimum werde dabei durch die Substratkonzentration bestimmt. Da es in Versuch SK05 weniger Substratmoleküle gibt, sei das Optimum („bestmögliche Produktivität“, Zeile 15-16) in Versuch SK05 entsprechend niedriger als in den anderen beiden Versuchen (Zeilen 13 – 14).

Darstellung der vollständigen Erklärung von SAIN11 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Abstrahiererin):

- 1 Im vorliegenden Diagramm kann man drei Verlaufswege erkennen.
- 2 Der dunkle Strich mit Messpunkten, die mit Punkten gezeitigt werden, zeigt einen
- 3 Verlauf, der am steilsten ansteigt.
- 4 Das liegt daran, dass eine gleichgroße Menge Enzyme und Substrate zusammen
- 5 auch gut, schnell und bis zu einem Optimum, welches für Enzyme die bestmögliche
- 6 Maximalgeschwindigkeit bei der bestmöglichen Produktivität darstellt. Das
- 7 heißt also, das Enzym kann bis zu einem speziellen Punkt steigen, danach ist je-
- 8 doch keine Steigung mehr zu sehen, da das Optimum erreicht wurde.
- 9 Wenn, wie im Versuch Ek0,5 anhand der Linie mit gekennzeichneten Messpunk-
- 10 ten anhand von Quadraten zu sehen ist, weniger Enzyme eingesetzt werden, ver-
- 11 suchen diese ebenfalls die bestmögliche Geschwindigkeit zu erreichen. Sie müs-
- 12 sen dazu jedoch mit mehr Substraten arbeiten. Trotzdem schaffen sie das, aller-
- 13 dings nur bis zum oben beschriebenen Optimum oder Maximum, welches in bei-
- 14 den Fällen bei einer Produktkonzentration von 12 liegt.
- 15 Gibt es, wie im letzten Versuch, weniger Substrate, muss auch eine geringere best-
- 16 mögliche Produktivität erreicht werden. Daher ist also auch das Maximum niedri-
- 17 ger.

(vollständige Erklärung von SAIN11)

7.6.3.3.2. Hemmung

Einzelne Lernende nutzen Konzepte aus dem Themenbereich *Hemmung enzymatischer Reaktionen*, um die Graphenverläufe zu erklären. Es sei vorab darauf hingewiesen, dass Hemmstoffe in den Lernmaterialien nicht erwähnt wurden und dort auch keine Rolle spielen.

Beispielhaft sei hier die Erklärung des Lernenden ELIG11 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Novize, siehe vollständige Erklärung unten) präsentiert. ELIG11 hat bereits im Vorwissenstest große Schwierigkeiten offenbart, sich Sachverhalte auf Teilchenebene vorzustellen. ELIG11 unterliegt dem Leitmotiv Reaktionsgeschwindigkeit und verwendet zusätzlich zur Erklärung der Graphenverläufe eine von ihm nicht näher erläuterte Art von Hemmung. Er vermutet, dass die reduzierte Enzymkonzentration irgendwie dazu führe, dass das Substrat „schlechter mit den Enzymen interagieren“ könne (Zeile 9). Die verminderte Enzymkonzentration hemme den Versuch und bedinge, dass „die Sättigung“ (z. B. Zeile 4, 9) später erreicht werde (siehe Zeilen 5 – 10).

Eine dazu analoge Vorstellung kann ELIG11 für den Versuch SK05 aber anscheinend nicht konstruieren (siehe Zeilen 11 – 13). Entsprechend erklärt er hinsichtlich Versuch SK05 lediglich verkürzt, dass hier „eine Hemmung des Substrates“ (Zeilen 11 – 12) erfolge. Wie aber ein Substrat gehemmt werden kann und welchen Einfluss dies auf die Interaktion mit dem Enzym haben könnte, scheint er sich nicht vorstellen zu können.

Darstellung der vollständigen Erklärung von ELIG11 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Novize):

- 1 In Versuch A verläuft das Experiment nach einem normalen Kurvenverlauf. En-
- 2 zyme reagieren mit dem Substrat und steigen immer weiter an. Dies erfolgt bis zu
- 3 einer Sättigungskurve, die v_{\max} erreicht hat. Ab dem Punkt verläuft die Kurve
- 4 stets gerade, da das Maximum an Sättigung erreicht wurde.
- 5 In Versuch B, bei dem nur die Hälfte der Enzymkonzentration vorhanden ist, ver-
- 6 läuft es anders. V_{\max} oder die Sättigung wird dort später erreicht. Die vermin-
- 7 derte Enzymkonzentration hemmt den Versuch und lässt die Konzentration viel
- 8 später v_{\max} erreichen. Aufgrund der verringerten Anzahl der Enzymkonzentra-
- 9 tion kann das Substrat schlechter mit den Enzymen interagieren. Dadurch entsteht
- 10 eine verspätete Sättigung des Experimentes.

11 Beim Versuch C wurde das Substrat verringert, wodurch eine Hemmung des Sub-
12 strates erfolgt, was zu Folge hat, dass die Sättigung des Experiments viel schneller
13 erreicht wird.

(vollständige Erklärung von ELIG11)

Eine ähnliche Vorstellung zur Hemmung besitzt auch IMHE11 (Kontrollgruppe K-Be-Erk, Abstrahiererin, siehe vollständige Erklärung unten). IMHE11 hat im Vorwissenstest hohe Abstraktionsfähigkeiten offenbart, verfügt aber nur über geringes deklaratives Vorwissen. Auch sie stellt die Vermutung auf, dass in Versuch EK05 eine Hemmung stattfindet, welche „die starke enzymatische Reaktion“ (Zeilen 10 – 11) verhindert. Die Hemmung führt sie allerdings nicht wie ELIG11 auf eine verringerte Konzentration von Enzym- oder Substratmolekülen zurück, sondern auf die in Relation zur Enzymkonzentration vergleichsweise hohe Substratkonzentration (siehe Zeilen 9 – 11).

Darstellung der vollständigen Erklärung von IMHE11 (Kontrollgruppe K-Be-Erk, Abstrahiererin):

1 Das Diagramm verdeutlicht die unterschiedlichen Reaktionen mit den jeweiligen
2 Enzymkonzentrationen und Substratkonzentrationen.
3 Der erste Versuch verläuft am stärksten und schnellsten, da die beiden Konzent-
4 rationen gleich sind und somit eine optimale Bedingung für eine enzymatische
5 Reaktion bilden.
6 Beim zweiten Versuch verläuft zwar eine gute Reaktion, jedoch etwas langsamer,
7 da mehr Enzyme vorhanden sind und zu wenig Substrate, die sich an die Enzyme
8 binden können.
9 Im letzten Versuch sind zu wenige Enzyme vorhanden. Durch die hohe Anzahl
10 der Substrate verläuft vermutlich eine Hemmung ab, die die starke enzymatische
11 Reaktion verhindert. Diese folgt aus der hohen Substratkonzentration.

(vollständige Erklärung von IMHE11)

Anders als ELIG11 und IMHE11, welche das Konzept Hemmung insbesondere verwenden, um die Steigung der jeweiligen Graphen zu erklären, nutzt die Lernende MIHU01 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Konkretisiererin, siehe vollständige Erklärung auf der nächsten Seite) das Konzept Hemmung, um die geringe Produktkonzentration in Versuch SK05 zu erklären.

MIHU01, die im Vorwissenstest erhebliche Schwierigkeiten beim Abstrahieren offenbart hat, aber über umfangreiches deklaratives enzymatisches Vorwissen verfügt, vermutet, dass sich, bedingt durch die reduzierte Substratkonzentration,

ein Hemmstoff an das Enzym binde (siehe Zeilen 5 – 8). Woher der Hemmstoff kommt und wie dieser sich auf die Reaktionen in den anderen Versuchen auswirken könnte, lässt sie offen.

Darstellung der vollständigen Erklärung von MIHU01 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, KonkretisiererIn):

- 1 Bei Versuch A erreicht die Konzentration aus Enzym und Substrat bei 12 mmol/l
- 2 das Maximum der erreichbaren Produktreaktion. Dies liegt daran, dass gleich viel
- 3 Substratkonzentration sowie Enzymkonzentration im Versuch A befinden, diese
- 4 sich dann miteinander binden und keine Hemmung entsteht.
- 5 Bei dem Versuch Sk0,5 mit halber Substratkonzentration liegt eine Hemmung vor,
- 6 da der Versuch 3 mmol/l weniger Substratkonzentration enthält als Enzymkon-
- 7 zentration. Also kommen weniger Enzym-Substrat-Komplexe zustande und es ist
- 8 wahrscheinlicher, dass sich ein Hemmstoff an das Enzym bindet.

(vollständige Erklärung von MIHU01)

7.6.3.3.3. Aktivierungsenergie

MAER20 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, KonkretisiererIn, siehe vollständige Erklärung unten) nutzt in ihrer Erklärung das Konzept *Aktivierungsenergie* und nimmt fachlich inkorrekt an, dass die für eine Reaktion erforderliche Aktivierungsenergie von Enzymmolekülen in eine Reaktion eingebracht werde. Sie vermutet, dass die zur Verfügung stehende Aktivierungsenergie abnimmt, je weniger Enzyme vorliegen, und dass weniger Aktivierungsenergie benötigt werde, je weniger Substrate umgesetzt werden müssen (siehe Zeilen 12 – 21). Da in Versuch EK05 weniger Enzymmoleküle vorliegen als in Versuch A läuft die Reaktion hier entsprechend langsamer ab (siehe Zeilen 14 – 18). In Versuch SK05 besteht dagegen, entsprechend der Vorstellung von MAER20, ein Überschuss an Energie (siehe Zeilen 19 – 21). Dieser Überschuss bedinge, dass die Reaktion in Versuch SK05 „in etwa doppelt so schnell wie in Versuch A“ (Zeile 21) ablaufen könne. Die Höhe der Graphen scheint somit für MAER20 gegen Ende ihrer Erklärung nicht mehr die Produktkonzentration zu symbolisieren, sondern die Reaktionsgeschwindigkeit in invertierter Form.

Darstellung der vollständigen Erklärung von MAER20 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, KonkretisiererIn):

- 1 Die Graphen verlaufen so wie sie es tun, da sich durch die Veränderungen in Sub-
- 2 strat- sowie Enzymkonzentration die Produktkonzentration verändert.

3 Bei dem Versuch A kann der Verlauf des jeweiligen Graphen so erklärt werden:
4 Dadurch, dass sowohl die Enzym- als auch die Substratkonzentration gleich sind
5 (6mmol/l), kann theoretisch jedes Substrat gleichzeitig an ein Enzym binden.
6 Durch die Diffusion passiert dies jedoch nicht sofort, sondern braucht dementspre-
7 chend viel Zeit. Ab etwa der 15. Min ist dies erreicht worden und es liegen ca.
8 50% Produkte vor, wobei Produkte durch die Enzyme wieder in ihre ursprüngliche
9 Form katalysiert werden und Substrate zu Produkten gespalten werden. Da die
10 Substratkonzentration und somit auch die Anzahl an Substraten begrenzt ist, ist
11 die Anzahl der Produkte dies ebenfalls (hier: 1 Substrat → 2 Produkten).
12 Hier ist ebenfalls die Aktivierungsenergie am höchsten vorhanden, wie an der star-
13 ken Erhöhung am Anfang der Kurve zu erkennen ist.
14 Beim Graphen Ek0,5, welcher vom Verlauf her leicht dem des Graphen A ähnelt,
15 liegen nur halb so viele Enzyme wie in Versuch A vor. Dies führt dazu, dass die
16 Aktivierungsenergie nicht so stark wie im vorherigen Versuch vorhanden ist, was
17 dazu führt, dass um ca. gleich viele Substrate und Produkte zu bekommen, die
18 Moleküle mehr Zeit benötigen.
19 Beim Versuch Sk0,5 ist es so, dass halb so viele Substrate, als bei Versuch A,
20 vorliegen. Dadurch wird weniger Aktivierungsenergie benötigt und Substrate und
21 Produkte werden in etwa doppelt so schnell wie in Versuch A katalysiert.
(vollständige Erklärung von MAER20)

FEAL23 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Novizin, siehe vollständige Erklä-
rung unten) überträgt das Konzept Aktivierungsenergie fachlich inkorrekt auf
Substratmoleküle. Sie konstruiert dabei ein neues Konzept, das sie als „Substrat-
Aktivierungsenergie“ (Zeilen 6 – 7, 9) bezeichnet. Die „Substrat-Aktivierungs-
energie“ (ebd.) scheint sie sich als eine Art Energie vorzustellen, die von der
Substratkonzentration ausgeht und sich nachteilig auswirkt, wenn die Substrat-
konzentration zu niedrig oder zu hoch in Relation zu der Enzymkonzentration ist
(siehe Zeilen 6 – 10). Lediglich in Versuch A scheint die Substrat-Aktivierungs-
energie nach Auffassung von FEAL23 zu ‚passen‘ (Zeile 2). Für Versuch EK05
nimmt sie dagegen an, dass hier aufgrund der hohen Substratkonzentration ein
„Katalysator“ (Zeile 8) notwendig sei, vermutlich, um die Substrat-Aktivie-
rungsenergie zu senken. Darstellung der vollständigen Erklärung von FEAL23
(Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Novizin):

1 Der Graph des Versuchs A verläuft so, da die Enzymreaktion und die Substrat-
2 konzentration ein Optimum besitzen. Die Aktivierungsenergie passt, deswegen

3 auch der schnelle Enzym-Substrat-Komplex. Der Graph des Versuchs B verläuft
4 so, da die Enzymkonzentration heruntergefahren wurde, was ja bekanntlich den
5 Enzym-Substrat-Komplex verlangsamt.
6 Der Graph des Versuches C (SK05) verläuft so, da eine geringe Substrat-Aktivie-
7 rungsenergie vorliegt.
8 Erweiterte Erklärung: Beim Versuch B (Ek0,5) ist ein Katalysator notwendig, da
9 die Substratkonzentration (Substrat-Aktivierungsenergie) zu hoch für das Enzym
10 ist.
(vollständige Erklärung von FEAL23)

7.6.3.4 Analyse: Gleichgewichtsvorstellungen

Als weitere Quelle für fehlerhafte Abduktion konnten in den Lernerantworten Vorstellungen zu Gleichgewichtskonzepten identifiziert werden. Insbesondere das Leitmotiv Enzym-Substrat-Komplex (siehe Abschnitt 7.6.3.2.2) scheint in enger Verbindung zu Gleichgewichtsvorstellungen zu stehen. In den jeweiligen Erklärungen finden sich dazu Formulierungen wie „Da sie in Versuch A von beiden gleichviel nahmen, konnten sie besser miteinander reagieren und so gab es eine schnelle Bildung“ (MIFR15, Zeilen 1 – 2, siehe Abschnitt 7.6.3.2.2).

Vorstellungen von Lernenden zu ‚Gleichgewichtskonzepten‘ wurden bereits in anderen Kontexten beobachtet (vgl. Sander 1998; Meir et al. 2005; Zuckerman 1994; zu einer Zusammenfassung siehe Hammann & Asshoff 2014). Beispielsweise nehmen Lernende an, dass Teilchen bei osmotischen Vorgängen aufhören, sich zu bewegen, wenn die Konzentrationen ausgeglichen sind (vgl. zu einer Übersicht verschiedener Studien Hammann & Asshoff 2014).

In der hier durchgeführten Untersuchung konnten zwei Arten von *Gleichgewichtsvorstellungen* ermittelt werden:

- I. Die Vorstellung, dass *wenn* Enzym- und Substratkonzentration *ausgeglichen* sind, die enzymatische Reaktion besonders gut ablaufen kann (*Gleichgewicht als Voraussetzung*), und
- II. die Vorstellung, dass eine enzymatische Reaktion nur so lange stattfindet, *bis* Enzym- und Substratkonzentration *ausgeglichen* sind (*Gleichgewicht als Zielzustand*).

Zu beiden Vorstellungen werden im Folgenden Beispiele angeführt.

7.6.3.4.1. Gleichgewicht als Voraussetzung

Verschiedene Lernende betrachten es als eine besonders geeignete Ausgangsbedingung für enzymatischen Reaktionen, wenn die Enzym- und Substratmoleküle in gleicher bzw. ausgeglichener Konzentration vorliegen.

Beispielhaft sei dies anhand der Erklärung der Lernenden SUTO26 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Abstrahiererin, siehe vollständige Erklärung unten) verdeutlicht. SUTO26 missversteht das Produkt der enzymatischen Reaktion als Enzym-Substrat-Komplex (siehe Zeilen 3 – 11; siehe dazu auch Ausführungen zum Leitmotiv Enzym-Substrat-Komplex in Abschnitt 7.6.3.2.2) und betrachtet aus diesem Grund eine ausgeglichene Konzentration der beiden Teilchensorten als besonders förderlich für die Reaktion. Deutlich wird dies beispielsweise an ihrer Formulierung: „Bei Versuch A ist die Substratkonzentration und die Enzymkonzentration im Gleichgewicht und so können mehr Produkte entstehen“ (Zeilen 7 – 8). Diese Vorstellung verfolgt SUTO26 konsequent weiter. So ist die Produktkonzentration in Versuch SK05 ihrer Meinung nicht deshalb geringer, weil hier weniger Substratmoleküle zu Produktmolekülen umgesetzt werden können, sondern weil es in diesem Versuch nicht allen Enzymen möglich sei, an ein Substrat zu binden (siehe Zeilen 13 – 14). Widersprüche zwischen ihren Ausführungen und den Versuchen EK05 und SK05 ignoriert SUTO26.

Darstellung der vollständigen Erklärung von SUTO26 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Abstrahiererin):

- 1 In Versuch ist zu erkennen, dass der Graph schnell steil ansteigt. In kurzer Zeit
- 2 erhöht sich die Produktkonzentration also stark.
- 3 Beim Versuch mit halber Enzymkonzentration (EK05) wird jedoch mehr Zeit be-
- 4 nötigt, um die gleiche Produktkonzentration zu erreichen wie bei Versuch A. Dies
- 5 liegt daran, dass weniger Enzyme und mehr Substrate vorhanden sind. So kann
- 6 nicht jedes Substrat von einem Enzym gebunden werden.
- 7 Bei Versuch A ist die Substratkonzentration und die Enzymkonzentration im
- 8 Gleichgewicht und so können mehr Produkte entstehen.
- 9 Beide Graphen erreichen jedoch bei 12 mmol/l ihr Maximum (v_{max}), hier
- 10 kommt es zur Stagnation, da zu diesem Zeitpunkt alle Substrate mit einem Enzym
- 11 gebunden sind.
- 12 Die Produktkonzentration von Versuch SK05 ist deutlich geringer, da hier nicht
- 13 ausreichend Substrate vorhanden sind. Viele Enzyme können so an kein Substrat
- 14 binden. (vollständige Erklärung von SUTO26)

Vorstellungen zum Gleichgewicht zeigen sich allerdings auch unabhängig von dem Leitmotiv Enzym-Substrat-Komplex.

Beispielhaft sei hier die Erklärung von ANMA17 (Kontrollgruppe K-Erk, Konkretisierer, siehe vollständige Erklärung unten) angeführt. ANMA17 scheint von dem Leitmotiv Enzym-Substrat-Komplex nicht betroffen zu sein. Sie führt beispielsweise explizit aus, dass in der betrachteten Reaktion ein Substratmolekül zu zwei Produktmolekülen gespalten wird (siehe Zeile 4). Trotzdem erklärt sie die geringe Steigung der Graphen zu den Versuchen EK05 und SK05 sowie die geringe maximale Produktkonzentration in Versuch SK05 damit, dass in diesen beiden Ansätzen keine ausgeglichene Konzentration vorliegen würde (siehe Zeilen 4 – 14). Sie erklärt, dass die Produktkonzentration in Versuch EK05 langsamer ansteige als bei Versuch A, weil in diesem Versuch „dem Substrat nur die halbe Enzymkonzentration zugeführt“ wurde (Zeilen 6 – 8). Ebenso könne ihrer Meinung nach in Versuch SK05 deshalb nicht die gleiche Konzentration wie bei Versuch A erreicht werden, weil hier „der Ausgleich zu der Enzymkonzentration“ fehle (Zeilen 13 – 14).

Darstellung der vollständigen Erklärung von ANMA17 (Kontrollgruppe K-Erk, Konkretisierer):

- 1 Versuch A mit Enzymkonzentration und Substratkonzentration steigert sich schon
 - 2 nach kurzer Zeit in der Produktkonzentration, da genauso viel Enzymkonzentra-
 - 3 tion wie Substratkonzentration vorhanden ist.
 - 4 Bei der Reaktion wird ein Substratmolekül in zwei Produktmoleküle gespalten.
 - 5 Bei dem Versuch mit halber Enzymkonzentration steigert sich die Produktkon-
 - 6 zentration nicht ganz so schnell wie bei Versuch A, da dem Substrat nur die halbe
 - 7 Enzymkonzentration zugeführt wird. Deshalb steigt die Produktkonzentration
 - 8 nicht so schnell an. Zum Ende bleibt die Kurve konstant, da die maximale Pro-
 - 9 duktkonzentration nach 15 Minuten erreicht ist.
 - 10 Bei dem dritten Versuch mit halber Substratkonzentration steigt der Graph am
 - 11 langsamsten an und erreicht schon bei 6 mmol/l den Höhepunkt und läuft dann
 - 12 nach 10 Minuten konstant, da dem Substrat nur die halbe Substratkonzentration
 - 13 hinzugeführt wurde und es daher nicht weiter ansteigen kann, weil der Ausgleich
 - 14 zu der Enzymkonzentration fehlt.
- (vollständige Erklärung von ANMA17)

Auch andere Lernende scheinen die Gleichgewichtsvorstellung unabhängig von dem Leitmotiv Enzym-Substrat-Komplex zu entwickeln. So geht die Lernende MADI24 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Abstrahiererin, siehe vollständige Erklärung unten) beispielsweise in ihrer Erklärung davon aus, dass die „gleiche [...] Konzentration von Enzym und Substrat“ (Zeilen 1 – 2) innerhalb eines Ansatzes zu einem „chemischen Gleichgewicht“ (Zeile 2) führe (siehe Zeilen 1 – 3). Unter einem chemischen Gleichgewicht stellt sich MADI24 einen positiv konnotierten Ausgangszustand vor, der es ermöglicht, dass „die Reaktion schneller ablaufen kann“ (Zeilen 3 – 4). Diese von ihr abduktiv gebildete Erklärungshypothese wird ihrer Meinung nach dadurch „unterstützt“ (Zeile 4), dass in den Versuchen EK05 und SK05 die Reaktionen langsamer ablaufen als im ersten Versuch A, in dem „das Enzym und das Substrat im chemischen Gleichgewicht“ (Zeilen 2 – 3) stehen (siehe Zeilen 1 – 5). In den Versuchen EK05 und SK05 stehen ihrer Auffassung nach die Ausgangskonzentrationen „nicht im chemischen Gleichgewicht“ (Zeile 6).

Darstellung der vollständigen Erklärung von MADI24 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Abstrahiererin):

- 1 Beim ersten Versuch wird deutlich, dass bei gleicher Konzentration von Enzym
- 2 und Substrat die Reaktion deswegen am schnellsten stattfindet, da hier das Enzym
- 3 und das Substrat im chemischen Gleichgewicht sind und somit die Reaktion
- 4 schneller ablaufen kann. Diese Feststellung unterstützt auch Versuch 2 und 3, da
- 5 hier die Konzentrationen von Enzym und Substrat unterschiedlich sind und somit
- 6 nicht im chemischen Gleichgewicht stehen.

(vollständige Erklärung von MADI24)

JEMA03 (Kontrollgruppe K- Be-Erk, Expertin, siehe vollständige Erklärung auf der nächsten Seite) verbindet ihre Vorstellung zum Gleichgewicht mit dem abstrakten Konzept Aktivierungsenergie. Ihr scheint bewusst zu sein, dass Enzyme die Aktivierungsenergie beeinflussen; welchen Einfluss dies auf die dargestellten Graphenverläufe genau haben kann, scheint sie sich allerdings nicht vorstellen zu können. Sie erklärt daher lediglich (siehe Zeilen 2 – 5), dass eine Verringerung der Enzymkonzentration zu einem Anstieg der notwendigen „Aktivierungsenergie“ (Zeilen 3 – 4) führe, da nun Substrat- und Enzymkonzentration nicht mehr „identisch“ (Zeile 2) seien. Dadurch benötige „der Ablauf mehr Zeit, wodurch die Sättigung der Produktkonzentration nicht so schnell erreicht“ (Zeilen 4 – 5) werde. JEMA03 scheint allerdings gleichzeitig bewusst zu sein, dass

eine derartige Erklärung nicht mit Versuch SK05 vereinbar ist, in dem die Enzymkonzentration genauso hoch ist wie die in Versuch A. Sie führt daher hier lediglich verkürzt aus, dass „eine ungleiche Verteilung“ (Zeilen 8 – 9) bzw. in diesem Fall spezifisch eine verringerte Substratkonzentration die Produktkonzentration irgendwie verändere bzw. verringere (Zeilen 8 – 10).

Darstellung der vollständigen Erklärung von JEMA03 (Kontrollgruppe K-Be-
Erk, Expertin):

- 1 Der Versuch mit einer halben Enzymkonzentration hat einige Minuten später ihre
- 2 Sättigung als der Versuch, bei dem beide Konzentrationen identisch waren. Das
- 3 liegt daran, dass durch die verringerte Enzymkonzentration die Aktivierungsenergie
- 4 gestiegen ist. Dadurch benötigt der Ablauf mehr Zeit, wodurch die Sättigung
- 5 der Produktkonzentration nicht so schnell erreicht wird.
- 6 Zu dem Versuch mit einer halben Substratkonzentration lässt sich sagen, dass die
- 7 Sättigung, wie bei dem Versuch A, nach ca. 15 Minuten erreicht ist. Dennoch liegt
- 8 eine sehr viel geringere Produktkonzentration vor. Das liegt daran, dass eine un-
- 9 gleiche Verteilung bzw. eine geringere Substratkonzentration die Produktkonzent-
- 10 ration verändert.

(vollständige Erklärung von JEMA03)

7.6.3.4.2. Gleichgewicht als Zielzustand

Während im vorherigen Abschnitt Erklärungen von Lernenden beschrieben wurden, in denen sich Gleichgewichtsvorstellungen zum Ausgangszustand der enzymatischen Reaktion finden, finden sich ebenso Gleichgewichtsvorstellungen, die sich auf den Endzustand der enzymatischen Reaktion beziehen. Diese werden im Folgenden beschrieben.

Beispielhaft sei hier die Lernende ALUL24 (Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk, Novizin, siehe vollständige Erklärung auf der nächsten Seite) genannt. ALUL24 hat bereits im Vorwissenstest erhebliche Schwierigkeiten beim Abstrahieren und Denken auf Teilchenebene offenbart und zeigt entsprechende Probleme auch in ihrer Erklärung. Sie interpretiert die konstanten Graphenabschnitte nicht als Ende der enzymatischen Reaktion bzw. als vollständige Umsetzung von Substrat- zu Produktmolekülen, sondern als „Ausgleich“ (z. B. Zeile 4) von Enzym- und Substratkonzentration: „Die [...] Kurven verlaufen irgendwann ineinander über und bleiben konstant, da die Substratkonzentration sowie die Enzymkonzentration sich irgendwann ausgleichen“ (Zeilen 7 – 9). Einen solchen ‚Ausgleich‘ im Verlauf einer enzymatischen Reaktion betrachtet ALUL24 als

besonders förderlich: „Durch einen Ausgleich von Enzym- und Substratkonzentration kann die höchstmögliche Produktkonzentration erzielt werden, da immer gleich viel Substrat mit Enzym in Reaktion treten kann“ (Zeilen 9 – 11).

Darstellung der vollständigen Erklärung von ALUL24 (Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk, Novizin):

- 1 Dadurch, dass die Substratkonzentration bei Versuch Sk0,5 größer ist als die En-
- 2 zymkonzentration, können die Enzyme nicht mit ihrer Reaktionsaufgabe hinter-
- 3 herkommen. Dadurch bleibt die Kurve irgendwann konstant, da die vorhandenen
- 4 Enzyme mit dem Substrat reagieren und ein Ausgleich entsteht. Trotzdem befindet
- 5 sich der Graph im unteren Abschnitt des Graphen, sprich die Produktkonzentration
- 6 ist gering.
- 7 Die anderen beiden Kurven verlaufen irgendwann ineinander über und bleiben
- 8 konstant, da die Substratkonzentration sowie die Enzymkonzentration sich irgend-
- 9 wann ausgleichen. Durch einen Ausgleich von Enzym- und Substratkonzentration
- 10 kann die höchstmögliche Produktkonzentration erzielt werden, da immer gleich
- 11 viel Substrat mit Enzym in Reaktion treten kann.

(vollständige Erklärung von ALUL24)

URBE22 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Novizin, siehe vollständige Erklärung auf der nächsten Seite) besitzt eine ähnliche Vorstellung, allerdings äußert sie dies weniger explizit als ALUL24.

URBE22 hat aus dem Informationsmaterial entnommen, dass Substratmoleküle „enzymatisch vollständig zu zwei Produktmolekülen gespalten werden“ (Zeilen 2 – 3; siehe dazu auch Abbildung 42 in Abschnitt 6.2.1.1). Obgleich sie ihre Erklärung somit fachlich korrekt beginnt, vermutet sie nachfolgend fachlich inkorrekt, dass in Versuch EK05 nur deshalb „dieselbe Menge an Produktkonzentration wie in Versuch A“ (Zeilen 6 – 7) erreicht werde, weil es hier, anders als in Versuch SK05, möglich sei, dass sich die Konzentrationen von Substrat- und Enzymmolekülen im Verlauf der Zeit durch den Abbau von Substratmolekülen ausgleichen (siehe Zeilen 4 – 7). Bestätigung für ihre ‚Ausgleichshypothese‘ sieht URBE22 insbesondere darin, dass sich die Produktmoleküle in den ersten 15 Minuten in Versuch EK05 schneller „vermehrten“ (Zeile 10) als in Versuch SK05 (siehe Zeilen 8 – 10). In Versuch SK05 kann ein solcher ‚Ausgleich‘ der Konzentration nicht stattfinden, da hier bereits zu Beginn der Reaktion weniger Substratmoleküle als Enzymmoleküle vorliegen und nur die Substratmoleküle abgebaut werden (siehe Zeilen 1 – 7).

Darstellung der vollständigen Erklärung von URBE22 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Novizin):

- 1 In Versuch Sk0,5 ist die Produktkonzentration niedriger als in Versuch Ek0,5, weil
2 in Versuch Ek0,5 mehr Substratmoleküle vorliegen und diese enzymatisch voll-
3 ständig zu zwei Produktmolekülen gespalten werden.
4 Dadurch, dass in Versuch Ek0,5 ein Überfluss an Substraten besteht, gleicht sich
5 durch den Abbau von Substraten die Konzentration von Substraten und Enzymen
6 aus und nach 15 Minuten findet sich in Versuch Ek0,5 dieselbe Menge an Pro-
7 duktkonzentration wie in Versuch A.
8 Diese Ausgleicheung der Produktkonzentration lässt sich auch gut daran erkennen,
9 dass in den ersten 15 Minuten in Versuch Ek0,5 die Produktmoleküle sich schnel-
10 ler vermehren als in Versuch SK05.
(vollständige Erklärung von URBE22)

7.6.3.5 Analyse: Anthropomorphistische Vorstellungen

Verschiedene Lernende tendieren dazu, in ihren Erklärungen den Molekülen menschliche Eigenschaften zuzuschreiben (vgl. Taber & Watts 2000; Höst & Anward 2017). Im Fokus stehen dabei insbesondere Vorstellungen von *Erschöpfung* und *Effizienzbestreben* der Enzyme. Häufig vermuten die betreffenden Lernenden, dass enzymatische Reaktionen dann besonders gut ablaufen können, wenn jedes Enzym maximal ein Substrat bearbeiten muss oder wenn mehrere Enzyme eine geringe Menge an Substraten verarbeiten können. Kennzeichnend für entsprechende Lernende ist insbesondere, dass sie annehmen, dass Enzyme, je nach Anforderungssituation, ihre *Arbeitsleistung eigenständig und bewusst steigern und reduzieren* können. Entsprechende Erklärungshypothesen sind zwar fachlich inkorrekt, lassen sich aber mithilfe der gegebenen Evidenzen häufig nicht widerlegen.

So führt beispielweise die Lernende MAOL08 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Expertin, siehe Erklärungsausschnitt auf der nächsten Seite) aus, dass ein Enzym in Versuch SK05 die Umsetzung der Substrate nicht so schnell wie in den anderen Versuchen katalysieren müsse, da in diesem Versuch ein Enzymmoleküle nicht mehr so viele Substratmoleküle zum Binden hat (siehe Zeilen 2 – 4). Sie scheint dabei, ähnlich wie zuvor auch für andere Lernenden beschrieben, zwischenzeitlich die Y-Variable als Reaktionsgeschwindigkeit zu interpretieren (siehe Leitmotiv Reaktionsgeschwindigkeit in Abschnitt 7.6.3.2.1).

Darstellung eines Abschnittes aus der Erklärung von MAOL08 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Expertin):

1 [...] Beim dritten Graphen von Versuch Sk0,5 liegt die Produktkonzentration nur
2 bei 6. Dies liegt daran, dass nun mehr Enzyme als Substrate vorhanden sind. Da
3 nun ein Enzym nicht mehr so viele Substrate zum Binden hat, muss es die Umset-
4 zung nicht so schnell katalysieren.

(Ausschnitt aus der Erklärung von MAOL08)

Der Lernende ANMI26 (Kontrollgruppe K-Be-Erk, Abstrahierer, siehe vollständige Erklärung unten) erklärt, dass in Versuch A „die Reaktion ohne weitere Probleme ablaufen [kann], da hier jedes Enzym ein Substrat bindet und nichts übergelassen wird“ (Zeilen 2 – 4). Die „Reaktionsgeschwindigkeit“ (Zeile 4) sowie die „Produktwerte“ (Zeile 4) seien daher in Versuch A „sehr gut“ (Zeile 5). ANMI26 scheint sich vorzustellen, dass die Enzyme in Versuch SK05, in dem eine reduzierte Substratkonzentration verwendet wurde, optimale Bedingungen vorfinden (Zeilen 12 – 15, siehe Gleichgewichtsvorstellungen im vorausgegangenen Abschnitt). Die Enzyme müssten hier lediglich eine vergleichsweise geringe Anzahl an Substraten verarbeiten und würden daher „nicht unter Zeitdruck stehen“ (Zeile 14). Jedes Enzym könne daher hier „ganz langsam arbeiten“ (Zeile 13). In Versuch EK05, in dem die Enzymkonzentration reduziert wurde, müssen die Enzyme dagegen „auf Maximalgeschwindigkeit [gehen], um [die] Substrate schnellstmöglich umzusetzen“ (Zeile 9 – 10). ANMI26 betont, dass deswegen „ein paar Probleme“ (Zeile 10) entstehen würden, und meint damit vermutlich die – in Relation zu Versuch A – reduzierte Reaktionsgeschwindigkeit. ANMI26 betont allerdings, dass diese Probleme „nicht wirklich schlimm“ (Zeile 10) seien, da „trotzdem viel produziert“ (Zeile 11) werde.

Darstellung der vollständigen Erklärung von ANMI26 (Kontrollgruppe K-Be-Erk, Abstrahierer):

1 Da beim Versuch A, obwohl eine Enzymkonzentration von 6 mmol/l vorliegt als
2 auch bei der Substratkonzentration 6 mmol/l, kann die Reaktion ohne weitere
3 Probleme ablaufen, da hier jedes Enzym ein Substrat bindet und nichts übergelas-
4 sen wird. Sowohl die Reaktionsgeschwindigkeit als auch die Produktwerte sind
5 sehr gut, da schon nach wenigen Minuten (10) schon fast 12 mmol/l produziert
6 wurde.

7 Versuch EK0,5 hat eine höhere Substratkonzentration, was bedeutet, dass jedes
8 Enzym ein Substrat hat aber nicht jedes Substrat ein Enzym, heißt die Enzyme

9 gehen auf Maximalgeschwindigkeit, um diese Substrate schnellstmöglich umzu-
10 setzen, deswegen entstehen ein paar Probleme, die aber nicht wirklich schlimm
11 sind, denn es wird trotzdem viel produziert.

12 Versuch SK0,5 hat eine höhere Enzymkonzentration, was bedeutet, dass nicht je-
13 des Enzym ein Substrat hat und die Enzyme können ganz langsam arbeiten, weil
14 sie nicht unter Zeitdruck stehen und somit entstehen wenig Produkte und es wird
15 auch viel Zeit benötigt.

(vollständige Erklärung von ANMI26)

Ähnlich wie der Lernende ANMI26 betont auch der Lernende PEFR07 (Kon-
trollgruppe K-Be-Erk, Novize, siehe vollständige Erklärung unten), dass En-
zyme in Versuch A bereits „sehr gut“ (Zeile 2) arbeiten können, weil hier „die
gleiche Anzahl von Enzymen und Substraten“ vorliege (Zeilen 1 – 2, siehe
Gleichgewichtsvorstellungen im vorausgegangenen Abschnitt). In Versuch
SK05 sei es für die Enzyme sogar noch „wesentlich entspannter“ (Zeile 4). Diese
könnten sich bei der Umsetzung daher Zeit lassen (Zeile 4). In Versuch EK05
gibt es jedoch weniger Enzyme als Substrate. Hier müsse daher nach Meinung
von PEFR07 „schneller gearbeitet werden“ (Zeile 6).

Darstellung der vollständigen Erklärung von PEFR07 (Kontrollgruppe K-Be-
Erk, Novize):

1 Da beim 1. Versuch, also bei Versuch A die gleiche Anzahl von Enzymen und
2 Substraten vorliegt, können die Enzyme sehr gut arbeiten.

3 Manchmal gibt es aber auch mehr Enzyme von der Anzahl her, was bedeutet, dass
4 die Enzyme wesentlich entspannter und langsamer arbeiten können, da es besser
5 funktioniert.

6 Wenn es weniger Anzahl an Enzymen gibt, muss auch schneller gearbeitet wer-
7 den, damit der Vorgang optimaler abläuft.

8 (vollständige Erklärung von PEFR07)

Es sei abschließend darauf hingewiesen, dass sich auch in weitere Erklärungen
Parallelen zwischen Gleichgewichtsvorstellungen und anthropomorphistischen
Zuschreibungen zeigten.

7.6.3.6 Synthese zu Niveau 3

Lernende, die auf Niveau 3 argumentieren, sind in der Lage, von der grafischen Darstellung des Diagramms zu abstrahieren und sich Interaktionen von Substrat- und Enzymmolekülen auf Teilchenebene vorzustellen. Ihre spezifischen inhaltlichen Vorstellungen nutzen sie, um die Verläufe der Graphen kausal zu erklären. Häufig entstammen ihre Erklärungshypothesen allerdings Situationsräumen bzw. mentalen Modellen – im Folgenden als Vorstellungen zusammengefasst –, die bereits an sich fachlich inkorrekt sind oder sich in dem Untersuchungskontext, d. h. bei Anwendung auf das Diagramm, als fachlich inkorrekt erweisen (vgl. Hammer 1996; Vosniadou 1994; Vosniadou & Brewer 1992; Hammann & Asshoff 2014; Schecker & Duit 2018).

Insbesondere konnte anhand verschiedener Lernerantworten gezeigt werden, dass ungeeignete Vorstellungen bereits die Interpretation des Diagramms verzerren können. Entsprechende Vorstellungen, die bereits die Interpretation des Diagramms verzerren, wurden als Leit motive bezeichnet (siehe Abschnitt 7.6.3.2). vor dem Hintergrund der Schulbuchanalyse in Abschnitt 7.3.3 wird angenommen, dass sie dadurch entstehen, dass Lernende die in Unterrichtsdiagrammen veranschaulichten – häufig abstrakten – enzymatischen Inhalte nicht angemessen bzw. fachlich korrekt rekonstruieren konnten. Es wird vermutet, dass sie stattdessen die in den Schulbüchern gegebenen Erläuterungen in Form prototypischer Interpretationsschemata – hier als Leitmotiv-Schemata bezeichnet – im Langzeitgedächtnis gespeichert haben (siehe Abschnitt 4.3.2). Es wird vermutet, dass Lernende, die von entsprechenden Leitmotiv-Schemata beeinflusst wurden, bei der Interpretation des Untersuchungsdiagramms einen ungeeigneten Situationsraum konstruierten, aus dem sie dann beim Erklären fachlich inkorrekte Erklärungshypothesen abduzierten.

Lernende auf Niveau 3 sind nicht dazu in der Lage, die Fehlerhaftigkeit ihrer abduzierten Erklärungshypothesen eigenständig zu erkennen (siehe dazu z. B. auch Ausführung zur *illusion of understanding* in Weidenmann 1989; Gerjets et al. 2006). In einzelnen Lernerantworten existierten fachlich korrekte und inkorrekte Vorstellungen im Sinne einer Kompartimentalisierung¹²⁵ nebeneinander, ohne dass den Lernenden daraus resultierende Widersprüche bewusst wurden

¹²⁵ Eine solche Kompartimentalisierung tritt auf, „when a person has two different, potentially conflicting schemes in his or her cognitive structure“ (Vinner & Dreyfus 1989, S. 357).

(vgl. Vinner, Hershkowitz & Bruckheimer 1981; Vinner & Dreyfus 1989). Erklärungen von Lernenden auf Niveau 3 sind daher häufig durch eine geringe inhaltliche Kohärenz gekennzeichnet. Selbst wenn Lernende auf Niveau 3 erkennen, dass die von ihnen abduzierten Erklärungshypothesen zueinander widersprüchlich sind, scheinen sie nicht dazu fähig zu sein, ihre abduzierten Vermutungen systematisch (induktiv) gegen die grafischen Evidenzen zu testen oder ihre einmal abduzierten Erklärungshypothesen zu revidieren (siehe Abbildung 67).

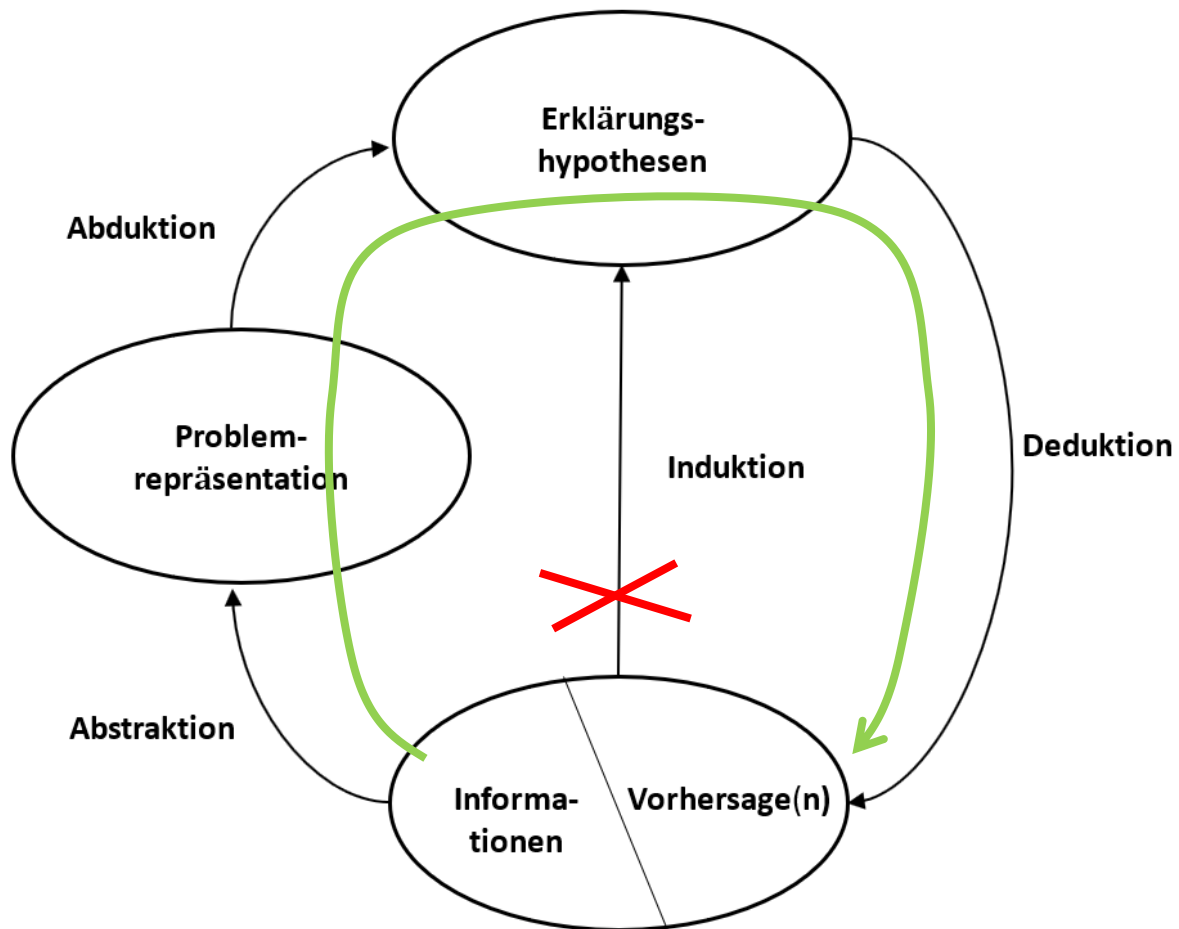


Abbildung 67. Abduktiver Kurzschluss beim Diagrammverstehen (eigene Darstellung aufbauend auf dem ST-Modell nach Stefanelli & Ramoni 1992, S. 10)

Daten, die zur Hypothesenrevision führen würden, werden von ihnen ignoriert oder uminterpretiert. Die Lernenden scheinen einer Art Bestätigungstendenz (*confirmation bias*) zu unterliegen, die in der Literatur zum Inquiry Learning bereits mehrfach beschrieben wurde (vgl. Chinn & Brewer 1993, 2001; Hammann et al. 2006; Hammann, Phan & Bayrhuber 2007; Klahr & Dunbar 1988; De Jong & van Joolingen 1998; Wason 1960; Lord, Ross & Lepper 1979). Auch für die Interpretation von Diagrammen wurde eine solche Tendenz bereits vermutet (vgl. Lachmayer et al. 2007; Sandoval 2001; Pereira-Mendoza & Mellor 1991;

Shah 2002; Shah & Hoeffner 2002; Freedman & Shah 2002; Shah et al. 2005). Empirische Hinweise darauf wurden bereits in den Abschnitten 4.2.3.2 und 4.4.2.2.3 präsentiert (siehe insbesondere Ausführungen zur Untersuchung von Pereira-Mendoza & Mellor 1991 in Abschnitt 4.2.3.2).

Es lässt sich zusammenfassen, dass Lernende auf Niveau 3 den in Abbildung 67 dargestellten epistemischen Kreislauf nicht vollständig durchlaufen. Analog zum *visuellen Kurzschluss* (siehe Synthese der Erkenntnisse zu Niveau 1 in Abschnitt 7.6.1.2) und zum *induktiven Kurzschluss* (siehe Synthese der Erkenntnisse zu Niveau 2 in Abschnitt 7.6.2.2), in denen Lernende jeweils einem verkürzten Erkenntnisprozess unterliegen, wird hier von einem *abduktiven Kurzschluss* gesprochen. In diesem abduzieren Lernende verschiedene Erklärungshypothesen und verschriftlichen sie, ohne die sich daraus ergebenden Vorhersagen (induktiv) zu testen. Auch hier wird der Erkenntnisprozess dadurch kurzgeschlossen (siehe Abbildung 67).

7.6.4. Niveau 4: Abduktives Erklären unter kritischer Evaluation von Schlussfolgerungen

Es konnten verschiedene Lernende identifiziert werden, die in der Lage sind, von der grafischen Darstellung zu abstrahieren, um im Situationsraum Erklärungshypothesen zu abduzieren, die sich bei Überprüfung widerspruchsfrei mit den Daten in Übereinstimmung bringen lassen. Es ist diese Widerspruchsfreiheit der abduzierten Erklärungen zu den Daten, die Lernende auf Niveau 4 von Lernenden auf Niveau 3 unterscheidet. Im Gegensatz zu Lernenden, die auf den Niveaus 5 und 6 agieren, erklären Lernende auf Niveau 4 die in dem Untersuchungsdiagramm referierte inhaltliche Situation zwar auf Teilchenebene, binden den Einfluss unterschiedlicher Teilchenkonzentrationen auf die Wahrscheinlichkeit, dass diese Teilchen aufeinandertreffen, allerdings nicht in ihre Erklärungen ein. Erklärungen, die das Vorgehen von Lernenden auf Niveau 4 veranschaulichen werden im Folgenden präsentiert.

7.6.4.1 Analyse der Lernerantworten

Die Lernende BRAN24 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Expertin, siehe vollständige Erklärung auf der übernächsten Seite) abstrahiert in ihrer Erklärung bereits frühzeitig von der grafischen Darstellung und wechselt vom Graphen- in den Situationsraum. Sie scheint sich die Interaktion einzelner Enzym- und Sub-

stratmoleküle und die Umsetzung von Substrat- zu Produktmolekülen auf Teilchenebene vorstellen zu können. So spricht BRAN24 beispielsweise nicht, wie Lernende, die auf Niveau 1 oder Niveau 2 argumentieren, davon, dass die Graphen A und EK05 sich treffen (siehe Ausführungen von Lernenden auf Niveau 1 in Abschnitt 7.6.1.1), sondern führt inhaltlich aus, dass „die gleiche Produktkonzentration in beiden Versuchen erreicht“ werde (Zeile 3). Sie erklärt dies korrekt damit, dass in beiden Versuchen die gleiche Substratkonzentration vorliegt (Zeilen 3 – 4). Zudem verwendet sie inhaltlich geprägte Formulierungen wie „nur die Hälfte der Enzyme“ (Zeilen 1 – 2), die darauf hindeuten, dass sie in der Lage ist, die Konzentrationen in den einzelnen Versuchen innerhalb des Situationsraums miteinander zu vergleichen. Lernende, die auf Niveau 1 oder Niveau 2 argumentieren, übernehmen hier meist unverändert die vorgegebenen Begriffe aus den Informationsmaterialien wie „halbe Enzymkonzentration“ oder „halbe Substratkonzentration“.

Vor dem Hintergrund des in Abschnitt 7.2.4 beschriebenen Select-&-Test-Modells (vgl. Stefanelli & Ramoni 1992) lassen sich Vermutungen darüber aufstellen, wie BRAN24 hier in einem hypothesengenerierenden und -testenden Verfahren vorgegangen sein könnte: Zunächst beobachtet BRAN24, dass die maximale Produktkonzentration, die in den Versuchen A und EK05 erreicht wird, identisch ist (siehe Zeile 3). BRAN24 weiß aus dem Informationsmaterial, dass „Enzyme [...] das Substrat in beiden Fällen zu zwei Produktmolekülen“ (Zeilen 4 – 5) umsetzen. Sie schlussfolgert darauf aufbauend abduktiv – ohne sich dabei sicher zu sein –, dass die Produktkonzentration in den Versuchen A und EK05 deshalb identisch ist, weil in beiden Versuchen die gleiche Substratkonzentration vorliegt (Zeilen 3 – 4). Darauf aufbauend leitet BRAN24 – nach außen nicht direkt sichtbar – von der abduzierten Erklärungshypothese deduktiv Vorhersagen ab, zum Beispiel: Wenn die Substratkonzentration gleich ist, muss auch die Produktkonzentration gleich sein. Mithilfe der Vorhersagen testet sie ihre Erklärungshypothese anhand der Daten und schlussfolgert induktiv (prüfend) am Ende ihres ersten Erkenntniszyklus: „[d]a die Substratkonzentration die gleiche ist, ist auch die Produktkonzentration die gleiche“ (Zeile 5). Ähnlich, allerdings stark verkürzt, geht sie vor, um zu erklären, warum in Versuch SK05 „nur die Hälfte der Produktkonzentration der beiden anderen Versuche erreicht“ (Zeilen 7 – 8) wird (siehe Zeilen 7 – 11).

Es lässt sich somit begründet vermuten, dass BRAN24 in der Lage ist, Erklärungshypothesen zu abduzieren, sie gegen die Graphenverläufe zu testen und –

anders als Lernende auf Niveau 3 – so lange ungeeignete Erklärungshypothesen zu verwerfen, bis nur noch zu den Daten widerspruchsfreie Hypothesen bestehen bleiben. Diese Hypothesen scheint sie zusätzlich mithilfe der Daten zu verifizieren. BRAN24 zeigt allerdings – anders als Lernende, die auf Niveau 5 und 6 agieren – keinerlei Ansätze des Denkens in Wahrscheinlichkeiten. Die Abduktion komplexerer Erklärungshypothesen, unter Einbezug abstrakterer Erklärungselemente, scheint ihr daher nicht möglich zu sein. Sie kann folglich nicht erklären, warum sich die Steigung der Graphen bzw. die Reaktionsgeschwindigkeiten der enzymatischen Reaktionen in den einzelnen Versuchen unterscheiden. BRAN24 beschreibt daher lediglich – ohne dies im Situationsraum zu erklären –, dass der Graph des Versuches EK05 flacher verläuft als der von Versuch A, weil in Versuch EK05 nur halb so viele Enzymmoleküle an der Reaktion beteiligt sind wie in Versuch A (Zeilen 1 – 2).

Darstellung der vollständigen Erklärung von BRAN24 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Expertin):

- 1 Der Graph von Ek0,5 verläuft flacher als der von A, weil nur die Hälfte der En-
- 2 zyme an der Reaktion beteiligt ist.
- 3 Trotzdem wird die gleiche Produktkonzentration in beiden Versuchen erreicht,
- 4 weil die Substratkonzentration gleich ist. Die Enzyme setzen das Substrat in bei-
- 5 den Fällen zu zwei Produktmolekülen um. Da die Substratkonzentration die glei-
- 6 che ist, ist auch die Produktkonzentration die gleiche.
- 7 Bei dem Versuch Sk0,5 wird nur die Hälfte der Produktkonzentration der beiden
- 8 anderen Versuche erreicht, weil auch nur die Hälfte der Substratkonzentration vor-
- 9 handen ist. Eine bestimmte Menge an Substraten kann nur zu einer bestimmten
- 10 Menge an Produkten umgesetzt werden. Deshalb verläuft dieser Graph nur halb
- 11 so hoch wie die anderen.
- 12 (vollständige Erklärung von BRAN24)

Auch der Lernenden ANIN13 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Novizin, siehe vollständige Erklärung auf der nächsten Seite) gelingt es, ähnlich wie zuvor für BRAN24 beschrieben, widerspruchsfreie Erklärungshypothesen für den Verlauf der Graphen zu formulieren. Genau wie BRAN24 ist allerdings auch sie nicht dazu in der Lage, in Wahrscheinlichkeiten zu denken. Nachdem sie mehrfach erfolglos versucht hat (siehe Zeilen 4 – 5, 18 – 19), den Einfluss der Enzymkonzentration auf „den Ablauf“ (Zeile 22) der enzymatischen Reaktion zu erklären, betont sie explizit, dass sie nicht dazu fähig sei (siehe Zeile 23). Genau wie BRAN24 kann daher auch ANIN13 das Diagramm nicht umfassend erklären.

Darstellung der vollständigen Erklärung von ANIN13 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Novizin):

- 1 Das Diagramm der Abbildung 1 zeigt, dass bei Versuch A und bei Versuch EK0,5
- 2 letztendlich die gleiche Produktkonzentration erreicht wird, während die Produkt-
- 3 konzentration bei Versuch SK0,5 nur exakt halb so hoch ist.
- 4 Die unterschiedlichen Verläufe zum Erreichen der Produktkonzentration lassen
- 5 sich durch die Anzahl der Enzyme erklären.
- 6 Die Produktmenge bei den ersten beiden Versuchen (A und EK05) ist gleich, da
- 7 es gleichviele Substrate zu spalten gibt. Es entsteht auch die gleiche Produktkon-
- 8 zentration.
- 9 Die Menge der Enzyme verändert folglich nur die momentane Steigung des Dia-
- 10 gramms, allerdings nichts am Ergebnis.
- 11 Der dritte Versuch, Versuch SK0,5, erreicht nur die Hälfte der Produktkonzentra-
- 12 tion, das liegt daran, dass es zwar gleichviele Enzyme wie bei Versuch A gibt,
- 13 allerdings nur die Hälfte der Substratkonzentration zugefügt wird (im Vergleich
- 14 zu den anderen Versuchen).
- 15 Da Enzyme die Substratmoleküle in zwei Produktmoleküle spalten und es nur die
- 16 Hälfte an Substratmolekülen beigefügt wird, können auch nur halb so viel Pro-
- 17 dukt-moleküle entstehen, unabhängig von der Enzymkonzentration.
- 18 Folglich ändert die Enzymkonzentration lediglich den zwischenzeitlichen Verlauf,
- 19 allerdings nicht das Endergebnis der Versuche, während die Substratkonzentration
- 20 unmittelbar mit der Produktkonzentration verbunden ist, da aus den Substraten
- 21 durch die Hilfe von Enzymen erst Produkte entstehen.
- 22 Warum verändert die Konzentration der Enzyme den Ablauf, aber nicht das finale
- 23 Ergebnis? Hatte ich nicht vergessen, kann ich aber nicht erklären.
- 24 (vollständige Erklärung von ANIN13)

Um die unterschiedliche Steigung der jeweiligen Graphen zu erklären, entwickeln teilweise auch Lernende auf Niveau 4 alternative Erklärungen, die nicht auf probabilistischer Ebene liegen.

Anders als bei Lernenden, die auf Niveau 3 agieren, stehen ihre Erklärungshypothesen jedoch nicht in offensichtlichem Widerspruch zu den Daten und den

bis dato behandelten Unterrichtsinhalten und können vor dem Hintergrund der Stichprobe sogar als angemessene Erklärungen betrachtet werden¹²⁶.

Lernende auf Niveau 3 nehmen beispielsweise an, dass Enzymmoleküle ihre Umsetzungsgeschwindigkeit selbstgesteuert regulieren können (siehe dazu Ausführungen zu anthropomorphistischen Vorstellungen in Abschnitt 7.6.3.5). Von dieser (anthropomorphistischen) Vorstellung betroffene Lernende erklären, dass Enzyme schneller arbeiten würden, wenn dies notwendig sei, um eine bestimmte Substratmenge möglichst schnell umzusetzen, und langsamer, wenn ein schnelles Arbeiten aufgrund einer verringerten Anzahl an Substratmolekülen nicht (mehr) notwendig sei. Um Widersprüche zu den Daten aufzulösen, schreiben sie den Enzymmolekülen einen eigenen Willen zu und ignorieren dabei naturwissenschaftliche Grundlagen, über die sie in der Jahrgangsstufe EF bereits verfügen (sollten). Entsprechende Erklärungen werden daher als nicht angemessen betrachtet (siehe dazu insbesondere auch auf Ausführungen zur Untersuchung von Pereira-Mendoza & Mellor 1991 in Abschnitt 4.2.3.2 verwiesen).

Lernende auf Niveau 4 zeigen dagegen Erklärungen, die zwar fachlich nicht uneingeschränkt korrekt sind, vor dem Hintergrund ihres Vorwissens aber als durchaus angemessen betrachtet werden können. Sie betrachten beispielsweise die katalytische Effizienz¹²⁷ eines Enzyms – die sie als ‚Arbeitskraft‘ umschreiben – als einzigen Faktor für die Geschwindigkeit einer enzymatischen Reaktion. Sie vermuten, unter Vernachlässigung der Kollisionswahrscheinlichkeit, dass bei reduzierter Enzymkonzentration die Enzyme aufgrund der dadurch insgesamt ‚verringerten Arbeitskraft‘ einfach vergleichsweise mehr Zeit benötigen würden,

¹²⁶ Zu einer ausführlichen Diskussion darüber, was unter angemessenen fachlichen Erklärungen zu verstehen ist, sei auf Ausführungen von Tall und Vinner (1981) zu *concept images* und (*formal*) *concept definitions* verwiesen. Unter einer *formal concept definition* verstehen die Autoren unter Bezug auf mathematische Konzepte beispielsweise eine Erklärung, die von der (mathematischen) wissenschaftlichen Community als fachlich korrekt akzeptiert wird. Ein *concept image* definieren sie dagegen als „all the cognitive structure in the individual's mind that is associated with a given concept. This may not be globally coherent and may have aspects which are quite different from the formal concept definition“ (ebd., S. 151) und ergänzen „It is built up over the years through experiences of all kinds, changing as the individual meets new stimuli and matures“ (ebd., S. 152). Ein *concept image* kann daher durchaus (vorübergehend) in Konflikt zu einer als fachwissenschaftlich korrekt betrachteten Erklärung stehen. Als problematisch erweist es sich erst dann, wenn in Konfliktsituationen, in den widersprüchliche *concept images* aufeinandertreffen, diese Widersprüchlichkeit (*cognitive conflict*) von den Lernenden nicht erkannt wird.

¹²⁷ Die katalytische Effizienz ist der Quotient aus der Wechselzahl (turnover rate) und Affinität des Enzyms zum Substrat (Michaelis-Konstante, K_M) (vgl. Heinrich et al. 2014).

um die Substratmoleküle umzusetzen. Im Folgenden wird dies als *Arbeitskraft-Hypothese* bezeichnet. Problematisch ist, dass die Lernenden durch Verwendung der Arbeitskraft-Hypothese den Situationsraum stark einschränken. Da sie beispielsweise mithilfe der *Arbeitskraft-Hypothese* die verringerte Reaktionsgeschwindigkeit in Versuch SK05 nicht kausal-mechanistisch erklären können, ignorieren sie diesen Aspekt entweder vollständig oder beschreiben sehr allgemein, dass die reduzierte Anzahl an Substratmolekülen bedinge, dass weniger Produktmoleküle gebildet werden können.

Beispielhaft sei dies anhand der Erklärung der Lernenden GERA08 (Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk, Expertin, siehe vollständige Erklärung auf der nächsten Seite) aufgezeigt. GERA08 verfügt über sehr hohes deklaratives enzymatisches Vorwissen¹²⁸. Ihr gelingt es, mehrere Graphenabschnitte korrekt zu erklären. GERA08 scheint zu wissen, dass die katalytische Umsetzung von Substrat zu Produktmolekülen sehr schnell abläuft. Dass die entsprechenden Moleküle dazu aber zunächst aufeinandertreffen müssen, bezieht sie nicht explizit in ihre Überlegungen ein (siehe Zeilen 1 – 4). Sie scheint sich stattdessen eine ‚gleichmäßige Verteilung‘ der Teilchen vorzustellen (siehe Zeilen 11 -13) und spricht davon, dass „zeitgleich alle Substrate katalysiert werden können“ (Zeile 3).

Da sie nicht in Wahrscheinlichkeiten denken kann, bereitet es ihr Schwierigkeiten zu erklären, warum die Produktkonzentration in Versuch EK05 langsamer zunimmt als in Versuch A. GERA08 erklärt daher lediglich oberflächlich (siehe Zeilen 14 – 15), obwohl sie eigentlich weiß, dass die Katalyse sehr schnell erfolgt, dass in Versuch EK05 „die wenigen Enzyme mehrere Substrate katalysieren“ (Zeile 14) müssen und dass dies, verglichen mit Versuch A, ganz einfach „mehr Zeit in Anspruch“ (Zeile 15) nehme.

Die verringerte Reaktionsgeschwindigkeit in Versuch SK05 erklärt sie ausschließlich, im Sinne einer Beschreibung, mit der verringerten Anzahl an Substratmolekülen und der dadurch bedingten verringerten Anzahl an Produktmolekülen (siehe Zeile 5 – 7).

¹²⁸ Hinsichtlich des Faktors konkretes Schlussfolgern (siehe Abschnitt 7.3.1) hat GERA08 über alle Lernenden hinweg den zweithöchsten Faktorscore erreicht. Beim abstrakten Schlussfolgern liegt die Leistung von GERA08 allerdings nur knapp über dem Mittelwert.

Darstellung der vollständigen Erklärung von GERA08 (Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk, Expertin):

- 1 Das Diagramm zeigt die Produktkonzentration im Verlauf von 20 Minuten. Der
- 2 Graph von Versuch A steigt zunächst steiler an als die Graphen Sk0,5 und Ek0,5.
- 3 Dies liegt daran, dass bei Versuch A zeitgleich alle Substrate katalysiert werden
- 4 können und somit schnell viele Produkte entstehen.
- 5 Graph Sk0,5 steigt am flachsten an, da es nur eine begrenzte Zahl von Substraten
- 6 vorhanden ist und somit auch nur diese begrenzte Anzahl zu Produkten umgewan-
- 7 delt werden können. Dies erklärt ebenfalls, warum bei diesem Versuch nur eine
- 8 Produktkonzentration von 6 mmol/l erreicht wird.
- 9 Versuch A und Versuch Ek0,5 haben nach den 20 Minuten die gleiche Anzahl von
- 10 Substraten umgewandelt und somit haben beide auch die gleiche Anzahl von Pro-
- 11 dukten erreicht. Ein Unterschied ist allerdings, dass die Reaktion bei Versuch A
- 12 schneller ablaufen konnte aufgrund der gleichmäßigen Verteilung von Substraten
- 13 und Enzymen.
- 14 Bei Versuch Ek0,5 müssen die wenigen Enzyme mehrere Substrate katalysieren
- 15 und somit nimmt dies mehr Zeit in Anspruch.
(vollständige Erklärung von GERA08)

7.6.4.2 Synthese zu Niveau 4

Lernende argumentieren auf Niveau 4, wenn es ihnen gelingt, den Verlauf der Graphen durch das Anführen von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen auf Teilchenebene widerspruchsfrei zu den grafisch dargestellten Evidenzen zu erklären. Es ist diese Widerspruchsfreiheit der abduzierten Erklärungshypothesen zu den grafischen Evidenzen/den Daten, die Lernende auf Niveau 4 von Lernenden auf Niveau 3 unterscheidet.

Vor dem Hintergrund des Select-&-Test-Modells ist zu vermuten (siehe grüner Pfeil in Abbildung 68), dass es Lernenden auf Niveau 4 frühzeitig gelingt, von der grafischen Darstellung zu abstrahieren und eine geeignete Problemrepräsentation bzw. einen geeigneten Situationsraum zu konstruieren. Ausgehend von diesem Situationsraum abduzieren sie Erklärungshypothesen. Anders als Lernende auf Niveau 3 scheinen Lernende auf Niveau 4 dabei entweder direkt fachlich korrekte Erklärungshypothesen zu abduzieren oder aber sie evaluieren ihre Hypothesen bzw. die daraus deduzierten Vorhersagen kritisch, indem sie diese gegen die Daten testen. Hypothesen, die sich widerspruchsfrei mit den Graphenverläufen in Übereinstimmung bringen lassen, scheinen von Lernenden – in

Form eines einfachen Erkenntniszyklus – bestätigt zu werden. Zu den Daten widersprüchliche Hypothesen scheinen die Lernenden dagegen so lange zu modifizieren und zu revidieren, bis sie aus den verbleibenden Erklärungshypothesen ein neues, verbessertes mentales Modell konstruieren können, das ihnen weniger widersprüchlich zu den Daten oder zu ihrem Vorwissen erscheint.

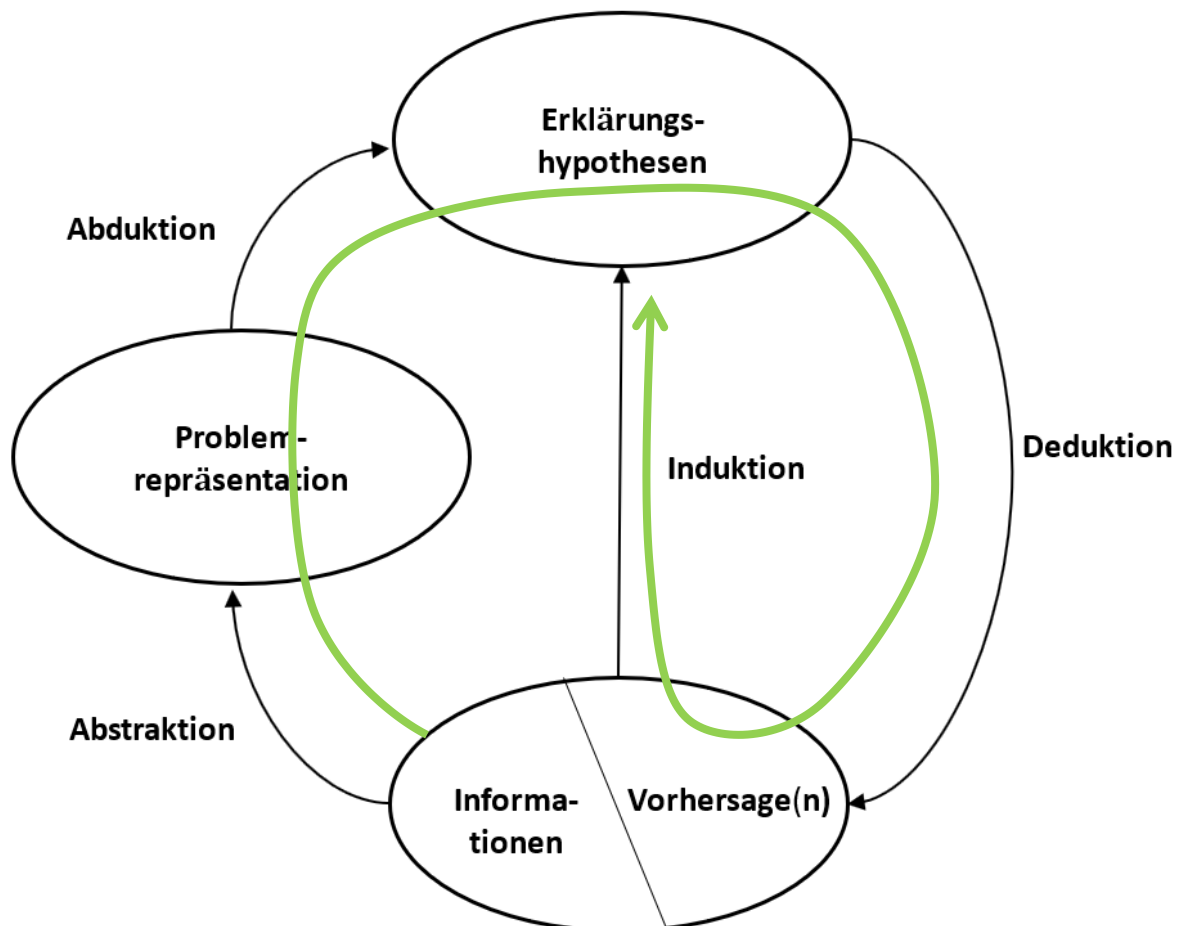


Abbildung 68. Einfacher, vollständiger Erkenntniszyklus beim Diagrammverstehen (eigene Darstellung aufbauend auf dem ST-Modell nach Stefanelli & Ramoni 1992, S. 10)

Da Lernende auf Niveau 4 dabei die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym- und Substratmoleküle aufeinandertreffen, nicht in ihre Erklärung einbeziehen, lässt sich vermuten, dass sie beim Abduzieren nur begrenzt bzw. zu einem geringeren Ausmaß als Lernende auf Niveau 5 und 6 Erklärungsebenen innerhalb des Situationsraums miteinander vernetzen (siehe Ausführungen zu Translationsprozessen innerhalb des Situationsraums in Abschnitt 3.7.2).

7.6.5. Niveau 5: Eingeschränktes Denken in Wahrscheinlichkeiten

Lernende auf Niveau 5 können, anders als Lernende auf den niedrigeren Niveaus, probabilistische Überlegungen in ihre Erklärungen der Graphenverläufe einbeziehen. Im Gegensatz zu Lernenden, die auf Niveau 6 agieren, gelingt ihnen dies aber nur eingeschränkt. Beispielhafte Lernerantworten werden im Folgenden präsentiert.

7.6.5.1 Analyse der Lernerantworten

Die Lernende HEKL01 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, Konkretisiererin, siehe vollständige Erklärung auf der nächsten Seite), die über hohes deklaratives enzymatisches Vorwissen verfügt, kann sich die in dem Diagramm referierte Situation grundsätzlich auf Teilchenebene vorstellen und – anders als Lernende auf den niedrigeren Niveaus – bereits eingeschränkt in Wahrscheinlichkeiten denken. Sie erkennt fachlich korrekt, dass eine hohe bzw. eine erhöhte Konzentration an Teilchen die Wahrscheinlichkeit steigert, mit der diese aufeinandertreffen (siehe Zeilen 5 – 7). HEKL01 führt, um den Verlauf des Graphen zu Versuch A zu erklären, als erklärendes Konzept sogar die brownische Bewegung an („Brownian Motion“, Zeile 5). Allerdings gelingt es ihr nicht, den von ihr zu Versuch A identifizierten Zusammenhang *hohe Konzentrationen an Teilchen = hohe Wahrscheinlichkeit des Aufeinandertreffens* analog auf die Versuche EK05 und SK05 zu übertragen. Die geringere Steigung des Graphen zu Versuch EK05 scheint sie sogar zu überraschen: „Auffällig ist, dass die maximale Produktkonzentration in einer flacheren Kurve erreicht wird, die Bildung vom Produkt also in einer gleichmäßigeren Weise abläuft“ (Zeilen 11 – 13). Abduktiv sucht sie nach einer geeigneten Erklärungshypothese. Dabei wird HEKL01 – ähnlich wie auch bereits für Lernende auf Niveau 4 berichtet (siehe Abschnitt 7.6.4.1) – von der Alltagsvorstellung beeinflusst, dass Enzyme für die gleiche „Arbeit“ (Zeile 13) einfach mehr Zeit benötigen würden (*Arbeitskraft-Hypothese*). Sie erklärt: „Die ‚Arbeit‘ der eigentlichen Enzyme wurde auf die Hälfte dieser verteilt und kann deshalb erst in einer längeren Reaktionszeit zum gleichen Ergebnis kommen“ (Zeilen 15 – 17). Die Tatsache, dass die Steigung des Graphen zu Versuch SK05 ebenfalls gering ist, ignoriert sie dagegen vollständig. Ebenso thematisiert sie nicht, dass die Reaktionsgeschwindigkeit (aufgrund der Abnahme an Substratmolekülen und der damit verringerten Wahrscheinlichkeit des Aufeinandertreffens der Teilchen) in allen drei Versuchen im Verlauf der Zeit

abnimmt. Es lässt sich daher zusammenfassen, dass HEKL01, obgleich sie verstanden hat, dass eine Erhöhung der Teilchenzahl die Wahrscheinlichkeit steigert, dass Enzym- und Substratmoleküle aufeinandertreffen, sich anscheinend nicht vorstellen kann, welchen Einfluss eine Reduzierung der Teilchenzahl hat. HEKL01 denkt folglich unvollständig in Wahrscheinlichkeiten.

Darstellung der vollständigen Erklärung von HEKL01 (Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk, KonkretisiererIn):

1 Anhand der Graphen kann man die Verlaufskurve der Enzymproduktivität bei An-
2 wendung verschiedener Enzym- und Substratkonzentrationen erkennen.
3 Der Graph des Experiments A zeigt die große Produktivität des Enzyms in der
4 kürzesten Zeit, da bei diesem Versuch sowohl eine hohe Enzym- als auch eine
5 hohe Substratkonzentration verwendet wurde. Durch die Brownian Motion und
6 die hohe Menge an Substraten und Enzymen ist hier die Wahrscheinlichkeit am
7 größten, dass sie aufeinandertreffen und sich ein Enzym- Substratkomplex bildet.
8 Die höchste Produktkonzentration von 12 mmol/l wird nach 15 Minuten erreicht.
9 Der zweite Graph gehört zu Versuch Ek0,5 und erreicht ebenfalls die Produktkon-
10 zentration von 12 mmol/l, allerdings erst nach ca. 17 min, also erst etwas später
11 als in Versuch A. Auffällig ist, dass die maximale Produktkonzentration in einer
12 flacheren Kurve erreicht wird, die Bildung vom Produkt also in einer gleichmäßi-
13 geren Weise abläuft. Durch die Halbierung der Enzymkonzentration kann also
14 trotzdem das ganze Substrat verarbeitet werden, dies allerdings in einer längeren
15 Reaktionszeit. Die „Arbeit“ der eigentlichen Enzyme wurde auf die Hälfte dieser
16 verteilt und kann deshalb erst nach einer längeren Reaktionszeit zum gleichen Er-
17 gebnis kommen.
18 Der dritte Graph gehört zum Versuch Sk0,5, bei dem die halbe Substratkonzent-
19 ration verwendet wurde. Das Ergebnis des Experiments, bei dem eine nur halb so
20 große Produktkonzentration erreicht wurde, ist logisch, da nur die Hälfte der Res-
21ourcen vorhanden waren, die von den Enzymen zum Produkt verarbeitet werden
22 können. Es sind zwar genug Enzyme vorhanden, um sogar mehr Substrat verar-
23beiten zu können. Allerdings kann nur die vorhandene Substratmenge zu einem
24 Produkt verarbeitet werden, was bedeutet, dass eine halbe Substratmenge auch
25 eine halbe Produktmenge verursacht. Auch eine große Enzymkonzentration kann
26 die Substratkonzentration, die zu dem Produkt konvertiert werden, nicht erhöhen.
(vollständige Erklärung von HEKL01)

Die Lernende SIRA20 (Interventionsgruppe I-S-EI-Erk, Abstrahiererin, siehe vollständige Erklärung unten) denkt ebenfalls eingeschränkt in Wahrscheinlichkeiten. Anders als HEKL01, die nicht erklären konnte, welchen Einfluss eine Reduzierung der Teilchenkonzentrationen haben kann, erkennt SIRA20 allerdings korrekt, dass die Produktkonzentration in Versuch SK05 langsamer steigt, weil die Substratmoleküle aufgrund der verringerten Substratkonzentration „unhäufiger auf Enzyme treffen“ (Zeilen 9). Allerdings kann auch SIRA20 – anders als Lernende, die umfassend in Wahrscheinlichkeiten denken können (Niveau 6) –, sich die Eigenbewegung von Teilchen nur für Substratmoleküle, nicht aber für Enzymmoleküle, vorstellen. Es gelingt ihr daher nicht, den Graphenverlauf zu Versuch EK05, insbesondere die geringere Steigung des Graphen im Vergleich zu Versuch A, zu erklären. Dies scheint ihr insbesondere auch deshalb schwer zu fallen, da sie zu Beginn ihrer Erklärung bereits klargestellt hat, dass die Umsetzung eines Substratmoleküls zu einem Produktmolekül sehr schnell erfolgt („direkt umgewandelt werden“, Zeilen 2 – 3). Anders als HEKL01 kann sie zur Erklärung des Graphenverlaufs zu Versuch EK05 daher nicht mehr explizit auf die zuvor beschriebene Arbeitskraft-Hypothese zurückgreifen. Sie führt daher eher beschreibend als erklärend aus: „dass [es] zu viele Substrate für zu wenige Enzyme gibt und diese schon auf Höchstleistung laufen“ (Zeilen 4 – 5) und lässt diesen Aspekt weitgehend offen.

Darstellung der vollständigen Erklärung von SIRA20 (Interventionsgruppe I-S-EI-Erk, Abstrahiererin):

- 1 Versuch A hat anfangs die höchste Produktkonzentration, da die Enzyme Höchst-
 - 2 leistung betreiben und sobald Substrate auf die Enzyme treffen, direkt umgewan-
 - 3 delt werden.
 - 4 Bei Versuch EK0,5 mit halber Enzymkonzentration steigt die Produktkonzentra-
 - 5 tion langsamer und ist ab 15 Minuten mit 12 mmol/l gleichbleibend bis zum Ende,
 - 6 was daran liegt, dass zu viele Substrate für zu wenige Enzyme gibt und diese schon
 - 7 auf Höchstleistung laufen.
 - 8 Bei Versuch SK0,5 steigt die Konzentration langsamer, weil die wenigen Sub-
 - 9 strate unhäufiger auf Enzyme treffen und diese somit nicht so häufig umgesetzt
 - 10 werden können.
- (vollständige Erklärung von SIRA20)

Auch die Lernende NIDI04 (Interventionsgruppe I-S-EI-Erk, Expertin, siehe vollständige Erklärung unten) denkt eingeschränkt in Wahrscheinlichkeiten. Sie erklärt korrekt, dass der schnelle Anstieg der Produktkonzentration in Versuch A auf eine „hohe“ (Zeile 1) – und nicht, wie häufig von Lernenden auf den niedrigeren Niveaus (< Niveau 4) vermutet, auf eine *ausgeglichene* – Konzentration von Enzym- und Substratmolekülen zurückzuführen ist (siehe Zeilen 1 – 2). NIDI04 kann sogar fachlich korrekt erklären, warum die Reaktionsgeschwindigkeit in allen drei Versuchen im Verlauf der Zeit sinkt. Sie führt aus, dass durch die Umsetzung von Substrat- zu Produktmolekülen im Verlauf der Reaktion die Anzahl an Substratmolekülen in der Lösung reduziert wird und dass dadurch die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym- und Substratmoleküle aufeinandertreffen, pro Zeiteinheit abnimmt (siehe Zeilen 3 – 5). Zudem erklärt sie korrekt, dass gegen Ende der Reaktion keine freien Substratmoleküle mehr vorliegen und dass die maximal erreichbare Produktkonzentration durch die Anzahl der insgesamt zur Verfügung stehenden Substratmoleküle begrenzt wird (siehe Zeilen 6 – 14). Allerdings scheint auch NIDI04 sich – ähnlich wie die soeben beschriebenen Lernende SIRA20 und viele andere Lernende auf Niveau 5 – vorzustellen, dass die Wahrscheinlichkeit des Aufeinandertreffens von Enzym- und Substratmolekülen ausschließlich durch die Substratkonzentration beeinflusst werde. Zu Versuch EK05 führt daher auch sie vornehmlich beschreibend aus, dass die Reaktion in Versuch EK05 „insgesamt länger dauert, um zum Ende zu gelangen“ (Zeile 8). Darstellung der vollständigen Erklärung von NIDI04 (Interventionsgruppe I-S-EI-Erk, Expertin):

- 1 Der Graph von Versuch A steigt zunächst stark an, da eine hohe Enzym- und Sub-
- 2 stratkonzentration vorliegt.
- 3 Nach etwa 5 Minuten (10 mmol/l) sinkt die Substratkonzentration, was dazu führt,
- 4 dass Enzyme und Substrate weniger häufig aufeinandertreffen, der Graph steigt
- 5 langsamer an, bis er bei 12 mmol/l (15 min) konstant wird.
- 6 Versuch Ek0,5 steigt gleichbleibender aber weniger stark als Versuch A, aber stär-
- 7 ker als Versuch SK0,5 an. Bei Versuch Ek0,5 können nur halb so viele Enzyme
- 8 die Substrate umsetzen, was die letztendlich Produktkonzentration nicht verrin-
- 9 gert, die Reaktion aber insgesamt länger dauert, um zum Ende zu gelangen.
- 10 Bei Versuch SK0,5 ist die Produktkonzentration halb so groß wie die der anderen
- 11 Versuche, da die Enzyme nur halb so viele Substrate umsetzen können. Nach ca.

- 12 5 Minuten wird die Steigung kleiner, hervorgerufen durch die geringere Substrat-
13 konzentration, auf die die Enzyme seltener treffen. Nach spätestens 15 Minuten
14 sind alle Substrate bei allen Versuchen umgesetzt.
(vollständige Erklärung von NIDI04)

7.6.5.2 Synthese zu Niveau 5

Lernende auf Niveau 5 zeigen in ihren Erklärungen, dass sie dazu in der Lage sind, in Wahrscheinlichkeiten zu denken. Anders als Lernende auf Niveau 4 gelingt es ihnen, zum Beispiel korrekt zu erklären, dass die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym- und Substratmolekül aufeinandertreffen, zunimmt, wenn die Gesamtzahl an Teilchen erhöht wird. Häufig erkennen diese Lernenden auch, dass die Reaktionsgeschwindigkeit im Verlauf der Zeit abnimmt, da im Verlauf der Reaktion immer mehr Substratmoleküle zu Produktmolekülen umgesetzt werden und dadurch die Wahrscheinlichkeit abnimmt, dass ein Substrat- auf ein Enzymmolekül trifft.

Problematisch ist es für Lernende auf Niveau 5 jedoch – in Abgrenzung zu Lernenden auf Niveau 6 –, Konzentrationseffekte und probabilistische Überlegungen gleichermaßen auf die Ansätze EK05 und SK05 zu übertragen. Während sich diese Lernenden zwar vorstellen können, dass Substratmoleküle in der Lösung frei diffundieren und dass daher eine Reduktion der Substratkonzentration zu einer geringeren Wahrscheinlichkeit des Aufeinandertreffens von Enzym- und Substratmolekülen führt, scheint ihnen die Konstruktion einer analogen Vorstellung für Enzymmoleküle nicht möglich zu sein. Entsprechend hat die Enzymkonzentration in ihrer Vorstellung keinen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit des Aufeinandertreffens von Enzym- und Substratmolekülen. Eine Reduktion der Enzymkonzentration geht für Lernende auf Niveau 5 – ähnlich wie für Lernende auf Niveau 4 – häufig lediglich mit einer Reduktion an „Arbeitskraft“ einher (siehe Abschnitt 7.6.4.1). Fachwissenschaftlich gilt aber auch für Enzymmoleküle¹²⁹: „Enzymes diffuse through solution according to a 'random walk' algorithm“ (Warden 2011, S. 7; vgl. dazu auch Berg 1993; zu anschaulichen Berechnungen siehe Jackson 2006, S. 156).

¹²⁹ Die Diffusionsgeschwindigkeit der Enzyme ist dabei, aufgrund ihres höheren Molekulargewichts, lediglich geringer als die der Substratteilchen. Es gilt die Beziehung: $D\sqrt{M} = \textit{konstant}$. Eine derart detaillierte Erklärung wurde von den Lernenden jedoch nicht erwartet.

Es lässt sich zusammenfassen, dass Lernende, die auf Niveau 5 agieren, dadurch gekennzeichnet sind, dass sie das Diagramm in Bezug auf die grafischen Evidenzen widerspruchsfrei erklären und zumindest in Hinblick auf einzelne zu erklärende Aspekte in Wahrscheinlichkeiten denken. In Abgrenzung zu Lernenden, die auf Niveau 6 agieren, sind Lernende auf Niveau 5 allerdings nicht dazu in der Lage, umfassend in Wahrscheinlichkeiten zu denken. Das von ihnen gezeigte Denken in Wahrscheinlichkeiten, wird daher als *eingeschränktes Denken in Wahrscheinlichkeiten* bezeichnet.

7.6.6. Niveau 6: Umfassendes Denken in Wahrscheinlichkeiten

Lernende auf Niveau 6 können sich die in dem Diagramm referierte Situation umfassend vorstellen und beim Erklären verschiedene inhaltliche Ebenen miteinander vernetzen. Sie können umfassend in Wahrscheinlichkeiten denken und sich gleichermaßen den Einfluss von Enzym- und Substratkonzentration auf die Wahrscheinlichkeit des Aufeinandertreffens vorstellen. Sie verstehen sowohl, welchen Einfluss eine Erhöhung der Konzentrationen der jeweiligen Teilchenorten hat, als auch, welchen Einfluss deren Verringerung hat.

7.6.6.1 Analyse der Lernerantworten

Der Lernende GAHA21 (Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk, Abstrahierer, siehe vollständige Erklärung auf der nächsten Seite) erklärt das Diagramm widerspruchsfrei und umfassend. Er führt korrekt aus, dass die erhöhte Substratkonzentration in den Versuchen A und EK05 bedingt, dass in diesen Versuchen mehr Produktmoleküle gebildet werden können als in Versuch SK05 (siehe Zeilen 1 – 4). GAHA21 erklärt korrekt, dass die Reaktionsgeschwindigkeit (Steigung) in Versuch A am höchsten ist, weil hier die meisten Teilchen vorliegen. Die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym- und Substratmoleküle aufeinandertreffen, ist daher hier höher als in den anderen Versuchen (siehe Zeilen 7 – 8). Ferner erkennt er korrekt, dass sich diese Erklärung („[d]er gleich Grund“, Zeile 9) auch auf Versuch SK05 übertragen lässt: Da hier die Substratkonzentration niedriger ist, ist dadurch auch die Wahrscheinlichkeit des Aufeinandertreffens reduziert (siehe Zeilen 9 – 11). GAHA21 erklärt weiterhin korrekt, dass die Produktkonzentration im Verlauf der Zeit langsamer ansteigt, weil „immer mehr Substrate zu Produkten umgesetzt werden und so die Wahrscheinlichkeit sinkt, dass ein Substrat auf ein Enzym trifft“ (Zeile 15 – 17). Wenn keine Substratmoleküle

mehr vorliegen, können auch keine Produktmoleküle mehr gebildet werden. Die Produktkonzentration steigt deshalb im Verlauf der Zeit irgendwann nicht weiter an (siehe Zeilen 18 – 19).

Darstellung der vollständigen Erklärung von GAHA21 (Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk, Abstrahierer):

- 1 Da bei Versuch A und Ek0,5 eine höhere Substratkonzentration vorliegt als bei
- 2 dem Versuch Sk0,5, bilden sich insgesamt mehr Produkte, da insgesamt mehr Sub-
- 3 strate umgesetzt werden können. Am Ende bei A und Ek0,5 ist aufgrund der glei-
- 4 chen Substratzahl die Produktkonzentration gleich.
- 5 Der Graph von Versuch A steigt schneller an als der von Versuch Ek0,5, da mehr
- 6 Enzyme Substrate an sich binden und verarbeiten können, wodurch mehr auf ein-
- 7 mal arbeiten. Zudem ist wegen der hohen Anzahl von Enzymen und Substraten
- 8 die Wahrscheinlichkeit größer, dass ein Enzym auf ein Substrat trifft.
- 9 Der gleiche Grund für den geringeren Anstieg liegt auch bei Versuch Sk0,5 vor,
- 10 nur dass es hier genau umgekehrt ist, also dass es unwahrscheinlich ist, dass ein
- 11 Substrat (durch die fehlende Menge) auf ein Enzym trifft.
- 12 Alles in allem steigt die Produktkonzentration bei Versuch A am schnellsten, da
- 13 durch die hohe Anzahl von Enzymen und Substraten die Wahrscheinlichkeit einer
- 14 Bindung erhöht ist.
- 15 Die Produktkonzentration steigt immer langsamer an, da immer mehr Substrate zu
- 16 Produkten umgesetzt werden und so die Wahrscheinlichkeit sinkt, dass ein Sub-
- 17 strat auf ein Enzym trifft.
- 18 Am Ende steigt die Produktkonzentration gar nicht mehr, da alle Substrate umge-
- 19 setzt wurden.

(vollständige Erklärung von GAHA21)

Zu beachten ist jedoch, dass nur wenige Lernende so wie GAHA21 unmittelbar auf Niveau 6 agieren können. Einzelne Lernende starten zunächst – ähnlich wie Lernende auf Niveau 3 – mit der fachlich inkorrekten Vorstellung, dass es besonders förderlich sei, wenn die Enzym- und Substratkonzentrationen ausgeglichen seien (siehe Vorstellung *Gleichgewicht als Voraussetzung* in Abschnitt 7.6.3.4). Anders als Lernende auf Niveau 3 können sich die Lernenden auf Niveau 6 aber im Verlauf ihrer Erklärung von dieser fachlich inkorrekten Vorstellung lösen. Ausführungen darüber, wie Lernenden dies mittels hypothesengene-

rierenden und -testenden Strategien gelingen könnte, wurden bereits in Zusammenhang mit der Beschreibung von Niveau 4 diskutiert (siehe Ausführungen zur Lernenden BRAN24 in Abschnitt 7.6.4.1).

Hinweise darauf, dass auch Lernende auf Niveau 6 die zuvor beschriebene hypothesengenerierende und -testende Strategie nutzen, finden sich beispielsweise in der Erklärung des Lernenden LISE09 (Interventionsgruppe I-S-EI-Erk, Experte, siehe vollständige Erklärung auf der nächsten Seite). LISE09 scheint sich im Verlauf seiner Erklärung von einer fachlich inkorrekten Vorstellung zu einer fachlich angemessenen Vorstellung zu entwickeln. LISE09 beschreibt prinzipiell korrekt, dass die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym- und Substratmoleküle zu Beginn des Versuches A aufeinandertreffen hoch bzw. höher ist als in den anderen beiden Versuchen EK05 und SK05 (siehe Zeilen 2 – 3). Er erklärt dies allerdings zunächst fachlich inkorrekt, indem er anführt, dass in Versuch A die Konzentration von Enzym- und Substratmolekülen „gleich“ (Zeile 2) sei (siehe Gleichgewichtsvorstellungen in Abschnitt 7.6.3.4.1). Im Verlauf seiner Erklärung gelingt es ihm jedoch, seine Gleichgewichtsvorstellung bzw. die auf dieser Vorstellung basierende Erklärungshypothese zu revidieren: Als er sich auf den Graphen des Versuches EK05 konzentriert (siehe Zeilen 4 – 6), scheint er zu erkennen, dass in Versuch EK05 nicht etwa eine Art Ungleichgewicht vorliegt, sondern dass hier „die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym und Substrat zusammenstoßen“ (Zeile 5 – 6) deshalb niedriger ist, weil es hier „weniger Enzyme als in Versuch A“ (Zeile 5) gibt.

Ausgehend von dieser Erkenntnis, die er anscheinend erst ab Zeile 6 vollständig in sein bestehendes mentales Modell integrieren kann (deutlich anhand der Formulierung „Außerdem ist deshalb auch [...]“, Zeile 6), scheint er sein vorheriges mentales Modell vollständig zu revidieren bzw. ein anderes erklärungsrelevantes Modell auszuwählen (siehe Abschnitt 3.8.1). Es könnte hier auch davon gesprochen werden, dass er den Situationsraum neu konstruiert. Er denkt nun umfassend in Wahrscheinlichkeiten (siehe Zeilen 8 – 14). So erkennt er korrekt, dass zu Beginn der jeweiligen Reaktion viele Substratmoleküle vorliegen, die noch nicht umgewandelt worden sind, und dass daher die Wahrscheinlichkeit hier noch relativ hoch ist, dass Enzym- und Substratmolekül aufeinandertreffen (siehe Zeilen 8 – 9). Er scheint nun auch zu verstehen (siehe Zeilen 10 – 12), dass der schnelle Anstieg zu Beginn von Versuch A nicht – wie zunächst von ihm vermutet (siehe Zeilen 1 – 2) – damit zusammenhängt, dass die Konzentrationen von Enzym- und Substratmolekülen zu diesem Zeitpunkt noch „gleich“

(Zeile 2) seien, sondern damit, dass hier „wegen der vielen Teilchen“ (Zeile 12) die Wahrscheinlichkeit höher ist, dass „Enzym-Substrat-Komplexe gebildet werden“ (Zeilen 11). Nimmt die Substratkonzentration im Verlauf der Reaktion ab, so reduziert das die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym- und Substratmolekül aufeinandertreffen, was wiederum die Reaktionsgeschwindigkeit reduziert (siehe Zeilen 13 – 14). LISE09 erklärt zudem korrekt, dass im letzten Zeitabschnitt die Produktkonzentration konstant bleibt, „weil alle Substrate verbraucht sind“ (Zeilen 15 – 16), und dass die Produktkonzentration in Versuch SK05 zu diesem Zeitpunkt geringer ist, da in diesem Versuch „nur halb so viele Substrate“ (Zeile 17 – 18) wie in den anderen beiden Versuchen eingesetzt wurden. Entsprechend sei daher auch die maximale Produktkonzentration in den anderen beiden Versuchen identisch (siehe Zeile 18). Es sei darauf hingewiesen, dass sich LISE09 hier explizit auf die im Rahmen der Strukturierung gebildeten Zeitabschnitte bezieht (siehe Ausführungen zu den Förderkonzepten in Abschnitt 5.3.2.3 bzw. instruktionalen Maßnahmen in Abschnitt 6.2.1.3.2).

Darstellung der vollständigen Erklärung von LISE09 (Interventionsgruppe I-S-EI-Erk, Experte):

- 1 Die Produktkonzentration bei Versuch A steigt deshalb so schnell, weil die Kon-
 - 2 zentration von Enzymen und Substraten gleich ist. Das führt zu einer höheren
 - 3 Wahrscheinlichkeit, dass Enzym und Substrat aufeinandertreffen.
 - 4 Bei Versuch Ek0,5 ist der Anstieg der Produktkonzentration nicht so steil, weil es
 - 5 hier weniger Enzyme als in Versuch A gibt, die mit den Substraten reagieren kön-
 - 6 nen. Außerdem ist deshalb auch die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym und Substrat
 - 7 zusammenstoßen niedriger.
 - 8 In Abschnitt 1 steigt es so schnell, weil es noch viele Substrate gibt, die nicht um-
 - 9 gewandelt worden sind.
 - 10 Das Produktmaximum ist bei Versuch A schneller erreicht als bei Versuch Ek0,5,
 - 11 weil die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym-Substrat-Komplexe gebildet werden,
 - 12 hier wegen der vielen Teilchen insgesamt höher ist.
 - 13 Die Produktkonzentration in Abschnitt 2 steigt so langsam, weil die Substrate im-
 - 14 mer weniger werden.
 - 15 In Zeitabschnitt 3 ist das Produktmaximum bei allen drei Versuchen erreicht, weil
 - 16 alle Substrate verbraucht sind.
 - 17 Das Konzentrationsmaximum bei Sk0,5 ist so niedrig, weil nur halb so viele Sub-
 - 18 strate eingesetzt wurden. Bei Versuch A und Ek0,5 ist daher das Maximum gleich.
- (vollständige Erklärung von LISE09)

Auch der Lernende ANUL16 (Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk, Experte, siehe vollständige Erklärung unten) entwickelt ein umfassendes Diagrammverstehen erst im Verlauf seiner Erklärung. Zu Beginn seiner Erklärung geht ANUL16 – ähnlich wie Lernende auf Niveau 4 und einzelne Lernende auf Niveau 5 – noch davon aus, dass die Reaktionsgeschwindigkeit (Steigung) in Versuch EK05 ausschließlich deshalb niedriger als in Versuch A sei, weil hier „nur halb so viele Enzyme“ (Zeile 5) vorliegen und diese mehr Zeit benötigen, um die Umsetzung der Substrate zu katalysieren (Arbeitskraft-Hypothese): „Alle Enzyme arbeiten bereits, doch der Überschuss an Substraten führt zu einer langsameren Reaktion, da nicht alle gleichzeitig reagieren können“ (Zeilen 6 – 8). Nachdem er anscheinend noch einmal intensiv über das Diagramm nachgedacht hat, fertigt er eine erweiterte Erklärung an. In dieser führt er zusätzlich („ebenfalls“, Zeile 16) zu seiner ursprünglichen Arbeitskraft-Hypothese aus, dass in Versuch EK05 die reduzierte Anzahl an Enzymen bedinge, dass die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym- und Substratmoleküle aufeinandertreffen, reduziert werde (siehe Zeilen 12 – 13).

Darstellung der vollständigen Erklärung von ANUL16 (Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk, Experte):

- 1 Versuch A: Der rasante Anstieg der Produktkonzentration wird durch die hohe
 - 2 Anzahl der Enzyme und Substraten bedingt. Die Wahrscheinlichkeit, dass diese
 - 3 aufeinander treffen ist somit sehr hoch. Dies erklärt auch das schnelle Erreichen
 - 4 der maximalen Produktkonzentration.
 - 5 Versuch Ek0,5: In diesem Versuch liegen nur halb so viele Enzyme vor, daher
 - 6 dauert die Umsetzung zum Produkt länger. Alle Enzyme arbeiten bereits, doch der
 - 7 Überschuss an Substraten führt zu einer langsameren Reaktion, da nicht alle
 - 8 gleichzeitig reagieren können. Jedoch erreicht man mit diesem Versuch die glei-
 - 9 che Produktkonzentration wie mit dem Versuch A, doch es dauert länger.
 - 10 Versuch Sk0,5: Dieser Versuch läuft am langsamsten ab, da nur die Hälfte der
 - 11 Substrate vorhanden ist. Die hohe Anzahl an Enzymen bringt in diesem Fall nichts,
 - 12 da es zu wenig Substrate gibt, die verarbeitet werden können. Dies bedingt eine
 - 13 kleinere Ausbeute an Produktkonzentration. Die Wahrscheinlichkeit des Aufei-
 - 14 nandertreffens ist somit ebenfalls reduziert.
 - 15 Erweiterte Erklärung: In Versuch Ek0,5 ist die Wahrscheinlichkeit des Aufeinan-
 - 16 dertreffens ebenfalls geringer, da weniger Enzyme vorherrschen.
- (vollständige Erklärung von ANUL16)

In einem seltenen Fall, der aber durchaus interessante Einblicke in das Verständnis der Lernenden auf Niveau 6 liefert, hat ein Lernender, der Lernende URRA05 (Kontrollgruppe K-Be-Erk, Experte, siehe vollständige Erklärung auf der nächsten Seite), gegen Ende seiner bis dahin widerspruchsfreien und tiefen¹³⁰ Erklärung, überraschend eine fachlich inkorrekte Erklärungshypothese verschriftlicht. Da URRA05 allerdings in seiner vorausgegangenen Erklärung bereits demonstriert hat, dass er in der Lage ist, das Diagramm bzw. die Inhalte umfassend zu erklären, wurde seine Erklärung nicht nachträglich auf ein niedrigeres Niveau herabgestuft, sondern ressourcen- bzw. kompetenzorientiert auf Niveau 6 eingeordnet. Das Vorgehen von URRA05 wird im Folgenden erläutert. Im Vergleich zu anderen Erklärungen von Lernenden auf Niveau 6 ist die Erklärung von URRA05 relativ kurz. Einzelne Schlussfolgerungen müssen daher konkludent aus seiner Argumentation geschlussfolgert werden. Bereits zu Beginn seiner Erklärung gelingt es URRA05, sich von der grafischen Darstellung zu lösen und sich vorzustellen, dass bei einer Verringerung der Enzymkonzentration weniger Teilchen in der Lösung vorliegen. Er erklärt fachlich korrekt, dass durch die verringerte Teilchenzahl auch die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym- und Substratmoleküle aufeinandertreffen, reduziert wird (siehe Zeilen 1 – 3). Weiterhin erklärt er korrekt, dass eine Verringerung der Enzymkonzentration keinen Einfluss auf die maximal zu erreichende Produktkonzentration hat. Es dauere lediglich „länger, bis die maximale Produktkonzentration erreicht“ (Zeile 3) werde. Ihm ist bewusst, dass die maximal erreichbare Produktkonzentration durch die Anzahl an Substratmolekülen bedingt wird (siehe Zeilen 4 – 6). Die Formulierung „zusätzlich auch“ in Zeile 4 weist zudem darauf hin, dass URRA05 sein Wissen darüber, dass eine reduzierte Teilchenzahl zu einer verringerten Wahrscheinlichkeit des Aufeinandertreffens führt, auch auf den Versuch SK05 übertragen kann. Obgleich URRA05 bis hierhin somit anscheinend ein mentales Modell konstruiert hat, das vor dem Hintergrund der Anforderungen fachlich korrekt und bereits relativ vollständig erscheint, scheint dieses Modell ihm selbst noch nicht vollständig genug zu sein, um damit die drei Graphenverläufe umfassend erklären zu können. Insbesondere scheint er sich nicht vorstellen zu können, warum sich die Produktkonzentration gegen Ende der Reaktion nicht mehr verändert. URRA05 scheint hier von einer reversiblen Reaktion auszugehen, und nicht, wie

¹³⁰ Mit einer tiefen Erklärung ist gemeint, dass es URRA05 in ihrer Erklärung gelungen ist, im Situationsraum verschiedene erklärungsrelevante Ebenen miteinander zu vernetzen und insbesondere auch probabilistische Überlegungen in ihre Erklärung einzubeziehen.

im Informationsmaterial vorgegeben, von einer irreversiblen Reaktion. Er abduziert daher die Erklärungshypothese, dass die Produktkonzentration konstant bleibe, weil es zu einer „selbstständige[n] Produkthemmung“ (Zeile 7) kommen würde. Ob er diese Erklärungshypothese mithilfe der Daten überprüft hat, kann nicht beurteilt werden.

Um die Zuordnung von URRA05 – trotz seiner fachlich inkorrekten Erklärungshypothese – auf Niveau 6 zu begründen, sind zwei Aspekte relevant:

1. URRA05 hat bereits demonstriert, dass er das Diagramm bzw. die Inhalte, insbesondere unter Einbezug des Denkens in Wahrscheinlichkeiten, umfassend verstanden hat.

2. Die von URRA05 abduzierte fachlich inkorrekte Erklärungshypothese der selbstständigen Produkthemmung lässt sich mithilfe der gegebenen Evidenzen nicht revidieren.

Darstellung der vollständigen Erklärung von URRA05 (Kontrollgruppe K-Be-
Erk, Experte):

- 1 Durch die Halbierung der Enzymkonzentration wird lediglich die Wahrscheinlich-
2 keit, mit welcher die Enzyme und Substrate aufeinandertreffen, reduziert. Dem-
3 entsprechend dauert es länger, bis die maximale Produktkonzentration erreicht ist.
4 Durch die Halbierung der Substratkonzentration hingegen wird zusätzlich auch
5 das Potenzial der Produktkonzentration (maximal mögliche Produktkonzentra-
6 tion) reduziert.
7 Es lässt sich vermuten, dass es sich um eine selbstständige Produkthemmung han-
8 delt, da die Verhältnisse von Produkten zu Substraten bei allen Versuchen gleich-
9 bleiben, wenn die Produktion stoppt.
10 (vollständige Erklärung von URRA05)

7.6.6.2 Synthese zu Niveau 6

Lernende auf Niveau 6 sind in der Lage, die in dem Diagramm dargestellten Inhalte unter Einbezug des Denkens in Wahrscheinlichkeiten umfassend zu verstehen. Sie können die referierte Situation in einem elaborierten Situationsraum umfassend mental rekonstruieren, uneingeschränkt zwischen Graphen- und Situationsraum hin- und herwechseln und im Situationsraum verschiedene Erklärungsebenen miteinander vernetzen, um kausale Erklärungshypothesen für die Versuchsgraphen sowie einzelne Graphenabschnitte zu abduzieren.

Um auf Niveau 6 zu agieren, müssen Lernenden nicht alle acht in Abschnitt 6.2.5.2.2 beschriebenen Diagrammaspekte erklären, sondern lediglich demonstrieren, dass sie dazu fähig wären, falls sie den entsprechenden Aspekt, zum Beispiel den jeweiligen Graphenabschnitt, explizit beachtet hätten (siehe dazu auch Argumentation in Abschnitt 6.4).

Es zeigte sich, dass nicht alle Lernenden automatisch auf Verstehensniveau 6 agieren können, sondern Niveau 6 teilweise erst im Verlauf ihrer Erklärung erreichen. In einzelnen Fällen äußern daher auch Lernende auf Niveau 6 – ähnlich wie Lernende auf Niveau 3 – fachlich inkorrekte und zu den Daten widersprüchliche Erklärungshypothesen. Im Gegensatz zu Lernenden, die auf Niveau 3 agieren, werden entsprechende Hypothesen von den Lernenden, die auf Niveau 6 agieren, allerdings im Verlauf ihrer Erklärung durch fachlich geeignetere Erklärungen ersetzt. Lernenden auf Niveau 3 gelingt dies dagegen nicht. Das umfassende Denken in Wahrscheinlichkeiten scheint Lernenden auf Niveau 6 die Hypothesenrevision zu erleichtern, weil es ihnen dadurch möglich wird, alternative Erklärungen für revidierte Hypothesen zu abduzieren. Fachlich inkorrekte Erklärungen bestehen bei Lernenden auf Niveau 6 nur dann fort, wenn es ihnen nicht möglich ist, mithilfe der Evidenzen die entsprechenden Erklärungshypothesen zu revidieren. Ähnliche Probleme mit nicht-revidierbaren Erklärungshypothesen wurden auch für Lernende auf Niveau 4 und Niveau 5 beschrieben. Die Ursachen sind allerdings unterschiedlich. Lernende auf Niveau 4 und 5 abduzieren fachlich inkorrekte, aber nicht-revidierbare Erklärungshypothesen, weil diese nicht (Niveau 4) oder nicht vollständig (Niveau 5) in Wahrscheinlichkeiten denken und die in dem Diagramm referierte Situation daher nicht umfassend mental rekonstruieren können. Lernende auf Niveau 6 können dagegen vollständig in Wahrscheinlichkeiten denken und sich die referierte Situation umfassend vorstellen. Nicht-revidierbare Erklärungshypothesen sind daher hier häufig Ausdruck besonders kreativer Abduktionen, bei denen – womöglich bedingt durch unzureichendes enzymatisches Vorwissen – ein zu offener Hypothesensuchraum konstruiert wird (siehe Abschnitt 7.2.1).

7.7. Beantwortung von Forschungsfrage 4

Im Rahmen von Forschungsfrage 4 *Wie lässt sich Diagrammverstehen operationalisieren, um dadurch die Wirksamkeit, der instruktionalen Maßnahmen zu messen?* konnte die ursprünglich in Abschnitt 3.2 dieser Arbeit formulierte Arbeitsdefinition für das Diagrammverstehen empirisch spezifiziert werden.

In Abschnitt 3.2 wurde Diagrammverstehen noch relativ unspezifisch als Konstruktion eines mentalen Modells auf Grundlage der grafischen Darstellung betrachtet, das für Problemlöseprozesse verwendet werden kann.

In Abschnitt 3.7 wurde ergänzt, dass das mentale Modell durch Translationsprozesse konstruiert wird, die innerhalb und zwischen Interpretationsräumen, erfolgen. Diese Prozesse wurden unter dem Konzept translationaler Kohärenzbildung (siehe Abschnitt 3.7.3) subsumiert. Unter translationaler Kohärenzbildung wurde verstanden, dass Lernende von der grafischen Darstellung abstrahieren und mental zwischen dem Graphen- und dem Situationsraum so lange hin und her wechseln, bis es ihnen gelingt, die in dem Diagramm referierte inhaltliche Situation mental zu rekonstruieren. Dies geschieht zunächst durch Konstruktion eines vorläufigen mentalen Modells. Das Modell wird dann im Verlauf der weiteren Analyse – in dieser Arbeit vornehmlich getriggert durch den Arbeitsauftrag die Graphenverläufe zu erklären – spezifiziert und elaboriert. Im Rahmen der Elaboration bzw. beim Erklären der Graphenverläufe finden innerhalb des Situationsraums, unter Integration spezifischen Vorwissens über Mechanismen und Theorien, iterative Translations- und Vernetzungsprozesse zwischen erklärungsrelevanten Ebenen statt.

Im Rahmen der Beantwortung von Forschungsfrage 4 konnten nun weitere relevante Prozesse identifiziert werden, die maßgeblich zum Verstehen beitragen. Zu nennen sind hier insbesondere das *Testen* und *Revidieren von Erklärungshypothesen*. Die abduktiv gebildeten Erklärungshypothesen bzw. die aus ihnen deduzierten Vorhersagen werden dabei in einem hypothesentestenden und -revidierenden Verfahren, das weiterhin der Kohärenzbildung dient, gegen die grafischen Evidenzen im Graphenraum getestet. Während bisher vornehmlich auf Translationsprozesse aus dem Graphen- in den Situationsraum konzentriert wurde, sind hierbei insbesondere Translationsprozesse aus dem Situations- in den Graphenraum von Bedeutung. Der Situationsraum und damit auch gleichzeitig das mentale Modell werden im Rahmen dieser translationalen, kohärenz-

bildenden Verstehensprozesse so lange modifiziert, bis sich der konstruierte Situationsraum widerspruchsfrei mit dem Diagramm und insbesondere den Graphenverläufen in Übereinstimmung bringen lässt.

Die Definition von *Diagrammverstehen* wird daher vor diesem Hintergrund dahingehend erweitert, dass das durch Translationsprozesse konstruierte mentale Modell sich als *geeignet erweisen sollte, die in einem Diagramm grafisch zusammengefassten Evidenzen unter Bezug auf die referierten Inhalte kausal und widerspruchsfrei zu erklären*.

Empirisch ist es gelungen, vor dem Hintergrund der hier dargelegten Konzeptualisierung von Diagrammverstehen, sechs Verstehensniveaus, die deduktiv aus der Literatur abgeleitet und induktiv vor dem Hintergrund der Lernerantworten spezifiziert wurden, voneinander abzugrenzen. Die sechs Verstehensniveaus sind als Maß dafür zu interpretieren, inwieweit es den Lernenden gelungen ist, das Diagramm inhaltlich zu verstehen. Sie bauen aufeinander auf, müssen aber nicht zwangsläufig sukzessive durchlaufen werden.

Die Verstehensniveaus sind in Tabelle 19 im Sinne eines Kodierleitfadens (vgl. Hammann & Jördens 2014) beschrieben. Der Kodierleitfaden beinhaltet die Bezeichnung sowie eine Definition der gebildeten Niveaus, beschreibt Kodierregeln und liefert Ankerbeispiele. Kodierregeln dienen der Zuordnung der Lernerantworten zu den jeweiligen Niveaus. Ankerbeispiele sind Lernerantworten, die ausschnittsweise die externalisierten Verstehensprozesse der Lernenden exemplarisch wiedergeben (vgl. Hammann & Jördens 2014).

Die hier gewählten Kodierregeln ermöglichen es, die Lernerantworten erschöpfend und überschneidungsfrei den jeweiligen Niveaus zuzuordnen. Die Intrarater-Reliabilität¹³¹ ist mit Cohen's $\kappa = .91$ ($p < .001$) als sehr gut zu beurteilen (vgl. Greve & Wentura 1997; Bortz & Döring 2006).

Die einzelnen Niveaus werden im Folgenden kurz beschrieben. Zu einer ausführlichen Erläuterung sei auf die vorausgegangenen Abschnitte 7.5 und 7.6 verwiesen.

¹³¹ Zur Ermittlung der Intrarater-Reliabilität wurden 6 Monate nach Kodierung der Lernerantworten 15 % der Lernerantworten ($N = 75$) erneut kodiert, ohne dabei die ursprüngliche Kodierung zu beachten (vgl. Krüger & Riemeier 2014). Die erneut kodierten 15 % Lernerantworten wurden per Zufallsgenerator ausgewählt (Funktion `runif()` in Statistik-Software *R* 3.5.2, *R* Core Team 2018). Die Intrarater-Reliabilität wird analog zur Interrater-Reliabilität berechnet (vgl. Hammann & Jördens 2014; Bortz & Döring 2006).

Zu unterscheiden sind: *perzeptuelles Analysieren* (Niveau 1), *induktives Erklären* (Niveau 2), *abduktives Erklären* (Niveau 3), *abduktives Erklären unter kritischer Evaluation von Schlussfolgerungen* (Niveau 4), *eingeschränktes Denken in Wahrscheinlichkeiten* (Niveau 5) und *umfassendes Denken in Wahrscheinlichkeiten* (Niveau 6).

Lernenden der ersten beiden Niveaus, Niveau 1 (perzeptuelles Analysieren) und 2 (induktives Erklären), gelingt es, explizit dargestellte Informationen aus dem Diagramm zu entnehmen und das Diagramm zu beschreiben. Während Lernende auf Niveau 1 dabei vollständig im Graphenraum verbleiben und das Diagramm lediglich perzeptuell-bildlich beschreiben, können Lernende auf Niveau 2 darüber hinaus induktive Schlussfolgerungen auf Grundlage des Diagramms aufstellen. Allerdings sind Lernende auf Niveau 2 nicht dazu in der Lage, abduktiv Erklärungshypothesen zu bilden. Dies gelingt erst Lernenden, die auf Niveau 3 (abduktives Erklären) und höher agieren. Solche Lernenden können von der grafischen Darstellung abstrahieren, einen Situationsraum konstruieren und Erklärungshypothesen formulieren. Lernende, die auf Niveau 3 agieren, formulieren zwar Erklärungshypothesen, allerdings stehen diese im Widerspruch zu den grafischen Evidenzen. Erst Lernende auf Niveau 4 (abduktives Erklären unter kritischer Evaluation von Schlussfolgerungen) können zu den grafischen Evidenzen widerspruchsfreie Erklärungshypothesen formulieren. Sie ergründen den Situationsraum – verglichen mit Lernenden auf den Niveaus 5 und 6 – allerdings lediglich eingeschränkt. Lernende auf Niveau 4 können sich beispielsweise nicht vorstellen, inwiefern unterschiedliche Konzentrationen von Teilchen die Wahrscheinlichkeit beeinflussen, dass Enzym- und Substratmoleküle aufeinandertreffen. Erst Lernenden auf Niveau 5 (eingeschränktes Denken in Wahrscheinlichkeiten) und Niveau 6 (umfassendes Denken in Wahrscheinlichkeiten) gelingt ein solches Denken in Wahrscheinlichkeiten. Während Lernende auf Niveau 5 unvollständig in Wahrscheinlichkeiten denken, sind Lernende auf Niveau 6 uneingeschränkt dazu fähig – im Sinne kohärenzbildender Translationsprozesse – zwischen Situations- und Graphenraum sowie zwischen unterschiedliche Erklärungsebenen innerhalb des Situationsraum vernetzend hin und her zu wechseln. Die sechs Verstehensniveaus werden in dem nachfolgenden Kapitel (Forschungsfrage 5) dazu verwendet, das Diagrammverstehen der Lernenden zu messen und die Wirksamkeit der instruktionalen Maßnahmen im Rahmen einer vertieften quantitativen Analyse zu beurteilen.

Tabelle 19. Kodierleitfaden für die Zuordnung von Lernerantworten zu den Verstehensniveaus

Bezeichnung (Code)	Definition	Kodierregel	Ankerbeispiele
Niveau 1: Perzeptuelles Analysieren (Code 1)	Die Lernenden können dem Diagramm explizit dargestellte Informationen entnehmen. Sie beschreiben das Diagramm perzeptuell (bildlich-abstrakt), anstatt die Graphenverläufe kausal zu erklären. Sie verleiben dabei vollständig im Graphenraum. Sie interpretieren das Diagramm nicht inhaltlich. Ein Situationsraum wird nicht konstruiert. Inhaltlich bedeutsame Begriffe – sofern diese verwendet werden – entstammen dem Informationsmaterial.	Antworten dieses Typs enthalten KEINE Hinweise auf eine mentale Rekonstruktion der durch das Diagramm grafisch referierten Inhalte. Die Lernenden sprechen davon, dass die Graphen in einer bestimmten Art und Weise ‚verlaufen‘, sich ‚treffen‘ oder ‚schneiden‘ und bestimmte Werte ‚erreichen‘. Es finden sich Zirkelschlüsse (zirkuläre Erklärungen), die keinerlei Erklärungskraft besitzen.	a. „Weil bei Versuch A die Substratkonzentration bei 6 und beim Versuch EK0,5 bei 6 liegt, schneiden sich bzw. treffen sich die Graphen am Ende und kommen zum gleichen Punkt. Darüber hinaus ist es aber beim Versuch SK0,5 nicht so, weil sie eine Substratkonzentration von 3 hat, trifft es sich nicht am letzten Punkt mit den anderen Versuchen. Zugleich kann man aber auch sagen, dass der Versuch bei A und beim Versuch SK0,5 die gleichen Enzymkonzentrationen haben (6), aber der Versuch EK0,5 nur ein Wert von 3.“ (BITA23, siehe Abschnitt 7.6.1) b. „In Versuch A steigt die Produktkonzentration ebenfalls bis zu einem bestimmten Punkt an, weil die maximale Produktkonzentration erreicht ist.“ (MEGU24)
Niveau 2: Induktives Erklären (Code 2)	Die Lernenden interpretieren das Diagramm vornehmlich im Graphenraum und verallgemeinern von dort ausgehend die grafischen Zusammenhänge – sie erklären das Diagramm induktiv. Ein Situationsraum wird von den Lernenden, wenn überhaupt, nur oberflächlich konstruiert. Die Lernenden zeigen vorwärtsgerichtete Analysestrategien, rückwärtsgerichtete Strategien nutzen sie nicht.	Antworten dieses Typs enthalten Generalisierungen (induktive Erklärungen), die aus den Graphenverläufen in einem argumentativen Prozess abgeleitet werden. Typische Formulierungen sind beispielsweise „der Versuch zeigt“ oder „es wird deutlich, dass“. Inhaltliche Ausführungen können auftreten, dienen aber nicht dem rückwärtsgerichteten, kausalen Erklären.	a. „[...] A und Ek0,5 [liegen] nach einer gewissen Zeit auf der Konstanten. Sk0,5 hat zwar eine Enzymkonzentration von 6 mmol/l, aber eine Substratkonzentration von 3 mmol/l. Es lässt sich sagen, dass die Substratkonzentration für die Produktkonzentration verantwortlich ist“ (ANFR02, siehe Abschnitt 7.6.2). b. „In dem Diagramm sieht man, dass bei Versuch A, also gleiche Enzymkonzentration und Substanzkonzentration (6 mmol/l), die Produktkonzentration zu Beginn ziemlich schnell steigt, jedoch nach ca. 5 Minuten nur noch langsamer. Bei Versuch EK0,5 steigt die Produktkonzentration langsamer als in Versuch A, aber erreicht nach der gleichen Zeit den gleichen Maximalwert. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Produktkonzentration bei höherer Enzymkonzentration als Substratkonzentration zwar langsamer zunimmt, als wenn es ausgeglichen ist, aber den gleichen Maximalwert erreicht. Ist jedoch die Substratkonzentration geringer als die Enzymkonzentration, so ist die Zunahme der Produktkonzentration langsamer und erreicht einen viel geringeren Maximalwert“ (JUAN02, siehe Abschnitt 7.6.2).
Niveau 3: Abduktives Erklären (Code 3)	Die Lernenden versuchen das Diagramm inhaltlich zu interpretieren. Sie konstruieren allerdings einen ungeeigneten Situationsraum und abduzieren ausgehend von diesem ungeeigneten Situationsraum fachlich inkorrekte Erklärungshypothesen, die im Widerspruch zu den Daten stehen. Schüler- und Unterrichtsvorstellungen, erscheinen ursächlich für die Missinterpretation des Diagramms und die inkorrekte Abduktion von Erklärungshypothesen.	Antworten dieses Typs enthalten Erklärungshypothesen, die in Widerspruch zu den grafischen Evidenzen stehen. Ferner finden sich Anthropomorphismen, in denen Enzyme – in erheblichem Widerspruch zu bereits behandelten Unterrichtsinhalten – die Fähigkeit zugeschrieben wird, je nach Anforderungssituation, bewusst und selbstgesteuert ihre Aktivität regulieren zu können.	a. „[...] Im dritten Abschnitt haben alle Versuche ihre maximale Produktkonzentration erreicht, da an dieser Stelle alle Enzyme von Substraten besetzt sind. [...]“ (CHKL08, siehe Abschnitt 7.6.3). b. „ab einer Zeit von 15 Minuten, denaturieren die Enzyme, d. h. sie können keine Substrate mehr „aufnehmen“, weil sich ihre räumliche Struktur verändert hat und dann das Substrat nicht mehr ins aktive Zentrum des Enzyms passt“ (BIST22). c. „[...] Bei Versuch A ist die Substratkonzentration und die Enzymkonzentration im Gleichgewicht und so können mehr Produkte entstehen. [...]“ (SUTO26, siehe Abschnitt 7.6.3). d. „[...] Versuch SK0,5 hat eine höhere Enzymkonzentration, was bedeutet, dass nicht jedes Enzym ein Substrat hat und die Enzyme können ganz langsam arbeiten, weil sie nicht unter Zeitdruck stehen und somit entstehen wenig Produkte und es wird auch viel Zeit benötigt“ (ANMI26, siehe Abschnitt 7.6.3).

Niveau 4: abduktives Erklären unter kritischer Evaluation von Schlussfolgerungen (Code 4)	Die Lernenden abduzieren fachlich korrekte Erklärungshypothesen, ohne dabei in Wahrscheinlichkeiten zu denken. Sofern sie fachlich inkorrekte Erklärungshypothesen abduzieren, scheinen sie diese so lange gegen die grafischen Evidenzen zu testen und zu revidieren, bis nur noch Erklärungshypothesen bestehen bleiben, die nicht in Widerspruch zu den Daten stehen.	Antworten dieses Typs enthalten Erklärungshypothesen, die NICHT in Widerspruch zu den grafischen Evidenzen stehen. Es finden sich aber noch KEINE Formulierungen, die auf ein Denken in Wahrscheinlichkeiten schließen lassen.	<ul style="list-style-type: none"> a. „Der Graph von Ek0,5 verläuft flacher als der von A, weil nur die Hälfte der Enzyme an der Reaktion beteiligt ist. Trotzdem wird die gleiche Produktkonzentration in beiden Versuchen erreicht, weil die Substratkonzentration gleich ist. Die Enzyme setzen das Substrat in beiden Fällen zu zwei Produktmolekülen um. [...]“ (BRAN24, siehe Abschnitt 7.6.4). b. „Das Diagramm zeigt, wieviel Endprodukte aus der enzymatischen Reaktion in Hinsicht auf verstrichene Zeit entstehen. Deswegen fängt das Diagramm auch bei 0 an, denn am Anfang ist auch noch kein Substrat verarbeitet worden“ (FRED20) c. „In Versuch Sk0,5 kann nur die Hälfte der Produkte entstehen, weil auch nur die Hälfte der Substrate vorhanden ist und gespalten werden kann“ (JEMA08).
Niveau 5: Eingeschränktes Denken in Wahrscheinlichkeiten (Code 5)	Die Lernenden denken eingeschränkt in Wahrscheinlichkeiten. Sie können sich den Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit des Aufeinandertreffens von Enzym- und Substratmolekülen entweder für die Erhöhung oder für die Verringerung einer oder beider Teilchensorten vorstellen – zumeist für die Verringerung der Substratkonzentration. Es gelingt ihnen aber nicht, sowohl den Einfluss der Erhöhung als auch der Verringerung beider Teilchensorten mental zu simulieren.	Antworten dieses Typs enthalten Erklärungshypothesen, die NICHT in Widerspruch zu den grafischen Evidenzen stehen. Es finden sich Formulierungen, die auf ein Denken in Wahrscheinlichkeiten schließen lassen, z. B. „höhere Wahrscheinlichkeit“, „(weniger) häufig aufeinandertreffen“. Der Einfluss der Reduktion einer oder beider Teilchensorten (Enzym- und Substratmoleküle) auf die Wahrscheinlichkeit, dass die Teilchen aufeinandertreffen, wird allerdings nicht vollständig erkannt.	„[...] Nach etwa 5 Minuten (10 mmol/l) sinkt die Substratkonzentration, was dazu führt, dass Enzyme und Substrate weniger häufig aufeinandertreffen, der Graph steigt langsamer an, bis er bei 12 mmol/l (15 min) konstant wird. Versuch Ek0,5 steigt gleichbleibender aber weniger stark als Versuch A, aber stärker als Versuch SK0,5 an. Bei Versuch Ek0,5 können nur halb so viele Enzyme die Substrate umsetzen, was die letztendlich Produktkonzentration nicht verringert, die Reaktion aber insgesamt länger dauert, um zum Ende zu gelangen. [...]“ (NIDI04, siehe Abschnitt 7.6.5)
Niveau 6: Umfassendes Denken in Wahrscheinlichkeiten (Code 6)	Die Lernenden denken umfassend in Wahrscheinlichkeiten. Sie können den Einfluss der Veränderung der Konzentration beider Teilchensorten auf die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym- und Substratmoleküle aufeinandertreffen, mental simulieren.	Antworten dieses Typs enthalten Erklärungshypothesen, die NICHT in Widerspruch zu den grafischen Evidenzen stehen und zudem auf ein Denken in Wahrscheinlichkeiten schließen lassen (siehe Niveau 5). Es finden sich Erklärungshypothesen, in denen der Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym- und Substratmoleküle aufeinandertreffen, für höhere und niedrigere Konzentration von Enzym- und Substratmolekülen erläutert wird. Für die Zuordnung von Lernenden auf Niveau 6 genügt es, wenn einzelne dieser Zusammenhänge konkludent geschlussfolgert werden können.	<ul style="list-style-type: none"> a. „Durch die Halbierung der Enzymkonzentration wird lediglich die Wahrscheinlichkeit, mit welcher die Enzyme und Substrate aufeinandertreffen, reduziert. Dementsprechend dauert es länger, bis die maximale Produktkonzentration erreicht ist. Durch die Halbierung der Substratkonzentration hingegen wird auch das Potenzial der Produktkonzentration (maximal mögliche Produktkonzentration) reduziert. [...]“ (URRA05, siehe Abschnitt 7.6.6) b. „Da bei Versuch A und Ek0,5 eine höhere Substratkonzentration vorliegt als bei dem Versuch Sk0,5, bilden sich insgesamt mehr Produkte, da insgesamt mehr Substrate umgesetzt werden können. Am Ende bei A und Ek0,5 ist aufgrund der gleichen Substratzahl die Produktkonzentration gleich. Der Graph von Versuch A steigt schneller an als der von Versuch Ek0,5, da mehr Enzyme Substrate an sich binden und verarbeiten können, wodurch mehr auf einmal arbeiten. Zudem ist wegen der hohen Anzahl von Enzymen und Substraten die Wahrscheinlichkeit größer ist, dass ein Enzym auf ein Substrat trifft. Der gleiche Grund für den geringeren Anstieg liegt auch bei Versuch Sk0,5 vor, nur dass es hier genau umgekehrt ist, also dass es unwahrscheinlich ist, dass ein Substrat (durch die fehlende Menge) auf ein Enzym trifft. Alles in allem steigt die Produktkonzentration bei Versuch A am schnellsten, da durch die hohe Anzahl von Enzymen und Substraten die Wahrscheinlichkeit einer Bindung erhöht ist. Die Produktkonzentration steigt immer langsamer, da immer mehr Substrate zu Produkten umgesetzt werden und so die Wahrscheinlichkeit sinkt, dass ein Substrat auf ein Enzym trifft. Am Ende steigt die Produktkonzentration gar nicht mehr, da alle Substrate umgesetzt wurden.“ (GAHA21, siehe Abschnitt 7.6.6)

8. Evaluation der instruktionalen Maßnahmen in Hinblick auf das Diagrammverstehen (F5)

8.1. Herleitung von Forschungsfrage 5

Während im Rahmen von Forschungsfrage 3 (siehe Kapitel 0) vornehmlich auf den Einfluss der instruktionalen Maßnahmen auf die Leistung beim Erklären fokussiert wurde, wird im Folgenden auf das Verstehen des Untersuchungsdiagramms fokussiert (zu einer Argumentation siehe Abschnitte 6.4 und 7.1). Forschungsfrage 5 lautet daher:

Inwiefern sind die in dieser Arbeit entwickelten instruktionalen Maßnahmen geeignet, um Lernende beim Diagrammverstehen zu unterstützen?

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde im vorausgegangenen Kapitel das Konstrukt Diagrammverstehen, im Rahmen der Beantwortung von Forschungsfrage 4, operationalisiert. Mithilfe der Lernerantworten wurden sechs Verstehensniveaus gebildet (siehe zu einer Zusammenfassung Abschnitt 7.7). Die Verstehensniveaus werden im Folgenden verwendet, um zu analysieren, inwiefern sich die hier entwickelten instruktionalen Maßnahmen als wirksam erweisen, um Lernende beim Diagrammverstehen zu fördern. Die Beantwortung von Forschungsfrage 5 erfolgt somit durch vertiefende Re-Analyse der bereits im Rahmen von Forschungsfrage 3 gewonnen empirischen Daten. Analog dazu werden auch hier zwei Unterfragen unterschieden:

Forschungsfrage 5a lautet: *Inwieweit erweist sich die Kombination strukturierender (S) und elaborierend-interrogativer Maßnahmen (EI) als förderlich, Lernende beim Diagrammverstehen zu unterstützen?*

Forschungsfrage 5b lautet: *Inwieweit erweist sich die Kombination strukturierender (S) und elaborierend-interrogativer Maßnahmen (EI) als förderlich, Lernende beim Diagrammverstehen zu unterstützen, wenn die Lernenden zuvor kognitiv aktiviert (KA) werden?*

8.2. Forschungsmethodik zur Beantwortung von Forschungsfrage 5

Zur Beantwortung von Forschungsfrage 5 wurde die im Rahmen von Forschungsfrage 3 beschriebene Forschungsmethodik verwendet (siehe Abschnitt 6.2). Anders als in Forschungsfrage 3 fungiert hier allerdings nicht die in Abschnitt 6.2.5.2.2 beschriebene Variable *Vollständigkeit der Erklärung* als abhängige Variable, sondern die in sechs Niveaus gegliederte, ordinalskalierte Variable *Diagrammverstehen*.

Da das Diagrammverstehen mithilfe der im Rahmen von Forschungsfrage 4 entwickelten Kodierung nun tiefergehend analysiert werden kann, wird in diesem Zusammenhang nun auch eine vertiefende Analyse der kognitiven Belastung beim Diagrammverstehen durchgeführt. Die kognitive Belastung beim Lernen, die im Rahmen von Forschungsfrage 3 zunächst eindimensional betrachtet wurde, wird dazu in drei Arten kognitiver Belastung differenziert (siehe Abschnitte 3.8.3 und 6.2.5.1.2): extrinsische (ECL), intrinsische (ICL) und lernbezogene kognitive Belastung (GCL).

Ähnlich wie zur Beantwortung von Forschungsfrage 3, werden auch zur Beantwortung von Forschungsfrage 5, respektive der beiden Unterfragen 5a und 5b, Unterschiedsanalysen durchgeführt. Dazu werden die bereits in Abschnitt 6.2.6 beschriebenen parametrischen und nicht-parametrischen Verfahren genutzt. Tabelle 20 gibt analog zu Tabelle 7 auf Seite 197 einen Überblick darüber, ob bei den Merkmalen ECL, ICL und GCL die Annahme der Normalverteilung oder die Annahme homogener Varianzen verletzt sind. Die Forschungsmethodik zur Beantwortung von Forschungsfrage 3 wird zur Beantwortung von Forschungsfrage 5 zudem dahingehend erweitert, dass zusätzlich auch Zusammenhangsanalysen durchgeführt werden. Es wird überprüft, ob es einen Zusammenhang zwischen der Gruppenzugehörigkeit und dem von den Lernenden erreichten Verstehensniveau gibt. Dazu wird neben einer deskriptiven Analyse zusätzlich der Chi-Quadrat-Test auf stochastische Unabhängigkeit (kurz: Chi-Quadrat-Unabhängigkeitstest bzw. nur Unabhängigkeitstest, vgl. Holling & Gediga 2011; Sibbertsen & Lehne 2015) verwendet (vgl. zu einem ähnlichen Vorgehen insbesondere Jördens et al. 2016).

Mithilfe des Tests wird überprüft, ob die Verteilung der Lernenden auf die jeweiligen Verstehensniveaus, mit der Annahme vereinbar ist, dass kein Zusammenhang zwischen Gruppenzugehörigkeit und Verstehensniveau existiert. Wenn

dem so wäre, dann müssten sich die entsprechenden Lernenden innerhalb ihrer Gruppen zufällig auf die jeweiligen Niveaustufen verteilen. Sofern ausreichend Hinweise (im Sinne von Abweichungen zwischen erwarteter und tatsächlich beobachteter Verteilung) gegen die Annahme einer zufälligen Verteilung sprechen, wird angenommen, dass die Zugehörigkeit zu einer Kontroll- oder Interventionsgruppe beeinflusst, auf welchem Niveau Lernende das Diagramm erklären.

Tabelle 20. Übersicht über Hinweise zur Verteilung und Streuung der analysierten Merkmale in den Vergleichsgruppen und Empfehlung eines Testverfahrens

Variable	Überprüfung der Normalverteilungsannahme	Überprüfung der Varianzhomogenität in den Vergleichsgruppen		empfohlenes Testverfahren
		Vergleiche F5a	Vergleiche F5b	
<i>ECL</i>	Keine wesentlichen Abweichungen von der Normalverteilung in den Vergleichsgruppen zur Beantwortung von Forschungsfrage 5a; Wesentlich Abweichungen von der Normalverteilung in den Vergleichsgruppen zur Beantwortung von Forschungsfrage 5b	F(1, 76) = 0.07, p = .788	F(2, 423) = 4.35, p = .013*	F5a: t-Test F5b: Kruskal-Wallis-Test
<i>ICL</i>	Keine wesentlichen Abweichungen von der Normalverteilung in den Vergleichsgruppen zur Beantwortung von Forschungsfrage 5a; Keine wesentlichen Abweichungen von der Normalverteilung in den Vergleichsgruppen zur Beantwortung von Forschungsfrage 5b	F(1, 76) = 5.72, p = .019*	F(2, 423) = 0.87, p = .420	F5a: Wilcoxon-Mann-Whitney-Test F5b: A-NOVA
<i>GCL</i>	Keine wesentlichen Abweichungen von der Normalverteilung in den einzelnen Gruppen	F(1, 76) = 0.45, p = .502	F(2, 423) = 1.33, p = .267	F5a: t-Test F5b: A-NOVA

Anmerkung. * $p < .05$.

8.3. Auswertung zur Beantwortung von Forschungsfrage 5

Die Auswertung zur Beantwortung von Forschungsfrage 5 gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil der Auswertung wird überprüft, ob es gelungen ist, die kognitive Belastung der Lernenden differenziert entsprechend der drei Loads ECL, ICL und GCL zu erfassen (siehe Abschnitt 8.3.1) und ob die Randomisierung der Lernenden auf die Gruppen auch in Hinblick auf die in Abschnitt 7.3.1 identifizierten Schlussfolgerungsfaktoren gelungen ist (siehe Abschnitt 8.3.2). Darauf aufbauend erfolgt im zweiten Teil der Auswertung ein Vergleich der fünf Interventions- und Kontrollgruppen mit Fokus auf das Diagrammverstehen (siehe Abschnitt 8.3.3). Zunächst wird mithilfe von Unterschiedsanalysen ermittelt, ob die Lernenden in den jeweiligen Interventions- und Kontrollgruppen unterschiedlich hohe Verstehensniveaus erreicht haben (siehe Abschnitt 8.3.3.1). Darauf aufbauend wird mithilfe von Zusammenhangsanalysen untersucht, ob es einen Zusammenhang zwischen der Verteilung der Lernenden auf die jeweiligen Verstehensniveaus und der Gruppenzugehörigkeit gibt (siehe Abschnitt 8.3.3.2). Abschließend wird die kognitive Belastung der Lernenden in den einzelnen Gruppen beim Diagrammverstehen vergleichend analysiert (siehe Abschnitte 8.3.3.3 und 8.3.3.4).

Die Ergebnisse werden im Rahmen der Beantwortung von Forschungsfrage 5 in Abschnitt 8.4 diskutiert.

8.3.1. Analyse des Messinstruments zur Erfassung der kognitiven Belastung

8.3.1.1 Empirische Dimensionierung

Bei der Konzeption des Fragebogens zur Erhebung der kognitiven Belastung wurde aufbauend auf der theoretischen Fundierung in Abschnitt 3.8.3 ein 3-dimensionales Konstrukt angenommen. Unterschieden wurde in die Dimensionen *intrinsische* (ICL), *extrinsische* (ECL) und *lernbezogene kognitive Belastung* (GCL) (siehe zur Operationalisierung der Dimensionen Abschnitt 6.2.5.1.2). Im Folgenden wird untersucht, ob sich die drei theoretisch angenommenen Dimensionen auch empirisch abbilden lassen. Analog zu den Ausführungen in Ab-

schnitt 7.3.1 wird dazu zunächst mittels explorativer Faktorenanalyse (Hauptkomponentenanalyse) die Homogenität der drei Dimensionen bzw. Faktoren überprüft.

Insgesamt wurden 11 von ursprünglich 12 konstruierten Items (Variablen) in die Analyse einbezogen. Das Item ECL 1 (Wie sehr mussten Sie sich anstrengen, um sich durch die Materialien zu navigieren?), das zur Erfassung der extrinsischen kognitiven Belastung verwendet wurde, musste von der Analyse ausgeschlossen werden, da mehrere Lernende in den Untersuchungsheften vermerkt hatten, dass sie den Begriff *navigieren* nicht kennen bzw. nicht verstehen würden.

Die Annahmen zur Durchführung einer explorativen Faktorenanalyse sind erfüllt (siehe Abschnitt 7.3.1.2). Die Antworten der Lernenden zu den jeweiligen Items sind mit der Annahme der Normalverteilung vereinbar (vgl. Bühner 2011). Lediglich für das Item ECL 4 (Wie verständlich fanden Sie die hier gestellten Arbeitsaufträge?) zeigt sich eine stark rechtsschiefe bzw. linkssteile Verteilung. Die meisten Lernenden haben auf die Frage angegeben, dass Sie die gestellten Arbeitsaufträge sehr gut verstehen konnten.

Der *Bartlett-Test für Sphärizität* ist hochsignifikant ($\chi^2(55) = 1944.87, p < .001$). Das Ergebnis des KMO-Tests kann mit einem Wert von 0.82^{132} als sehr gut eingestuft werden (vgl. Field et al. 2012; Hutcheson & Sofroniou, 1999; Backhaus et al. 2018). Da ein Zusammenhang zwischen den Faktoren erwartet wurde, wurde die Rotationsmethode *Oblimin* verwendet (vgl. Field 2012; Leppink et al. 2014; siehe Ausführungen in Abschnitt 7.3.1). Die Ergebnisse sind in Tabelle 21 dargestellt. Sofern Items mit einer Ladung > 0.20 auf zwei Faktoren laden, wurden die Ladungen mit einem Stern gekennzeichnet.

Die Variablen ICL 1 bis 4 laden, wie erwartet, hoch und nahezu ausschließlich auf den Faktor, von dem angenommen wird, dass es sich dabei um die intrinsische kognitive Belastung (ICL) handelt. Ähnliches gilt für die Variablen GCL 1 bis 4. Diese laden hoch und ebenfalls nahezu ausschließlich auf den Faktor, von dem angenommen wird, dass es sich dabei um die lernbezogene Belastung (GCL) handelt. Die Variablen ECL 2 und ECL 3 laden hoch auf einen dritten Faktor. Es wird angenommen, dass es sich dabei um die extrinsische kognitive Belastung (ECL) handelt. Die Variable ECL 3 lädt zwar ebenfalls auf diesen

¹³² Fast alle KMO-Werte der Variablen (Items) liegen über .80; Werte unter 0.65 treten nicht auf.

Faktor, aber – wider Erwarten – höher auf den Faktor ICL. Es ergeben sich daher zwei mögliche 3-faktorielle-Modelle zur differenzierten Erfassung der kognitiven Belastung: ein theoretisches Modell und ein empirisches Modell. Beim *theoretischen Modell* wird das Item ECL 3 dem Faktor ICL zugeordnet, beim *empirischen Modell* wird das Item dem Faktor ECL zugeordnet.

Tabelle 21. Ergebnisse, der auf den Fragebogen zur Selbsteinschätzung der kognitiven Belastung angewandten Hauptkomponentenanalyse. Dargestellt sind Items der Selbsteinschätzung der kognitiven Belastung inklusive ihrer Ladungen auf die drei Faktoren ICL, GCL und ECL.

Variable (Items, geordnet nach Faktoren und Faktorladungen)	ICL	GCL	ECL
Wie leicht oder schwer ist es Ihnen gefallen, die Informationen in dem Diagramm, mit dem zu verknüpfen, was Sie bereits über das Thema Enzymatik wussten? (ICL4)	.89	-.02	-.07
Wie leicht oder schwer ist es Ihnen gefallen, das Diagramm schriftlich zu erklären? (ICL3)	.81	-.02	-.01
Wie leicht oder schwer finden Sie das Thema Enzymatik zum derzeitigen Zeitpunkt? (ICL1)	.75	.00	-.01
Wie leicht oder schwer ist es Ihnen gefallen, das Diagramm zu verstehen? (ICL2)	.72	.03	.14
Wie stark haben Sie sich beim Lesen des Diagramms konzentriert? (GCL2)	-.07	.87	-.01
Wie stark haben Sie sich beim Erklären der Graphen konzentriert? (GCL1)	-.14	.79	.14
Wie stark haben Sie sich angestrengt, um den Verlauf der Graphen zu verstehen? (GCL3)	.18	.73	-.03
Was denken Sie, wie stark sich Ihre Klassenkameraden angestrengt haben, um das Diagramm zu verstehen? (GCL4)	.21	.61	-.24
Wie verständlich fanden Sie die hier gestellten Arbeitsaufträge? (ECL4)	-.03	-.03	.88
Wie leicht oder schwer fanden Sie es, mit den Materialien zu arbeiten? (ECL2)	.29*	.10	.64*
Wie leicht oder schwer fanden Sie es, alle Informationen zusammenzutragen, die Sie für das Erklären des Diagramms brauchten? (ECL3)	.61*	.03	.29*
Eigenwert	3.22	2.33	1.47

Anmerkung. ICL = intrinsische kognitive Belastung, GCL = lernbezogene kognitive Belastung, ECL = extrinsische kognitive Belastung. Die Items wurden entsprechend der Höhe ihrer Faktorladungen angeordnet. Items mit Ladungen > .20 wurden fett gedruckt; Items, die mit einer Ladung > .20 auf mehr als einen Faktor laden, wurden mit * gekennzeichnet.

8.3.1.2 Konstruktvalidität

Um aufbauend auf den zuvor gewonnenen Erkenntnissen die Konstruktvalidität und Dimensionalität der drei Skalen (ICL, GCL und ECL) zu überprüfen, wurde, in Anlehnung an die Arbeiten von Hadie und Yusoff (2016) sowie Morrison, Dorn und Guzdial (2014), eine konfirmatorische Faktorenanalyse¹³³ (engl. confirmatory factor analysis - CFA) durchgeführt.

Zu ermitteln ist, ob sich das theoretisch antizipierte 3-faktorielle Modell gegenüber einem auf der explorativen Faktorenanalyse basierendem 3-faktoriellen empirischen Modell (Zuordnung des Items ECL2 zum Faktor ICL) als geeignet erweist. Zusätzlich dazu werden beide Modelle mit einem 2-faktoriellen und einem 1-faktoriellen Modell verglichen. In dem 2-faktoriellen Modell wird angenommen, dass alle Items, die zuvor der intrinsischen (ICL) und der lernbezogenen kognitiven Belastung (GCL) zugeordnet wurden, auf einen Faktor laden und lediglich die drei Items zur Erfassung des ECL eine eigene Skala darstellen. Auf ein mögliches 2-faktorielles Modell wurde bereits in Abschnitt 3.8.3 eingegangen (siehe dort Ausführungen zum Faktor ICL*, vgl. dazu auch Kalyuga 2011; Sweller 2010; Sweller et al. 2011). In dem 1-faktoriellen-Modell wird angenommen, dass alle zuvor beschriebenen 11 Items auf einen Faktor laden.

Zum Vergleich der verschiedenen Modelle und zur Beurteilung der Daten-Modell-Passung wurden verschiedene Gütemaße (Fit-Indizes) verwendet (vgl. z. B. Hu & Bentler 1999, siehe Tabelle 22).

Tabelle 22. Gütemaße (Fit-Indizes) zur Beurteilung der Daten-Modell-Passung

Name der Indizes	Ausschlusskriterium	Quelle
Chi Square/Degree of Freedom (χ^2/df)	< 5	Marsh & Hocevar 1985; Hair et al. 2014
Root Mean Square of Error Approximation (RMSEA)	< 0.1	Browne & Cudeck 1993; Chen et al. 2008
Standardized Root Mean Square Residual (SRMR)	< 0.1	Hair et al. 2014
Goodness of Fit Index (GFI)	> 0.9	Hair, et al. 2014
Comparative Fit Index (CFI)	> 0.9	Bentler 1990; Hair et al. 2014

¹³³ Zur Berechnung des Messmodells wurde das Paket „Lavaan“ (Rosseel, 2012) in der Statistik-Software R 3.5.2 (R Core Team 2018) verwendet.

Mittels Chi-Quadrat-Test wird im Rahmen der konfirmatorischen Faktorenanalyse jeweils überprüft, inwieweit sich ein postuliertes Modell von den empirischen Daten unterscheidet. Die Nullhypothese besagt, dass die empirischen Daten und das jeweils postulierte Modell übereinstimmen; die Alternativhypothese besagt, dass sich die empirischen Daten und das postulierte Modell unterscheiden. Die Nullhypothese ist für alle vier betrachteten Modelle abzulehnen (siehe Spalten χ^2 und p-Wert in Tabelle 23). Bei großen Stichproben ($N > 250$) ist dies allerdings nicht ungewöhnlich. Der Chi-Quadrat-Test fällt hier bereits bei sehr geringen Abweichungen von einem ‚perfekten‘ Modell signifikant aus (vgl. Bühner 2011). Verschiedene Autor*innen raten daher statt der Chi-Quadrat-Teststatistik das Verhältnis aus Teststatistik und Freiheitsgraden (χ^2/df) zu betrachten. Der entsprechende Quotient sollte den Wert 5 nicht übersteigen (vgl. Marsh & Hocevar 1985; Hair et al. 2014).

Nur die beiden 3-faktoriellen Modelle erfüllen diese Bedingung (siehe Spalte χ^2/df in Tabelle 23). Ferner erweisen sich beide 3-faktoriellen Modelle auch hinsichtlich der anderen Fit-Indizes als besser geeignet als das 1-faktorielle und das 2-faktorielle Modell (siehe Spalten RMSEA, SRMR, GFI und CFI in Tabelle 23).

Tabelle 23. Ergebnisse der konfirmatorischen Faktorenanalyse

Modell	χ^2	df	P-Wert	χ^2/df	RMSEA 0.90 % KI [UG, OG]	SRMR	GFI	CFI
1-faktorielles Modell	636.63	44	< .001	14.47	0.163 [0.152, 0.175]	0.113	.96	.69
2-faktorielles Modell	591.24	43	< .001	13.73	0.159 [0.148, 0.171]	0.111	.96	.71
3-faktorielles Modell (empirisch)	201.26	41	< .001	4.91	0.088 [0.076, 0.100]	0.052	.99	.92
3-faktorielles Modell (theoretisch)	194.31	41	< .001	4.74	0.086 [0.074, 0.099]	0.052	.99	.92

Anmerkung. KI = Konfidenzintervall; UG = Untergrenze, OG = Obergrenze.

Im Vergleich zwischen den beiden 3-faktoriellen Modellen erweist sich das theoretisch postulierte als geringfügig besser geeignet als das empirisch ermittelte

3-faktorielle Modell.¹³⁴ Die Variable ECL 3 wird daher in der nachfolgenden Analyse, wie zuvor bereits theoretisch postuliert, dem Faktor ECL zugeordnet. Vor dem Hintergrund der theoretischen Überlegungen sowie der empirischen Ergebnisse wird angenommen, dass sich die drei Dimensionen ICL, GCL und ECL in der nachfolgenden Analyse (siehe Abschnitt 8.3.3.3) mithilfe des 3-faktoriellen theoretischen Modells getrennt voneinander erfassen lassen.

8.3.1.3 Reliabilitätsanalyse

Im Folgenden wird die interne Konsistenz der drei Faktoren und die Trennschärfe, der den Faktoren zugeordneten Items überprüft. Die relevanten Kennwerte zu den jeweiligen Items sind in Tabelle 24 dargestellt.

Cronbachs Alpha beträgt für die Skala intrinsische kognitive Belastung (ICL) $\alpha = .83$, für die Skala lernbezogene Belastung (GCL) $\alpha = .76$ und für die Skala extrinsische kognitive Belastung (ECL) $\alpha = .68$. Die entsprechenden Werte können vor dem Hintergrund vergleichbarer Arbeiten als *akzeptabel* bezeichnet werden (vgl. Hadie & Yusoff 2016; Leppink et al. 2014). Die Trennschärfen sind für fast alle Items als gut zu bewerten (vgl. Döring & Bortz 2016; Moosbrugger & Kelava 2012; Bühner 2011).

¹³⁴ Es sei darauf hingewiesen, dass auch beim theoretisch postulierten 3-faktoriellen Modell keine optimale Modellpassung vorliegt (vgl. Urban & Mayerl 2014). Diskussionswürdig wäre beispielsweise, dass der RMSEA-Wert relativ hoch ist. Mit einem Wert von 0.086 liegt der Wert zwar unter dem Ausschlusskriterium von 0.1, allerdings würde erst ein Wert unter 0.08 als befriedigend betrachtet werden (vgl. Urban & Mayerl 2014).

Tabelle 24. Ergebnisse der Erhebung der kognitiven Belastung, differenziert nach ICL, GCL und ECL.

Items	Mean	SD	Schiefe	Trennschärfe
Wie leicht oder schwer finden Sie das Thema Enzymatik zum derzeitigen Zeitpunkt? (ICL1) [1 = sehr leicht, 7 = sehr schwer]	3.96	1.57	0.01	.57
Wie leicht oder schwer ist es Ihnen gefallen, das Diagramm zu verstehen? (ICL2) [1 = sehr leicht, 7 = sehr schwer]	2.91	1.55	0.68	.42
Wie leicht oder schwer ist es Ihnen gefallen, das Diagramm schriftlich zu erklären? (ICL3) [1 = sehr leicht, 7 = sehr schwer]	3.90	1.50	0.38	.56
Wie leicht oder schwer ist es Ihnen gefallen, die Informationen in dem Diagramm, mit dem zu verknüpfen, was Sie bereits über das Thema Enzymatik wussten? (ICL4) [1 = sehr leicht, 7 = sehr schwer]	3.63	1.76	0.32	.52
α (Skala ICL) = .83				
Wie stark haben Sie sich beim Erklären der Graphen konzentriert? (GCL1) [1 = sehr wenig, 7 = sehr stark]	4.14	1.42	-0.33	.59
Wie stark haben Sie sich beim Lesen des Diagramms konzentriert? (GCL2) [1 = sehr wenig, 7 = sehr stark]	4.14	1.50	-0.19	.59
Wie stark haben Sie sich angestrengt, um den Verlauf der Graphen zu verstehen? (GCL3) [1 = sehr wenig, 7 = sehr stark]	3.79	1.52	-0.03	.54
Was denken Sie, wie stark sich Ihre Klassenkameraden angestrengt haben, um das Diagramm zu verstehen? (GCL4) [1 = sehr wenig, 7 = sehr stark]	4.04	1.36	-0.14	.58
α (Skala GCL) = .76				
Wie leicht oder schwer fanden Sie es, mit den Materialien zu arbeiten? (ECL2) [1 = sehr leicht, 7 = sehr schwer]	2.86	1.37	0.65	.41
Wie leicht oder schwer fanden Sie es, alle Informationen zusammenzutragen, die Sie für das Erklären des Diagramms brauchten? (ECL3) [1 = sehr leicht, 7 = sehr schwer]	3.56	1.43	0.28	.51
Wie verständlich fanden Sie die hier gestellten Arbeitsaufträge? (ECL4) [1 = sehr verständlich, 7 = sehr unverständlich]	2.37	1.44	1.18	0.34
α (Skala ECL) = .68				

Anmerkung. ICL = intrinsische kognitive Belastung, GCL = lernbezogene kognitive Belastung, ECL = extrinsische kognitive Belastung, α = Cronbachs Alpha

8.3.2. Überprüfung der Randomisierung in Hinblick auf vorwissensgestützte Schlussfolgerungsfähigkeiten

In Abschnitt 6.3.1.2 konnte bereits gezeigt werden, dass die Randomisierung der Lernenden in Hinblick auf das enzymatische Vorwissen weitgehend gelungen ist. Im Folgenden wird dies auch hinsichtlich der beiden in Abschnitt 7.3.1 ermittelten Faktoren *konkretes* und *abstraktes Schlussfolgern* in enzymatischen Kontexten überprüft.¹³⁵

Die zur Beantwortung von Forschungsfrage 5a relevanten Gruppen I-S-EI-Erk und K-Erk unterscheiden sich hinsichtlich der beiden Faktoren nicht statistisch signifikant voneinander (Faktor *abstraktes Schlussfolgern*: $t(75,44) = 0,77$, $p = .440$, $d = 0,18$, $r = .09$; Faktor *konkretes Schlussfolgern*: $t(75,44) = 0,97$, $p = .335$, $d = 0,22$, $r = .11$). Die Randomisierung der zur Beantwortung von Forschungsfrage 5a relevanten Vergleichsgruppen I-S-EI-Erk vs. K-Erk kann daher auch hinsichtlich der beiden Schlussfolgerungsfaktoren als erfolgreich betrachtet werden.

Signifikante Unterschiede zeigen sich dagegen für die Gruppen, die zur Beantwortung von Forschungsfrage 5b miteinander verglichen werden, I-KA-S-EI-Erk, K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk. Ähnlich wie dies auch für die Gesamtleistung im Vorwissenstest beobachtet werden konnte (siehe Abschnitt 6.3.1.2), lassen sich auch hier die Gruppenunterschiede vollständig auf geringere Fähigkeiten der Lernenden in der Kontrollgruppe K-Be-Erk zurückführen.

Hinsichtlich des *konkreten Schlussfolgerns* zeigen Lernende der Kontrollgruppe K-Be-Erk im Durchschnitt eine statistisch höchstsignifikant geringere Leistung als Lernende der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk ($t(143,40) = 5,62$, $p < .001$, $d = 0,78$, $r = .36$) und Lernende der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk ($t(130,95) = 4,57$, $p < .001$, $d = 0,60$, $r = .29$). Es handelt sich jeweils um mittlere Effekte (vgl. Cohen 1988).

Auch hinsichtlich des *abstrakten Schlussfolgerns* zeigen Lernende der Kontrollgruppe K-Be-Erk eine statistisch signifikant geringere Leistung als Lernende der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk ($t(143,40) = 2,65$, $p = .024$, $d = 0,37$,

¹³⁵ Es sei darauf hingewiesen, dass sich ein höherer Zusammenhang zwischen der Leistung beim *abstrakten Schlussfolgern* und dem erreichten Verstehensniveau ($r_s = .47$, $p = < .001$) zeigt als zwischen dem *konkreten Schlussfolgern* und dem erreichten Verstehensniveau ($r_s = .29$, $p = < .001$). Entsprechende Überlegungen stellen allerdings keinen inhaltlichen Schwerpunkt der hier durchgeführten Untersuchung dar und sollten in nachfolgenden Untersuchungen weiter abgesichert werden.

$r = .18$). Die Effektstärke dieses Unterschieds ist allerdings sehr gering und praktisch wenig bedeutsam (vgl. Cohen 1988). Zwischen den Gruppen K-Be-Erk und K-Erk-Be-nErk zeigen sich dagegen in dieser Hinsicht keine statistisch signifikanten Unterschiede ($t(130,95) = 1.29, p = .402, d = 0.18, r = .09$). Der Unterschied ist sehr gering (vgl. Cohen 1988).

Die Vergleichsgruppen I-KA-S-EI-Erk und K-Erk-Be-nErk, die in Hinblick auf das Erkenntnisinteresse dieser Untersuchung besonders relevant sind, unterschieden sich in Hinblick auf keinen der beiden Faktoren statistisch signifikant voneinander (Faktor *abstraktes Schlussfolgern*: $t_{(333.66)} = 1.91, p = .136, d = 0.21, r = .10$; Faktor *konkretes Schlussfolgern*: $t_{(329.33)} = 1.55, p = .267, d = 0.17, r = .13$). Auch in Hinblick auf die Effektstärke waren die Unterschiede zwischen diesen beiden Gruppen sehr gering (vgl. Cohen 1988).

Es lässt sich daher zusammenfassen, dass die Randomisierung zur Beantwortung von Forschungsfrage 5b auch in Hinblick auf die beiden Faktoren abstraktes und konkretes Schlussfolgern als bedingt erfolgreich betrachtet werden kann.

Die Interpretation der Ergebnisse zum Lernerfolg von Lernenden der Kontrollgruppe K-Be-Erk sollten vor dem Hintergrund ihrer möglicherweise geringer ausgeprägten Fähigkeiten beim konkreten und abstrakten Schlussfolgern betrachtet werden; Lernende der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk und der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk können dagegen – was zur Beantwortung von Forschungsfrage 5b maßgeblich relevant ist – ohne derartige Einschränkungen miteinander verglichen werden.

8.3.3. Ergebnisse der Gruppenvergleiche

8.3.3.1 Unterschiede in Hinblick auf das Diagrammverstehen

Zur Beantwortung von Forschungsfrage 5 wurde überprüft, ob sich die Lernenden in den Interventions- und Kontrollgruppen in Hinblick auf das im Median erreichte Verstehensniveaus unterscheiden. Die Gruppen wurden dazu mittels Unterschiedsanalysen entsprechend der Forschungsfrage 5a und 5b miteinander verglichen.

Deskriptiv betrachtet (siehe Tabelle 25), erreichen die Lernenden der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk im Median (bzw. im Mittel¹³⁶) ein höheres Verstehensniveau als die Lernenden der Kontrollgruppe K-Erk (siehe Forschungsfrage 5a) und die Lernenden der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk ein höheres Verstehensniveau als die Lernenden der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk (siehe Forschungsfrage 5b).

Die Analyse der Quartile zeigt zudem, dass die Verteilung der Lernenden auf die jeweiligen Niveaus in den Interventionsgruppen, I-KA-S-EI-Erk und I-S-EI-Erk, im mittleren Datenbereich (25 % bis 75 % Quartil) jeweils ein Niveau höher liegt als in den jeweiligen Kontrollgruppen K-Erk-Be-nErk und K-Erk. Zwischen der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk und der Kontrollgruppe K-Be-Erk liegen hier sogar jeweils zwei Niveaus.

Trotz dieser (in der Stichprobe vorliegenden) Unterschiede sei zugleich betont, dass sich in jeder der fünf Untersuchungsgruppen Lernende finden, die das Diagramm auf dem höchsten Verstehensniveau (Niveau 6) durchdringen können.

Tabelle 25. Vergleich von Lernenden der einzelnen Gruppen in Hinblick auf das von ihnen erreichte Verstehensniveau, geordnet nach Vergleichen zur Beantwortung der Forschungsfragen 5a und 5b

Gruppe	Mittelwert	SD	IQR	Min.	25 %	Median	75 %	Max.	n
Vergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 5a									
I-S-EI-Erk	3.68	1.44	2	1	3	4	5	6	41
K-Erk	2.70	1.31	2	1	2	3	4	6	37
Vergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 5b									
I-KA-S-EI-Erk	4.09	1.43	2	1	3	4	5	6	161
K-Erk-Be-nErk	2.80	1.23	2	1	2	3	4	6	187
K-Be-Erk	2.36	1.24	2	1	1	2	3	6	78

¹³⁶ Bei der Interpretation des Mittelwertes ist zu berücksichtigen, dass die Annahme eines metrischen Skalenniveaus hier nicht ohne Weiteres möglich ist. Obgleich eine ausführliche Analyse der jeweiligen Niveaus durchgeführt wurde, kann nicht gewährleistet werden, dass die Abstände zwischen diesen identisch sind. Der Mittelwert wird daher hier nur aus Gründen der leichteren Übersicht präsentiert.

Zur inferenzstatistischen Analyse werden der Wilcoxon-Mann-Whitney-Test sowie der Kruskal-Wallis-Test verwendet. Der Gruppenvergleich mittels Wilcoxon-Mann-Whitney-Test zur Beantwortung von Forschungsfrage 5a zeigt, dass Lernende der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk ($Mdn = 4$, $M = 3.68$, $SD = 1.44$) das Diagramm im Median auf einem statistisch hochsignifikant höheren Niveau verstehen ($U = 1041$, $p = .002$, $d = 0.68$, $r = .32$) als Lernende der Kontrollgruppe K-Erk ($Mdn = 3$, $M = 2.70$, $SD = 1.44$; siehe Abbildung 69 zur grafischen Veranschaulichung). Es handelt sich um einen mittleren, praktisch bedeutsamen Effekt (vgl. Cohen 1988; Hattie 2009).

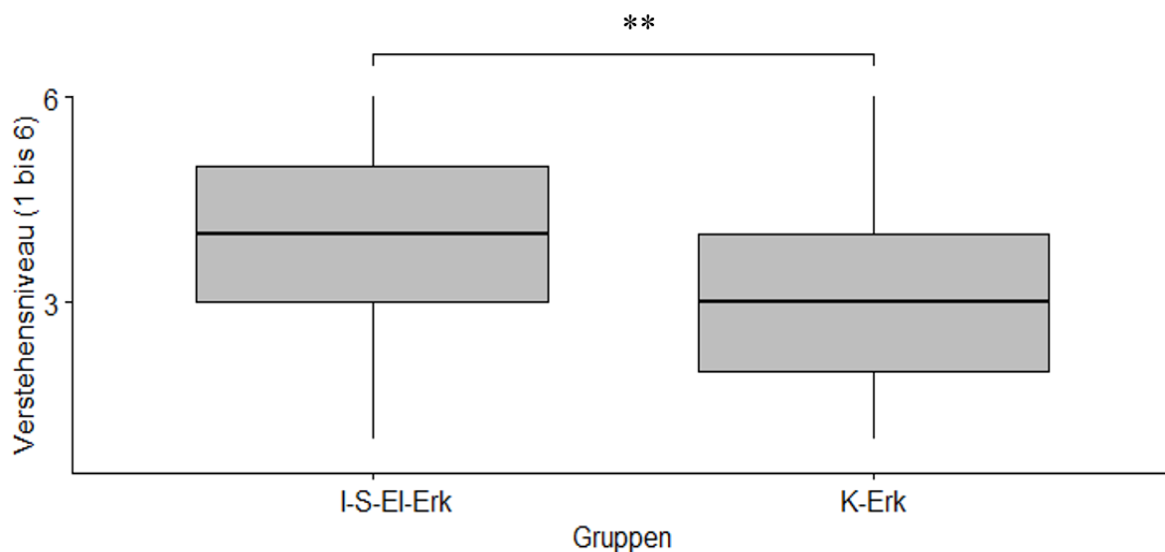


Abbildung 69. Vergleich der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk mit der Kontrollgruppe K-Erk in Hinblick auf das von den jeweiligen Lernenden im Median erreichte Verstehensniveau (eigene Darstellung).

Hinsichtlich der Gruppenvergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 5b zeigen sich mittels Kruskal-Wallis-Test sogar statistisch höchstsignifikante Unterschiede zwischen den drei Gruppen I-KA-S-EI-Erk, K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk ($\chi^2(2) = 93.31$, $p < .001$; siehe zur grafischen Veranschaulichung Abbildung 70).

Post-hoc-Analysen unter Verwendung der konservativen Bonferroni-Korrektur zeigen, dass Lernende der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk ($Mdn = 4$, $M = 4.09$, $SD = 1.43$) im Median ein statistisch höchstsignifikant höheres Verstehensniveau erreichen ($z = 7.81$, $p < .001$, $d = 0.92$, $r = .42$) als Lernende der Kontrollgruppen K-Erk-Be-nErk ($Mdn = 3$, $M = 2.80$, $SD = 1.23$) und ebenso ein statistisch höchstsignifikant höheres Verstehensniveau ($z = 8.43$, $p < .001$, $d = 1.30$, $r = .54$) als Lernende der Kontrollgruppe K-Be-Erk ($Mdn = 2$, $M = 2.36$, $SD = 1.24$; zur grafischen Veranschaulichung siehe Abbildung 70).

Der Unterschied zwischen der Instruktionsgruppe I-KA-S-EI-Erk und der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk ist nach Cohen (1988) ein Effekt mittlerer Größe; der Unterschied zwischen der Instruktionsgruppe I-KA-S-EI-Erk und der Kontrollgruppe K-Be-Erk ist ein großer Effekt (vgl. ebd.).¹³⁷ In beiden Fällen handelt es sich um praktisch bedeutsame Effekte (vgl. Hattie 2009).

Zudem zeigt sich ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Kontrollgruppen K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk ($z = 2.39, p = .017, d = 0.30, r = .15$). Lernende der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk agieren im Median auf einem höheren Niveau als Lernende der Kontrollgruppe K-Be-Erk (siehe Abbildung 70). Der Effekt ist allerdings klein und praktisch wenig bedeutsam (vgl. Cohen 1988; Hattie 2009).

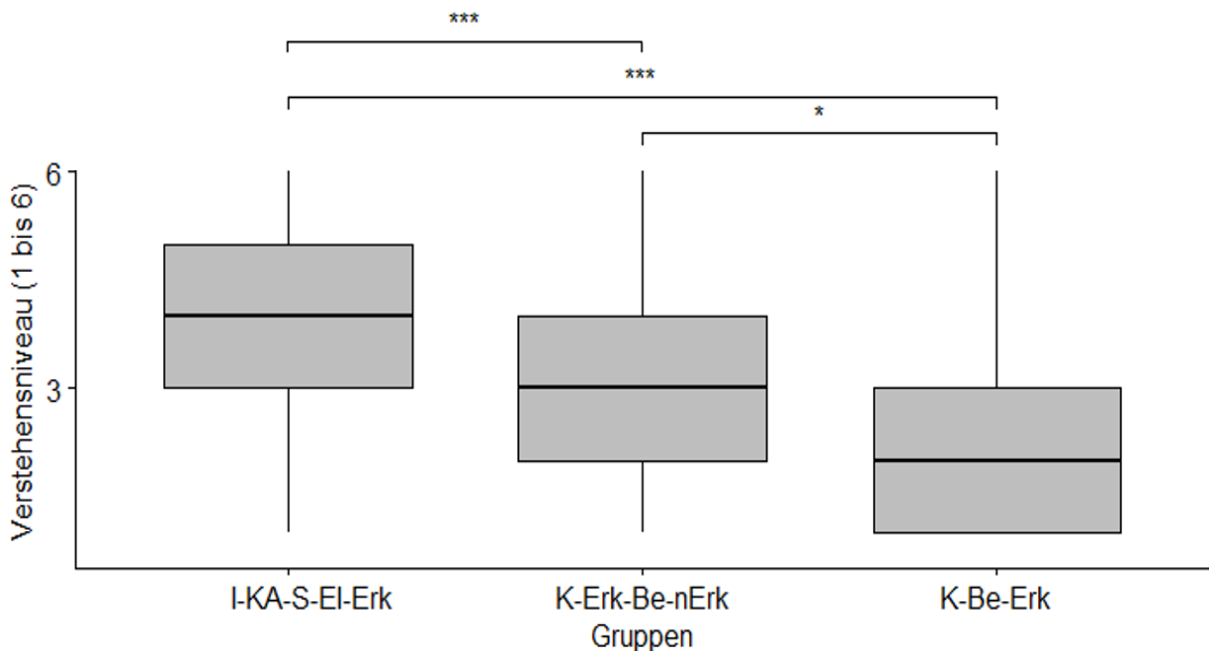


Abbildung 70. Vergleich der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk mit den Kontrollgruppen K-Be-Erk und K-Erk-Be-nErk in Hinblick auf das von den jeweiligen Lernenden im Median erreichte Verstehensniveau (eigene Darstellung).

In Übereinstimmung mit den Erwartungen an die instruktionalen Maßnahmen erwiesen sich die Lernenden der beiden Interventionsgruppen in Hinblick auf das Diagrammverstehen gegenüber den Lernenden der jeweiligen Kontrollgruppen statistisch signifikant bzw. sogar höchstsignifikant überlegen.

¹³⁷ Es sei daran erinnert, dass Lernende der Kontrollgruppe K-Be-Erk über statistisch signifikant geringeres Vorwissen und statistisch signifikant geringe Fähigkeiten beim konkreten vorwissensbasierten Schlussfolgern verfügen als Lernende der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk.

8.3.3.2 Zusammenhang zwischen Gruppenzugehörigkeit und Verstehen

8.3.3.2.1. Analyse der Verteilung der Lernenden auf die sechs Verstehensniveaus

Um detailliertere Erkenntnisse in Hinblick auf die Wirksamkeit der instruktionalen Maßnahmen zu gewinnen und um mögliche Hinweise auf potenzielle Wirkmechanismen zu identifizieren, wird im Folgenden die Verteilung der Lernenden auf die jeweiligen Verstehensniveaus in Abhängigkeit von ihrer Gruppenzugehörigkeit betrachtet.

Zur Übersicht dienen grafische Analysen¹³⁸ sowie Kontingenzanalysen (vgl. Holling & Gediga 2011). Um die Ergebnisse der jeweiligen Kontingenzanalysen statistisch abzusichern, wurde der Chi-Quadrat-Test (vgl. Sibbertsen & Lehne 2015) verwendet (vgl. zu einem ähnlichen Vorgehen Jördens et al. 2016).

Analog zu dem bisherigen Vorgehen werden auch hier zunächst die beiden zur Beantwortung von Forschungsfrage 5a relevanten Vergleichsgruppen I-S-EI-Erk und K-Erk miteinander verglichen.

Abbildung 71 zeigt, dass in der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk anteilig weniger Lernende auf den ersten beiden Verstehensniveaus (Niveaus 1 und 2) verbleiben als in der Kontrollgruppe K-Erk. Lernende auf den Niveaus 1 und 2 agieren vornehmlich im Graphenraum. Sie analysieren das Diagramm oberflächlich-bildlich und abstrahieren bei ihrer Analyse nicht bzw. nur sehr begrenzt von der grafischen Darstellung. Zudem agieren in der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk anteilig mehr Lernende als in der Kontrollgruppe K-Erk auf den höchsten Niveaus 5 und 6. Lernenden auf diesen Niveaus gelingt es, einen elaborierten Situationsraum zu konstruieren und sich (dort) den Einfluss unterschiedlicher Teilchenkonzentrationen auf die Wahrscheinlichkeit vorzustellen, dass diese aufeinandertreffen. Gemeinsam ist beiden Gruppen, dass die meisten Lernenden auf Niveau 3 verbleiben. Lernende, die auf Niveau 3 agieren, abduzieren fachlich ungeeignete Erklärungshypothesen, ohne sie gegen die Daten zu testen bzw. ohne sie zu revidieren. Die hier nur kurz angedeuteten Probleme der Lernenden werden vertiefend in den Abschnitten 8.3.3.2.2 und 9.3 diskutiert.

¹³⁸ Die Verwendung eines Histogramms zur Darstellung ordinalskalierte Daten ist möglich (vgl. Janssen & Laatz 2017), aber ungewöhnlich. Die grafische Darstellung mithilfe von Histogrammen wurde hier gewählt, da die Verschiebung der Anteile dadurch leichter auf den ersten Blick zu erkennen war als bei Darstellung durch ein Säulen- oder Balkendiagramm.

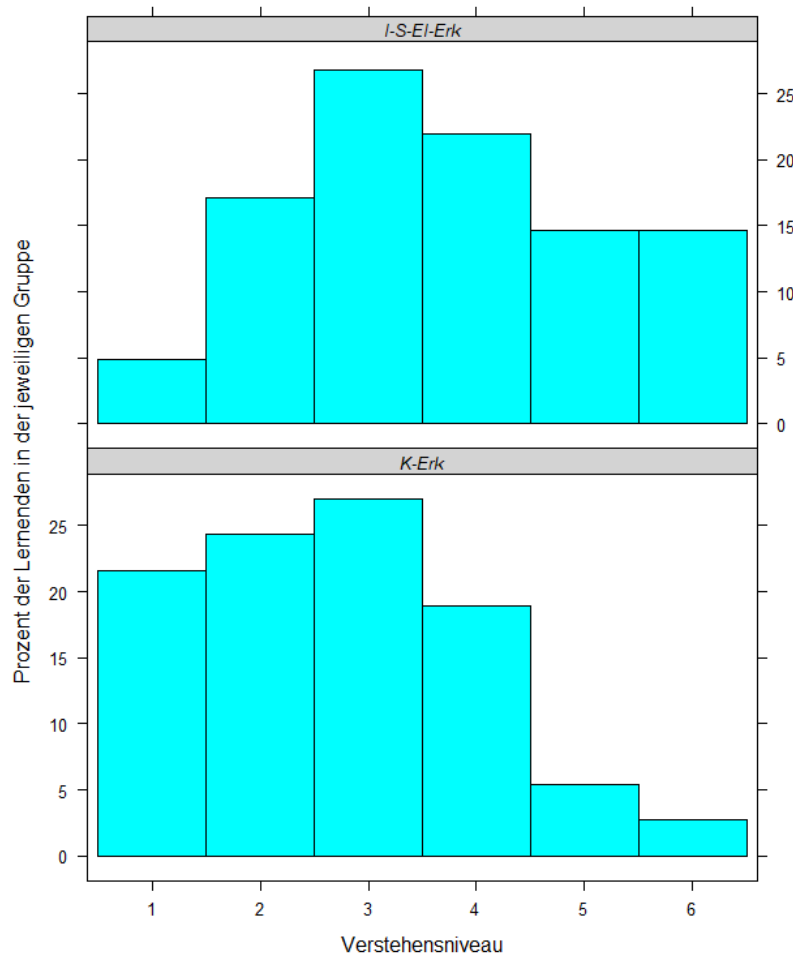


Abbildung 71. Histogramm der Verteilung der Lernenden der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk und der Kontrollgruppe K-Erk auf die sechs Verstehensniveaus (eigene Darstellung)

Die Kontingenztabelle (siehe Tabelle 26) verdeutlicht die zuvor – anhand von Abbildung 71 – beschriebenen Gemeinsamkeiten und Unterschiede in Hinblick auf die Verteilung der Lernenden. Die Verteilung der Lernenden aus den beiden Gruppen I-S-EI-Erk und K-Erk auf die einzelnen Niveaus unterscheidet sich nur unwesentlich von einer unter Unabhängigkeit von Gruppenzugehörigkeit und erreichtem Verstehensniveau erwarteten Verteilung. Der beschriebene Zusammenhang¹³⁹ zwischen Gruppenzugehörigkeit und erreichtem Verstehensniveau erweist sich lediglich auf dem 0.1-Niveau als statistisch signifikant ($\chi^2(5) = 9.54$, $p = .096$). Größere (statistisch aber nicht signifikante) Abweichungen von einer

¹³⁹ Es wurde ein Chi-Quadrat-/Fischer-Exakt-Test durchgeführt. Der Fischer-Exakt-Test war notwendig, da in 5 von 12 Fällen (41,67 %) die erwartete (absolute) Zellohäufigkeit unter < 5 lag. Es sei allerdings betont, dass keine der erwarteten Zellohäufigkeiten unter 1 lag. Das Ergebnis des Tests ist aufgrund der genannten geringen Zellohäufigkeiten trotzdem unter Vorbehalt zu betrachten. Auf eine möglicherweise reduzierte Teststärke sei hingewiesen (vgl. Field 2012, S. 818).

erwarteten Verteilung zeigen sich, wie zuvor bereits grafisch angedeutet, in erster Linie für Niveau 1 und Niveau 6 (siehe Zeile standardisierte). In der Kontrollgruppe agieren weniger Lernende auf Niveau 6 und mehr Lernende auf Niveau 1 als unter Unabhängigkeit zu erwarten gewesen wäre; in der Interventionsgruppe agieren dagegen mehr Lernende auf Niveau 6 und weniger Lernende auf Niveau 1 (siehe Tabelle 26).

Tabelle 26. Kontingenztabelle der Verteilung der Lernenden der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk und der Kontrollgruppe K-Erk auf die sechs Verstehensniveaus, Vergleich zur Beantwortung der Forschungsfrage 5a

Gruppe	Parameter	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5	Niveau 6	
I-S-EI-Erk	Anzahl (beobachtet)	2	7	11	9	6	6	$\Sigma = 37$
	Anzahl (erwartet)	5.26	8.41	11.04	8.41	4.21	3.68	
	χ^2 -Beitrag	2.02	0.24	0.00	0.04	0.77	1.43	
	Gruppenanteil	4.88 %	17.97 %	26.83 %	21.95 %	14.63 %	14.63 %	47.43 %
	stand. Residuen	-1.42	-0.49	-0.01	0.20	0.88	1.21	
K-Erk	Anzahl (beobachtet)	8	9	10	7	2	1	$\Sigma = 41$
	Anzahl (erwartet)	4.74	7.59	9.96	7.59	3.80	3.32	
	χ^2 -Beitrag	2.24	0.26	0.00	0.05	0.85	1.62	
	Gruppenanteil	21.62 %	24.32 %	27.03 %	18.92 %	5.41 %	2.70 %	52.56 %
	stand. Residuen	1.50	0.51	0.01	-0.21	-0.92	-1.27	
Lernende gesamt	$\Sigma = 72$	$\Sigma = 10$	$\Sigma = 16$	$\Sigma = 21$	$\Sigma = 16$	$\Sigma = 8$	$\Sigma = 78$	

Für die Gruppenvergleiche, die zur Beantwortung von Forschungsfrage 5b durchgeführt wurden, zeigte sich eine ähnliche Tendenz. Auch hier agieren in der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk, verglichen mit den beiden Kontrollgruppen K-Erk-Be-nErk und K-Erk, deutlich weniger Lernende auf den untersten beiden Niveaus und deutlich mehr Lernende auf den höchsten beiden Niveaus (siehe Abbildung 72 und Tabelle 27 auf der nachfolgenden Seite).

Der Zusammenhang zwischen der Gruppenzugehörigkeit und dem erreichten Verstehensniveau ist hier sogar höchstsignifikant ($\chi^2(10) = 129.14, p < .001$).

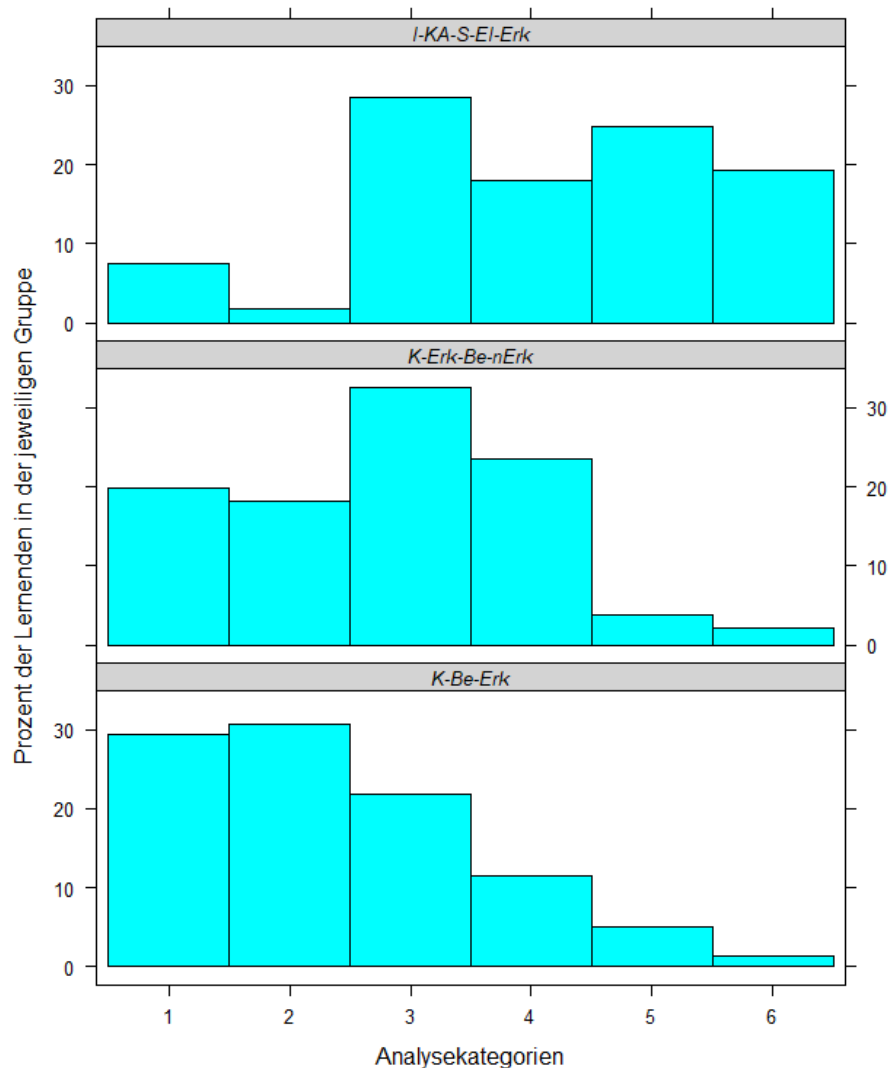


Abbildung 72. Histogramm der Verteilung der Lernenden der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk sowie der Kontrollgruppen K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk auf die sechs Verstehensniveaus (eigene Darstellung)

In den Gruppen I-KA-S-EI-Erk und K-Erk-Be-nErk agieren jeweils die meisten Lernenden auf Niveau 3. In der Kontrollgruppe K-Be-Erk ist dies dagegen nicht der Fall. Hier scheint es der Mehrheit der Lernenden bereits schwer zu fallen, das Diagramm inhaltlich zu interpretieren. Die meisten Lernenden in der Kontrollgruppe K-Be-Erk (fast zwei Drittel) agieren auf den Niveaus 1 und 2 (siehe Tabelle 27). Die entsprechenden Anteile sind statistisch signifikant höher als bei gruppenunabhängiger Verteilung der Lernenden auf die Niveaus zu erwarten gewesen wäre (siehe Zeile standardisierte Residuen in Tabelle 27).

In der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk ist der Anteil an Lernenden, die das Diagramm auf Niveau 1 oder 2 erklären, statistisch signifikant geringer; der Anteil von Lernenden, die auf den höchsten beiden Niveaus erklären, ist wesentlich höher als bei unabhängiger Verteilung zu erwarten gewesen wäre (siehe Zeile

standardisierte Residuen in Tabelle 27). In der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk erklären z. B. nicht einmal 2 % der Lernenden das Diagramm induktiv (siehe Gruppenanteil Niveau 2 in Tabelle 27); über 90 % der Lernenden sind dazu in der Lage, Erklärungshypothesen abduktiv zu bilden (Niveaus 3 bis 6). In den beiden Kontrollgruppen ist dieser Anteil deutlich geringer. Zu einer ausführlichen Berichterstattung über entsprechende Unterschiede sei auf den nachfolgenden Abschnitt sowie auf Abschnitt 9.3 verwiesen.

Tabelle 27. Kontingenztabelle der Verteilung der Lernenden der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk sowie der Kontrollgruppen K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk auf die sechs Verstehensniveaus, Vergleich zur Beantwortung der Forschungsfrage 5b

Gruppe	Parameter	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	Niveau 4	Niveau 5	Niveau 6	
I-KA-S-EI-Erk	Anzahl (beobachtet)	12	3	46	29	40	31	$\Sigma = 161$
	Anzahl (erwartet)	27.21	23.05	46.86	30.99	19.28	13.61	
	χ^2 -Beitrag	8.50	17.44	0.02	0.13	22.29	22.24	
	Gruppenanteil	7.45 %	1.86 %	28.57 %	18.01 %	24.85 %	19.26 %	37.79 %
	stand. Residuen	-2.92	-4.18	-0.13	-0.36	4.72	4.72	
K-Erk-Be-nErk	Anzahl (beobachtet)	37	34	61	44	7	4	$\Sigma = 187$
	Anzahl (erwartet)	31.61	26.78	54.43	36.00	22.39	15.80	
	χ^2 -Beitrag	0.92	1.95	0.79	1.78	10.57	8.82	
	Gruppenanteil	19.79 %	18.18 %	32.62 %	23.53 %	3.74 %	2.14 %	43.90 %
	stand. Residuen	0.96	1.40	0.89	1.33	-3.25	-2.97	
K-Be-Erk	Anzahl (beobachtet)	23	24	17	9	4	1	$\Sigma = 78$
	Anzahl (erwartet)	13.18	11.17	22.70	15.01	9.34	6.59	
	χ^2 -Beitrag	7.31	14.74	1.43	2.41	3.05	4.74	
	Gruppenanteil	29.49 %	30.77 %	21.80 %	11.54 %	5.13 %	1.28 %	18.31 %
	stand. Residuen	2.70	3.84	-1.20	-1.55	-1.75	-2.18	
Lernende gesamt		$\Sigma = 72$	$\Sigma = 61$	$\Sigma = 124$	$\Sigma = 82$	$\Sigma = 51$	$\Sigma = 36$	$\Sigma = 426$

8.3.3.2.2. Analyse von Lern- und Verstehenshürden

In Abschnitt 7.5 wurde in Zusammenhang mit der theoriegeleiteten Operationalisierung des Diagrammverstehens bereits erläutert, dass ressourcen- bzw. kompetenzorientiert angenommen wird, dass Lernende über verschiedene Fähigkeiten bzw. Kompetenzen verfügen müssen, damit es ihnen möglich ist, das ihnen unbekanntes Diagramm umfassender und tiefergehend, d. h. auf einem höheren Verstehensniveau, analysieren und verstehen zu können. Im Folgenden wird, dieser Logik folgend, allerdings unter Fokussierung auf die Probleme und nicht auf die Fähigkeiten der Lernenden, davon ausgegangen, dass nicht explizit zu beobachtende Lern- und Verstehenshürden es den Lernenden erschweren, höhere Verstehensniveaus zu erreichen.

Um im weiteren Verlauf dieser Arbeit leichter auf mögliche Lern- und Verstehenshürden der Lernenden zurückschließen zu können, werden die sechs Verstehensniveaus in Hinblick auf gemeinsame Probleme defizitorientiert zu insgesamt vier Analysekatégorien zusammengefasst. Die Verteilung der Lernenden auf die vier Analysekatégorien wird explorativ untersucht. Eine ausführliche inhaltliche Interpretation der Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 8.4 und insbesondere in Abschnitt 9.3.

Lernende auf Verstehensniveau 1 können *nicht* von der grafischen Darstellung *abstrahieren* und verbleiben vollständig im Graphenraum (siehe Abschnitt 7.6.1). Sie stellen eine eigene Analysekatégorie dar, die im Folgenden defizitorientiert als *NICHT-Abstrahierer*innen* bezeichnet wird.

Lernende auf Verstehensniveau 2 (siehe Abschnitt 7.6.2) scheinen zwar grundsätzlich in der Lage zu sein, von der grafischen Darstellung zu abstrahieren und zumindest einen rudimentären Situationsraum konstruieren zu können, sie sind aber nicht dazu fähig, den Situationsraum zu elaborieren. Sie sind daher auch *nicht* in der Lage, Erklärungshypothesen zu *abduzieren*. Anstatt die Graphenverläufe abduktiv zu erklären, erklären sie diese induktiv. Entsprechende Lernende stellen ebenfalls eine eigene Analysekatégorie dar, die analog zur Katégorie *NICHT-Abstrahierer*innen* ebenfalls defizitorientiert als Katégorie *NICHT-Abduzierer*innen* bezeichnet wird.

Lernende auf Verstehensniveau 3 (siehe Abschnitt 7.6.3) sind in der Lage, von der grafischen Darstellung zu abstrahieren und Erklärungshypothesen zu abduzieren. Die von ihnen abduzierten Erklärungshypothesen stehen allerdings im Widerspruch zu den grafischen Evidenzen. Der von ihnen konstruierte Situa-

onsraum entspricht daher nicht dem in dem Diagramm referierten Situationsraum. Lernende auf Niveau 3 testen die aus diesem Situationsraum stammenden Erklärungshypothesen *nicht* gegen die Daten und/oder vermeiden es, die zuvor gebildeten Erklärungshypothesen zu *revidieren*. Die betreffenden Lernenden bilden ebenfalls eine eigene Problemkategorie, die analog zu den ersten beiden Kategorien als *NICHT-Revidierer*innen* bezeichnet wird.

Lernende, die auf Verstehensniveau 4 und höher agieren (siehe Abschnitte 7.6.4 (Niveau 4), 7.6.5 (Niveau 5) und 7.6.6 (Niveau 6)), zeigen keine diagrammspezifischen Probleme. Lernende dieser Kategorie sind alle dazu in der Lage, einen Situationsraum zu konstruieren und Erklärungshypothesen aus dem Situationsraum zu abduzieren, die nicht im Widerspruch zu den grafischen Evidenzen stehen. Die Lernenden dieser drei Niveaus werden daher im Folgenden ressourcen- bzw. kompetenzorientiert zur Kategorie *widerspruchsfreie Erklärer*innen* zusammengefasst.

Anders als im vorausgegangenen Abschnitt werden die hier gebildeten vier Analysekatogorien im Folgenden nicht entsprechend des experimentellen Designs (siehe Forschungsfragen 5a und 5b), sondern beschreibend über alle Gruppen hinweg miteinander verglichen. Schlussfolgerungen lassen sich aus diesen Vergleichen daher nur eingeschränkt ziehen. Es erfolgt daher auch keine inferenzstatistische, sondern eine ausschließlich deskriptive Betrachtung (vgl. Westermann 2016).

Der Vergleich der drei Kontrollgruppen (K-Be-Erk, K-Erk und K-Erk-Be-nErk) zeigt eine ähnliche Verteilung der Lernenden auf alle vier Analysekatogorien (siehe Abbildung 73). Lediglich in der Kontrollgruppe K-Be-Erk befinden sich vergleichsweise viele *NICHT-Abstrahierer*innen* sowie *NICHT-Abduzierer*innen* und vergleichsweise wenige *NICHT-Revidierer*innen* sowie *widerspruchsfreie Erklärer*innen* (siehe dazu auch Ausführungen in Abschnitt 8.3.3.2.1). In der Kontrollgruppe K-Be-Erk scheinen somit vergleichsweise viele Lernende im Graphenraum zu agieren.

Die beiden Interventionsgruppen (I-S-EI-Erk und I-KA-S-EI-Erk) ähneln einander ebenfalls hinsichtlich der Verteilung der Lernenden auf die vier Analysekatogorien. Der Anteil an Lernenden, die sich den Analysekatogorien *NICHT-Abstrahierer*innen* und *NICHT-Abduzierer*innen* zuordnen lassen, ist in beiden Interventionsgruppen relativ niedrig, der Anteil an Lernenden in der Kategorie *widerspruchsfreie Erklärer*innen* dagegen relativ hoch. Auffällig ist insbesondere der niedrige Anteil an Lernenden in der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk, die

sich der Analysekategorie NICHT-Abduzierer*innen zuordnen lassen. Auf diese Beobachtung wurde im vorausgegangenen Abschnitt im Rahmen der experimentellen Gruppenvergleiche im Kontext von Niveau 2 bereits hingewiesen.

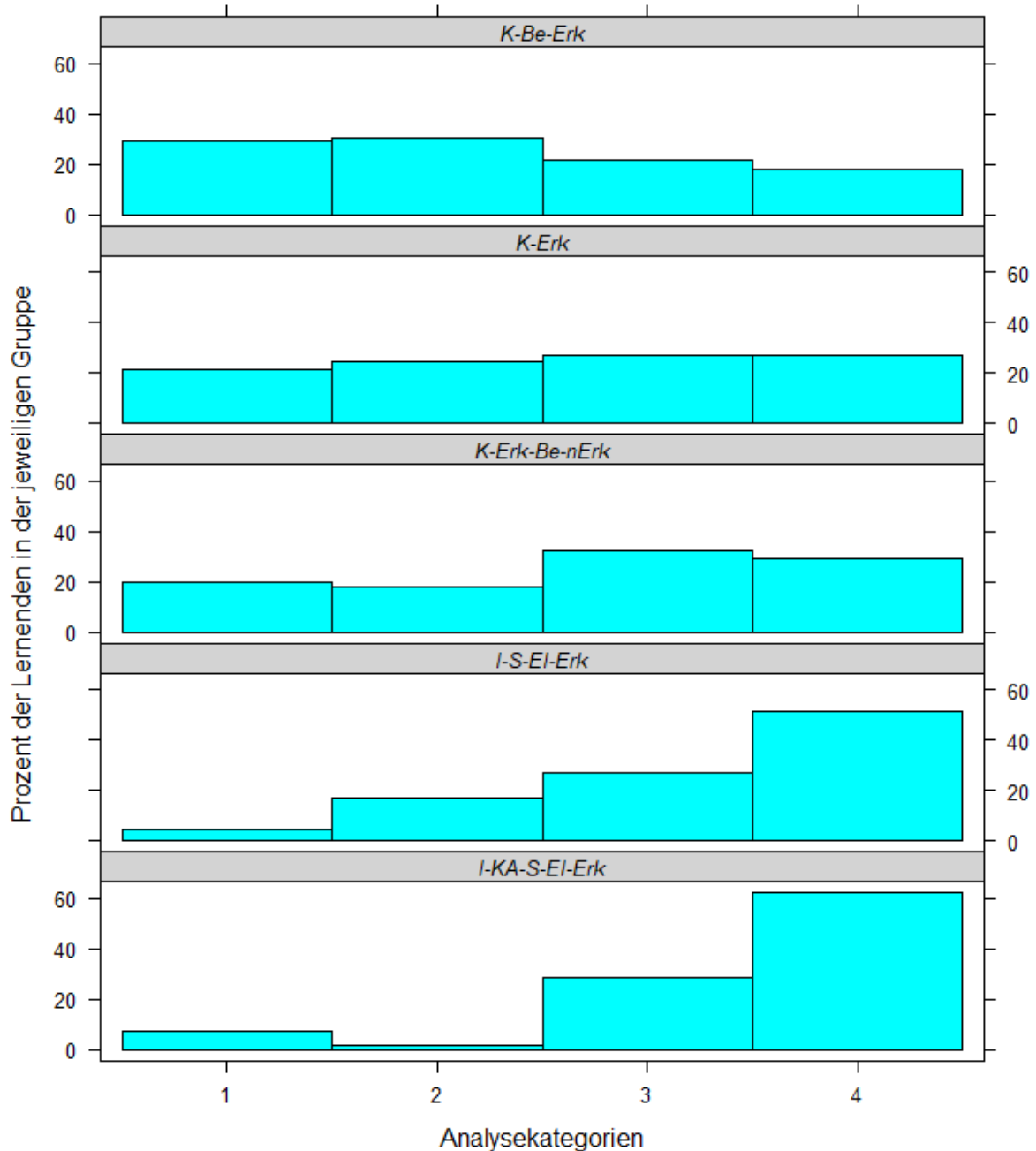


Abbildung 73. Histogramm der Verteilung der Lernenden aller fünf Gruppen auf die vier Analysekategorien NICHT-Abstrahierer*innen (Kategorie 1), NICHT-Abduzierer*innen (Kategorie 2), NICHT-Revidierer*innen (Kategorie 3) und Erklärer*innen (Kategorie 4).

Der Vergleich von Interventions- und Kontrollgruppen offenbart, dass sich in den Interventionsgruppen anteilig mehr Lernende in der Analysekategorie widerspruchsfreie Erklärer*innen befinden und weniger Lernende in den Analyse-

kategorien NICHT-Abstrahierer*innen und NICHT-Abduzierer*innen. Der Anteil an Lernenden, die sich der Kategorie NICHT-Revidierer*innen zuordnen lassen, ist dagegen über alle Gruppen hinweg, mit ungefähr 30 % der Lernenden, ähnlich hoch (siehe Tabelle 28).

Tabelle 28. Kontingenztabelle der Verteilung der Lernenden aller fünf Gruppen auf die vier Analysekatogorien NICHT-Abstrahierer*innen (Kategorie 1), NICHT-Abduzierer*innen (Kategorie 2), NICHT-Revidierer*innen (Kategorie 3) und Erklärer*innen (Kategorie 4).

Gruppe	Parameter	NICHT- Abstrahierer *innen	NICHT- Abduzierer *innen	NICHT- Revidierer *innen	wider- spruchsfreie Erklärer* innen	
K- Be-Erk	Anzahl	23	24	17	14	$\Sigma = 78$
	Gruppen- anteil	29 %	31 %	22 %	18 %	15 %
K- Erk	Anzahl	8	9	10	10	$\Sigma = 37$
	Gruppen- anteil	22 %	24 %	27 %	27 %	7 %
K- Erk-Be- nErk	Anzahl	37	34	61	55	$\Sigma = 187$
	Gruppen- anteil	20 %	18 %	33 %	29 %	37 %
I- S-EI-Erk	Anzahl	2	7	11	21	$\Sigma = 41$
	Gruppen- anteil	5 %	17 %	27 %	51 %	8 %
I- KA-S- EI-Erk	Anzahl	12	3	46	100	$\Sigma = 161$
	Gruppen- anteil	7 %	2 %	29 %	62 %	32 %
Lernende gesamt		$\Sigma = 82$	$\Sigma = 77$	$\Sigma = 145$	$\Sigma = 200$	$\Sigma = 504$

8.3.3.3 Unterschiede in Hinblick auf die kognitive Belastung

Die kognitive Belastung der Lernenden wurde in die drei Konstrukte extrinsische (ECL), intrinsische (ICL) und lernbezogene kognitive Belastung (GCL) differenziert (siehe Tabelle 29; siehe Abschnitt 8.3.1 sowie Abschnitt 3.8.3 zu einer ausführlichen Vorstellung der Konstrukte).

Der Vergleich der Gruppen zur Beantwortung von Forschungsfrage 5a, Interventionsgruppe I-S-EI-Erk ($M = 2.60$, $SD = 0.95$) und K-Erk ($M = 2.75$, $SD = 1.08$), zeigt hinsichtlich der *extrinsischen kognitiven Belastung (ECL)* keinen statisch

signifikanten Unterschied zwischen den beiden Gruppen ($t(68.41) = 0.99$, $p = 0.33$, $d = 0.22$, $r = .11$). Der Unterschied ist gering und praktisch nicht bedeutsam (vgl. Cohen 1988, Hattie 2009).

Tabelle 29. Kognitive Belastung von Lernenden beim Lernen mit dem Diagramm differenziert in ECL, ICL und GCL, geordnet nach Vergleichen zur Beantwortung der Forschungsfragen 5a und 5b

Gruppe	ECL			ICL		GCL			
	Mittelwert	Median	SD	Mittelwert	SD	Median	Mittelwert	SD	Median
Vergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 5a									
I-S-EI-Erk	2.59	2.67	0.95	3.11	1.07	3.00	3.66	1.15	3.75
K-Erk	2.75	2.67	1.08	3.47	1.37	3.50	3.96	1.15	4.00
Vergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 5b									
I-KA-S-EI-Erk	2.82	2.67	1.05	3.35	1.27	3.25	3.92	1.08	4.00
K-Erk-Be-nErk	3.12	3.00	1.20	3.81	1.32	4.00	4.20	1.05	4.25
K-Be-Erk	2.91	2.67	0.93	3.92	1.22	3.75	4.06	1.18	4.25

Auch hinsichtlich der *intrinsischen kognitiven Belastung (ICL)* besteht zwischen der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk ($Mdn = 3.00$, $M = 3.11$, $SD = 1.07$) und der Kontrollgruppe K-Erk ($Mdn = 3.50$, $M = 3.47$, $SD = 1.37$) kein statistisch signifikanter Unterschied ($U = 655.5$, $p = 0.304$, $d = 0.24$, $r = .12$). Der Effekt ist klein (vgl. Cohen 1988).

Ähnliches gilt für die *lernbezogene kognitive Belastung (GCL)*. Auch hier besteht zwischen der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk ($M = 3.66$, $SD = 1.15$) und der Kontrollgruppe K-Erk ($M = 3.96$, $SD = 1.15$) kein statistisch signifikanter Unterschied ($t(75.20) = 1.15$, $p = 0.252$, $d = 0.26$, $r = .13$). Auch dieser Effekt ist klein (vgl. Cohen 1988).

In Hinblick auf die Beantwortung von Forschungsfrage 5a lässt sich daher zusammenfassen, dass sich die kognitive Belastung von Lernenden in der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk und der Kontrollgruppe K-Erk, differenziert in extrinsische (ECL), intrinsische (ICL) und lernbezogene kognitive Belastung (GCL), nicht statistisch signifikant voneinander unterscheidet. Der Befund deckt sich mit den Ergebnissen aus Abschnitt 6.3.2.4.

Auch hinsichtlich Forschungsfrage 5b zeigen sich weder für die *extrinsische kognitive Belastung (ECL)* ($\chi^2(2) = 4.9, p = .09$) noch für die *lernbezogene kognitive Belastung (GCL)* ($F(2, 423) = 2.8, p = .062$) der Lernenden statistisch signifikante Unterschiede zwischen den drei Gruppen I-KA-S-EI-Erk, K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk.

Allerdings offenbaren sich mittels Varianzanalyse Unterschiede für die *intrinsische kognitive Belastung (ICL)* der Lernenden ($F(2, 423) = 7.49, p = .001$). Post-hoc-Analysen mittels Bonferroni-Korrektur zeigen, dass die Unterschiede nahezu vollständig auf die geringe intrinsische kognitive Belastung der Lernenden in der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk ($M = 3.35, SD = 1.27$) zurückzuführen sind.

Die von den Lernenden empfundene intrinsische kognitive Belastung ist in der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk im Durchschnitt sowohl statistisch höchstsignifikant niedriger ($t_{(158.01)} = 3.33, p = .003, d = 0.36, r = .18$) als in der Kontrollgruppe K-Be-Erk ($M = 3.92, SD = 1.22$) als auch statistisch höchstsignifikant niedriger ($t_{(342,18)} = 3.29, p = .003, d = 0.45, r = .22$) als in der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk ($M = 3.81, SD = 1.32$). In beiden Fällen handelt es sich jedoch um kleine bis mittlere Effekte (vgl. Cohen 1988). Die beiden Kontrollgruppen K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk unterscheiden sich dagegen hinsichtlich ihrer intrinsischen kognitiven Belastung nicht statistisch signifikant voneinander ($t_{(156.03)} = 0.65, p = .79, d = 0.09, r = .04$). Der Effekt ist sehr klein (vgl. Cohen 1988).

In Hinblick auf die Beantwortung von Forschungsfrage 5b lässt sich daher zusammenfassen, dass sich die Lernenden in den jeweils verglichenen Interventions- und Kontrollgruppen hinsichtlich der von ihnen empfundenen extrinsischen kognitiven (ECL) und der lernbezogenen kognitiven Belastung (GCL) nicht statistisch signifikant voneinander unterscheiden. Unterschiede zeigen sich dagegen in Hinblick auf die intrinsische kognitive Belastung (ICL). Die von den Lernenden durchschnittlich empfundene intrinsische kognitive Belastung ist bei Lernenden der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk statistisch signifikant niedriger als bei Lernenden der Kontrollgruppen K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk.

8.3.3.4 Unterschiede in Hinblick auf die mentale Effektivität

Die Ergebnisse der vorausgegangenen Untersuchung zur kognitiven Belastung der Lernenden überraschen dahingehend, dass sich keine statistisch signifikanten Unterschiede hinsichtlich der lernbezogenen kognitiven Belastung (GCL bzw. AIME) zwischen den Interventions- und den Kontrollgruppen zeigten. Vor dem Hintergrund der Ausführungen in Abschnitt 4.3.2 (siehe insbesondere Ausführungen zur investierten mentalen Anstrengung in Abschnitt 3.8.3) wurde erwartet, dass die Lernenden der Interventionsgruppen, angeleitet durch die jeweiligen Maßnahmen, einen erleichterten Zugang zu den Diagramminhalten finden und mehr lernförderlichere kognitive Energie in das Analysieren des Diagramms und das Lernen investieren können als die Lernenden in den Kontrollgruppen.

Deskriptiv zeigte sich wiederum sogar, dass die Lernenden in den Kontrollgruppen – obgleich ihre Lernerfolge statistisch signifikant geringer waren (siehe Abschnitte 8.3.3.1 und 8.3.3.2) – mehr mentale Energie in das Analysieren und Lernen investierten als die Lernenden in den Interventionsgruppen.

Eine mögliche Erklärung – die in Einklang mit den in Abschnitt 4.3.2 aufgestellten Vermutungen und den Ergebnissen in Abschnitten 8.3.3.1 und 8.3.3.2 steht – könnte sein, dass die Lernenden in den Kontrollgruppen ihre kognitive Energie weniger zielgerichtet in das Erklären oder Verstehen der Diagramminhalte (im Situationsraum) investiert und sich stattdessen verstärkt auf das perzeptuelle Beschreiben des Diagramms (im Graphenraum) konzentriert haben. Um diese Vermutung zu überprüfen, wird nachfolgend die Relation zwischen der von den Lernenden investierten mentalen Energie und dem jeweils erreichten Verstehensniveau analysiert.

Als Messkonstrukt wird dazu die von Paas und van Merriënboer (1993) entwickelte *mental* bzw. *instructional efficiency* zur Bewertung instruktionaler Maßnahmen verwendet (vgl. ebd.). Es sei darauf hingewiesen, dass Paas und van Merriënboer (1993) Effizienz hier sehr umfassend betrachten und auch die Effektivität in das Konstrukt einbeziehen. Sie argumentieren:

„learners' behavior in a particular condition is more efficient if (1) their performance is higher than might be expected on the basis of their invested mental effort and/or (2) their invested mental effort is lower than might be expected on the basis of their performance“ (ebd. S. 783).

Das entsprechende Konstrukt wurde bereits in zahlreichen pädagogischen Untersuchungen verwendet (zu einer Übersicht siehe Van Gog & Paas 2008; Paas

et al. 2003) und in den letzten Jahren auch auf Bereiche der Verarbeitung grafisch dargestellter quantitativer Informationen übertragen (vgl. Huang, Eades & Hong 2009, Huang 2014).

Da vor dem Hintergrund dieser Untersuchung insbesondere relevant ist, wo die kognitive Energie investiert wird, ob sie z. B. in die Analyse im Graphen- oder die Analyse im Situationsraum investiert wird, wird das Konstrukt in dieser Arbeit als *mentale Effektivität* bezeichnet. Zur Berechnung der mentalen Effektivität wird die z-standardisierte Testleistung mit den z-standardisierten Werten der investierten lernförderlichen mentalen Anstrengung (GCL) entsprechend der nachfolgenden Gleichung in Relation gesetzt (vgl. Paas & van Merriënboer 1993; Van Gog & Paas 2008). Zur Erfassung der Testleistung wurde das erreichte Verstehensniveau verwendet¹⁴⁰:

$$\text{mentale Effektivität} = \frac{z(\text{Verstehensniveau}) - z(\text{GCL})}{\sqrt{2}}$$

Aus der Gleichung folgt, dass der Wert für die mentale Effektivität dann besonders niedrig (negativ) ist, wenn Lernende, die auf einem unterdurchschnittlichen Verstehensniveau agieren, überdurchschnittlich viel kognitive Energie (GCL) in das Erreichen dieses Niveaus investieren. Dies wäre beispielsweise der Fall, wenn Lernende, die das Diagramm vollständig im Graphenraum beschreiben (Niveau 1), sich dabei besonders stark konzentrieren. Die mentale Effektivität ist hoch (positiv), wenn Lernende, die auf einem überdurchschnittlich hohen Verstehensniveau agieren, sich dazu nur unterdurchschnittlich stark konzentrieren müssen. Dies könnte beispielsweise bei Lernenden der Fall sein, die sich vergleichsweise wenig konzentrieren müssen, um widerspruchsfrei Erklärungshypothesen zu abduzieren (Niveau 4 und höher). Anhand von Tabelle 30 ist im Sinne einer deskriptiven Betrachtung bereits zu erkennen, dass Lernende in den Kontrollgruppen im Durchschnitt – entsprechend der zuvor geäußerten Überlegungen – mehr kognitive Energie in eher basale Tätigkeiten des Diagrammverstehens investieren, insbesondere Tätigkeiten im Graphenraum, als Lernende in den beiden Interventionsgruppen.

¹⁴⁰ Es sei darauf hingewiesen, dass die Variable *Verstehensniveau* ordinales Skalenniveau besitzt. Die ermittelten Werte sind daher vor dem Hintergrund einer möglichen Ungenauigkeit zu betrachten.

Tabelle 30. Mentale Effektivität von Lernenden beim Lernen mit dem Diagramm, geordnet nach Vergleichen zur Beantwortung der Forschungsfragen 5a und 5b

Gruppe	Mittelwert	SD	IQR	Min.	25 %	Median	75 %	Max.	n
Vergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 5a									
I-S-EI-Erk	0.46	1.00	1.60	-1.5	-0.39	0.39	1.20	2.3	41
K-Erk	-0.20	1.10	1.28	-2.31	-1.03	-0.39	0.24	2.15	37
Vergleiche zur Beantwortung von Forschungsfrage 5b									
I-KA-S-EI-Erk	0.49	1.01	1.59	-1.83	-0.24	0.40	1.36	2.63	161
K-Erk-Be-nErk	-0.31	0.90	1.20	-2.47	-0.88	-0.40	0.32	1.81	187
K-Be-Erk	-0.43	0.96	1.12	-2.15	-1.04	-0.56	0.08	2.31	78

Um die Befunde gegen den Zufall abzusichern, wurden inferenzstatistische Analysen durchgeführt. In Hinblick auf die Werte für die mentale Effektivität zeigen sich in keiner der fünf Gruppen wesentliche Abweichungen von der Normalverteilung, Verletzungen der Annahme der Varianzhomogenität konnten weder für die zur Beantwortung von Forschungsfrage 5a relevanten Vergleichsgruppen ($F(1, 76) = 0.01, p = .941$) noch für die zur Beantwortung von Forschungsfrage 5b relevanten Gruppen ($F(2, 423) = 1.30, p = .273$) festgestellt werden.

Mittels t-test lässt sich zeigen, dass Lernende der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk ($M = 0.46, SD = 1.00$) ihre kognitive Energie im Durchschnitt effektiver in das Lernen bzw. das Diagrammverstehen investieren als Lernende der Kontrollgruppe K-Erk ($M = -0.20, SD = 1.10$). Der Unterschied zwischen den beiden Gruppen ist hochsignifikant ($t(70) = 3, p = .07, d = 0.63, r = .30$). Es handelt sich um einen mittleren Effekt (vgl. Cohen 1988).

Auch zwischen den Gruppen I-KA-S-EI-Erk, K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk bestehen Unterschiede ($F(2, 423) = 38.3, p < .001$). Die Unterschiede sind nahezu vollständig darauf zurückzuführen, dass Lernende der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk ($M = 0.49, SD = 1.01$) ihre kognitive Energie effektiver in das Lernen bzw. das Diagrammverstehen investieren als die Lernenden der Kontrollgruppen K-Erk-Be-nErk ($M = -0.31, SD = 0.90$) und K-Be-Erk ($M = -0.43, SD = 0.96$). Post-hoc-Analysen mittels Bonferroni-Korrektur zeigen, dass die durchschnittliche mentale Effektivität von Lernenden der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk statistisch höchstsignifikant höher ist als von Lernenden der

Kontrollgruppe K-Be-Erk ($t(160) = 6.79, p < .001, d = 0.94, r = .42$) und ebenso statistisch höchstsignifikant höher als von Lernenden der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk ($t(324) = 7.69, p < .001, d = 0.83, r = .38$). In beiden Fällen handelt es sich um große Effekte (vgl. Cohen 1988). Die beiden Kontrollgruppen K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk unterscheiden sich dagegen nicht statistisch signifikant voneinander ($t(137) = 0.94, p = .614, d = 0.13, r = .06$). Der Effekt ist sehr klein (vgl. Cohen 1988).

In Hinblick auf die Beantwortung von Forschungsfrage 5 lässt sich somit zusammenfassen, dass sich die von den Lernenden durchschnittlich investierte mentale Energie (GCL) zwischen den Gruppen zwar nicht statistisch signifikant unterscheidet (siehe Ergebnisse aus dem vorausgegangenen Abschnitt 8.3.3.3), dass die Lernenden in den Interventionsgruppen ihre kognitiven Ressourcen aber statistisch signifikant effektiver in das Diagrammverstehen investieren als die Lernenden in den Kontrollgruppen. Während die Lernenden der Kontrollgruppen ihre mentale Energie vornehmlich in Tätigkeiten investieren, die im Graphenraum stattfinden, scheinen Lernende in den Interventionsgruppen ihre mentale Energie in die Analyse im Situationsraum zu investieren.¹⁴¹

¹⁴¹ Zusätzlich dazu ist ebenso denkbar, dass Lernende, die in den Instruktionsgruppen auf niedrigeren Verstehensniveaus agieren, dort nur wenige mentale Ressourcen investieren.

8.4. Beantwortung von Forschungsfrage 5

Zur Beantwortung von Forschungsfrage 5 (*Inwiefern sind die in dieser Arbeit entwickelten instruktionalen Maßnahmen geeignet, um Lernende beim Diagrammverstehen zu unterstützen?*) wurden – analog zu Forschungsfrage 3 (siehe insbesondere Abschnitt 6.2.2) – Lernende der Interventionsgruppen (I) und Kontrollgruppen (K) insbesondere in Hinblick auf ihr Diagrammverstehen miteinander verglichen. Betrachtet wurde zudem die kognitive Belastung, welche die Lernenden beim Analysieren des Diagramms verspürt haben, differenziert in die drei Konstrukte extrinsische (ECL), intrinsische (ICL) und lernbezogene kognitive Belastung (GCL). Zusätzlich dazu wurde analysiert, wie effektiv die Lernenden ihre mentale Energie in das Verstehen des Diagramms investiert haben. Analog zu Forschungsfrage 3 wurden auch zur Beantwortung von Forschungsfrage 5 zwei Unterfragen gebildet:

Inwieweit erweist sich die Kombination strukturierender (S) und elaborierend-interrogativer Maßnahmen (EI) als förderlich, Lernende beim Diagrammverstehen zu unterstützen? (Forschungsfrage 5a) und *Inwieweit erweist sich die Kombination strukturierender (S) und elaborierend-interrogativer Maßnahmen (EI) als förderlich, Lernende beim Diagrammverstehen zu unterstützen, wenn die Lernenden zuvor kognitiv aktiviert (KA) werden?* (Forschungsfrage 5b).

Die Ergebnisse der Evaluation der Maßnahmen zeigen, dass sowohl die Lernenden der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk (Forschungsfrage 5a) als auch die Lernenden der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk (Forschungsfrage 5b) im Median statistisch signifikant höhere *Verstehensniveaus* erreichen als die Lernenden in den jeweiligen Kontrollgruppen K-Erk (Forschungsfrage 5a) bzw. K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk (Forschungsfrage 5b). Die Unterschiede zwischen den Interventionsgruppen und ihren jeweiligen Kontrollgruppen sind alle praktisch bedeutsam (vgl. Cohen 1988, Hattie 2009; siehe Abschnitt 8.3.3.1).

Vertiefende Zusammenhangsanalysen (siehe Abschnitt 8.3.3.2), in denen der Zusammenhang zwischen der jeweiligen Gruppenzugehörigkeit und dem erreichten Verstehensniveau analysiert wird, liefern Hinweise dafür, dass Lernende der Interventionsgruppen I-S-EI-Erk und I-KA-S-EI-Erk beim Erklären besonders häufig im Situationsraum agieren; Lernende der jeweiligen Kontrollgruppen K-Erk, K-Be-Erk und K-Erk-Be-nErk agieren dagegen weitgehend im Graphenraum. Statistisch signifikant sind diese Ergebnisse aber vornehmlich in Hinblick

auf die Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk. Nur Lernende dieser Gruppe agieren statistisch signifikant seltener auf den Verstehensniveaus 1 und 2 und statistisch signifikant häufiger auf den Verstehensniveaus 5 und 6 als dies unter Unabhängigkeit (von Gruppenzugehörigkeit und erreichtem Verstehensniveau in den unter Forschungsfrage 5b analysierten Gruppen) zu erwarten gewesen wäre (zu einer ausführlichen Analyse siehe Abschnitt 8.3.3.2.1).

In Abschnitt 8.3.3.2 wurden die Zusammenhangsanalysen durch Bildung von insgesamt vier Analysegruppen in Hinblick auf mögliche Lern- und Verstehenshürden spezifiziert. Es sind insbesondere diese defizitorientierten Überlegungen, die in Abschnitt 9.3 einen konzeptuellen Beitrag zur Synthese der vorausgegangenen empirischen Erkenntnisse und zur Theoriebildung leisten werden. Zu unterscheiden sind *NICHT-Abstrahierer*innen* (Lernende, die ausschließlich auf Verstehensniveau 1 agieren), *NICHT-Abduzierer*innen* (Lernende, die ausschließlich auf Verstehensniveau 2 agieren), *NICHT-Revidierer*innen* (Lernende, die ausschließlich auf Verstehensniveau 3 agieren) und *widerspruchsfreie Erklärer*innen* (Lernende, die auf den Verstehensniveaus 4 bis 6 agieren). Lernende, die sich entsprechend ihrer (beobachteten) Leistung beim Erklären bzw. beim Verstehen des Diagramms den ersten drei Gruppen zuordnen lassen, mangelt es an den notwendigen Fähigkeiten, um die Graphenverläufe des Untersuchungsdiagramms widerspruchsfrei zu erklären. So zeigen Lernende, die als *NICHT-Abstrahierer*innen* bezeichnet werden, in ihrer Erklärung beispielsweise keine Hinweise auf die Konstruktion eines Situationsraums. Ihnen scheint es *nicht* zu gelingen, von der grafischen Darstellung zu *abstrahieren*. *NICHT-Abduzierer*innen* formulieren in ihren Erklärungen keine abduktiv gebildeten Erklärungshypothesen, sondern lediglich induktiv gebildete Erklärungshypothesen. *NICHT-Revidierer*innen* formulieren zwar abduktiv gebildete Erklärungshypothesen, diese stehen allerdings in Widerspruch zu den grafischen Evidenzen. In den Erklärungen von *NICHT-Revidierer*innen* finden sich keine Hinweise darauf, dass sie in der Lage wären, die zu den Daten widersprüchlichen Erklärungshypothesen zu erkennen und zu revidieren. Lediglich wenn die Erklärungen der Lernenden in keinem direkten Widerspruch zum Untersuchungsdiagramm stehen, werden sie der Gruppe *widerspruchsfreie Erklärer*innen* zugeordnet.

Im Rahmen einer beschreibenden Analyse wurde – unter Vernachlässigung der durch die beiden Unterfragen und das Untersuchungsdesign¹⁴² vorgegebenen Vergleichsstruktur und damit unter Einschränkungen – erkannt, dass in beiden Interventionsgruppen NICHT-Abstrahierer*innen vergleichsweise selten auftreten. Ferner zeigte sich, dass sich in der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk praktisch keine NICHT-Abduzierer*innen finden (lediglich 3 von 161 Lernenden), die das Diagramm induktiv statt abduktiv erklären.

Gleichzeitig zeigte sich aber auch, dass der Anteil an Lernenden, die Erklärungshypothesen abduzieren, die in Widerspruch zu den grafischen Evidenzen stehen (NICHT-Revidierer*innen), in allen Gruppen ähnlich hoch ist. Knapp ein Drittel der Lernenden lassen sich in jeder Gruppe (Interventions- und Kontrollgruppen gleichermaßen) dieser Analysekatgorie zuordnen. Da die instruktionalen Maßnahmen die Hypothesenrevision nicht gezielt unterstützt haben, erscheint es zunächst wenig überraschend, dass auch in den Interventionsgruppen zahlreiche NICHT-Revidierer*innen beobachtet werden konnten. Allerdings lässt sich, insbesondere unter Berücksichtigung der vergleichsweise geringen Anzahl an NICHT-Abstrahierer*innen und NICHT-Abduzierer*innen in den Interventionsgruppen, vermuten, dass in den Interventionsgruppen vermehrt Lernende dieser Analysegruppe zuzuordnen sind, die ohne Förderung durch die instruktionalen Maßnahmen lediglich den Gruppen NICHT-Abstrahierer*innen und NICHT-Abduzierer*innen zuzuordnen gewesen wären. Sofern die in dieser Arbeit beschriebenen Verstehensniveaus als Kompetenzstufen interpretiert werden (vgl. Hammann 2004), wäre der in den beiden Interventionsgruppen zu den Kontrollgruppen ähnlich hohe Anteil an NICHT-Revidierer*innen – also Lernenden, die auf Verstehensniveau 3 agieren – als Erfolg der instruktionalen Maßnahmen zu werten.

Aus den Befunden zur kognitiven Belastung (siehe Abschnitt 8.3.3.3) sowie zur mentalen Effektivität (siehe Abschnitt 8.3.3.4) lassen sich mögliche Wirkmechanismen der instruktionalen Maßnahmen ableiten.

In Hinblick auf die Beantwortung von Forschungsfrage 5a zeigte sich, dass Lernende der Interventionsgruppe I-S-EI-Erk und der Kontrollgruppe K-Erk sich nicht statistisch signifikant in Hinblick auf die *intrinsische kognitive Belastung* (ICL) voneinander unterscheiden. In Hinblick auf die Beantwortung von

¹⁴² Es sei daran erinnert, dass Lernende der Gruppen I-KA-S-EI-Erk, K-Be-Erk und K-Erk-Be-nErk sich ca. 20 Minuten länger mit den Selbstlernmaterialien befasst haben als Lernende der Gruppen I-S-EI-Erk und K-Erk (siehe Abschnitte 6.2.2 und 6.2.4)

Forschungsfrage 5b zeigte sich dagegen, dass Lernende der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk eine statistisch signifikant geringere intrinsische kognitive Belastung (ICL) beim Verstehen und Erklären des Diagramms empfinden als Lernende der Kontrollgruppen K-Erk-Be-nErk und K-Be-Erk. Für die Lernenden der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk scheint das Diagrammverstehen somit eine weniger komplexe Anforderung darzustellen als für Lernende der entsprechenden Kontrollgruppen.

Vor dem Hintergrund der vorausgegangenen theoretischen Ausführungen und der empirischen Befunde zur intrinsischen kognitiven Belastung kann vermutet werden, dass die kognitive Aktivierung (KA, siehe Abschnitt 5.3.2) und/oder die Kombination aus kognitiver Aktivierung (KA), Unterstützung bei der Strukturierung des Diagramms in Zeichen (S) und Unterstützung bei der elaborativen Interrogation (EI) sich als förderlich erweisen, um Lernenden den inhaltlichen Zugang zum Diagramm zu erleichtern. Möglicherweise konstruieren Lernende der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk im Rahmen der kognitiven Aktivierung (KA) ein mentales Gerüst bzw. einen rudimentären, vorläufigen Situationsraum von dem ausgehend sie die Interpretation des Diagramms besonders leicht oder besonders effektiv beginnen können (siehe dazu insbesondere Ausführungen zur Translation nach Janvier 1978 und zu Verstehensinseln nach Bell & Janvier 1981 in Abschnitt 3.7.1 sowie zum Prozessmodell des Diagrammverstehens in Abschnitt 5.2.4). Dieser vorläufige, unspezifische Situationsraum könnte es den Lernenden beispielsweise erleichtern, das Diagramm bereits zu Beginn der Analyse effektiver in inhaltsrelevante, bedeutungsvolle Zeichen zu strukturieren (S) (siehe Ausführungen zum semiotischen Strukturieren in Abschnitt 4.4.1 und 5.3.2.3) und könnte sich zudem als hilfreich erweisen, um den Situationsraum auf der Grundlage des Diagramms nachfolgend – insbesondere unterstützt durch die elaborative Interrogation (EI) – zu elaborieren und zu spezifizieren (siehe insbesondere Ausführungen zur ikonografischen Analyse und ikonologischen Interpretation in Abschnitt 5.2 sowie zum elaborativen Interrogieren in Abschnitt 5.3.2.4).

Ob die Konstruktion des (vorläufigen) Situationsraums vornehmlich durch Aktivierung von unspezifischem Vorwissen zum Themenbereich Enzymatik oder durch Aktivierung von spezifischem Vorwissen zum probabilistischen Denken erleichtert wurde, kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden (siehe dazu insbesondere Ausführungen zur Gestaltung der kognitiv aktivierenden Aufgaben in Abschnitt 6.2.1.3.1). Die Tatsache, dass die intrinsische kognitive Belastung

ausschließlich in der Instruktionsgruppe I-KA-S-EI-Erk statistisch signifikant geringer war als in den Kontrollgruppen (siehe Forschungsfrage 5b) lässt zumindest die Möglichkeit zu, dass es durch die kognitiv aktivierenden Aufgaben zu einem *Pretraining-Effekt* (vgl. Mayer & Moreno 2010, siehe Abschnitt 3.8.3) gekommen ist, in dem nicht nur unspezifisches Vorwissen aktiviert, sondern vor allem auch spezifisches, erklärungsrelevantes Wissen konstruiert wurde.

Analysen zur *mental*en *Effektivität* zeigten, dass die Lernenden beider Interventionsgruppen ihre kognitive Energie statistisch signifikant effektiver in das Lernen bzw. das Verstehen des Diagramms investieren als Lernende der jeweiligen Kontrollgruppen (siehe Abschnitt 8.3.3.4). Da Lernende beider Interventionsgruppen in dieser Hinsicht statistisch signifikant erfolgreicher waren als die Lernenden der jeweiligen Kontrollgruppen, kann vermutet werden, dass insbesondere die strukturierenden (S, siehe Abschnitt 6.2.1.3.2) und die elaborierend-interrogativen (EI, siehe Abschnitt 6.2.1.3.3) Maßnahmen es den Lernenden erleichtern, ihre mentale Energie gezielt(er) in das Verstehen des Diagramms, die Konstruktion bzw. Spezifikation des Situationsraums und das Erklären der Graphenverläufe zu investieren. Aufbauend auf den vorausgegangenen Ausführungen zum Chunking und zur semiotischen Strukturierung (siehe Abschnitt 6.2.1.3.2) lässt sich vermuten, dass die strukturierenden Maßnahmen es den Lernenden erleichtern, von der grafischen Darstellung zu abstrahieren, um inhaltlich bedeutsame Zeichen zu bilden und frühzeitig einen geeigneten Situationsraum zu konstruieren (siehe Ausführungen zur semiotischen Diagramminterpretation in Abschnitt 4.4). Ebenso kann vor dem Hintergrund der vorausgegangenen Ausführungen vermutet werden, dass es den Lernenden durch die Strukturierung ermöglicht wird, im Rahmen der elaborativen Interrogation (EI) spezifisches Vorwissen effektiv(er) zu aktivieren oder anzuwenden, um den konstruierten Situationsraum zu elaborieren, zu spezifizieren sowie erklärungsrelevante Ebenen innerhalb des Situationsraums miteinander zu vernetzen, um komplexe(re) Erklärungshypothesen zu abduzieren.

In Hinblick auf die Beantwortung von Forschungsfrage 5 lässt sich zusammenfassen, dass die instruktionalen Maßnahmen hinsichtlich ihrer Eignung zur Förderung des Diagrammverstehens positiv evaluiert werden konnten. Sowohl Lernende der Instruktionsgruppe I-KA-S-EI-Erk, die kognitiv aktiviert (KA) und beim Strukturieren (S) sowie beim elaborativen Interrogieren (EI) unterstützt wurden, als auch Lernende der Instruktionsgruppe I-S-EI-Erk, die ausschließlich beim Strukturieren (S) sowie beim elaborativen Interrogieren (EI) unterstützt

wurden, zeigten eine statistisch signifikante und praktisch bedeutsam bessere Leistung beim Diagrammverstehen als die Lernenden der jeweiligen Kontrollgruppen. Insbesondere das Strukturieren und das elaborative Interrogieren erwiesen sich als effektive Maßnahmen zur Förderung des Diagrammverstehens.¹⁴³ Ob beziehungsweise inwieweit die in dieser Untersuchung aufwendig in der Instruktionsgruppe I-KA-S-EI-Erk durchgeführte kognitive Aktivierung (KA) zu einer Verbesserung des Diagrammverstehens führt, konnte aufgrund des gewählten Untersuchungsdesigns nicht hinreichend geklärt werden.¹⁴⁴ Hinsichtlich der postulierten Wirkmechanismen sei zudem betont, dass das in diesem Forschungsvorhaben gewählte Untersuchungsdesign (siehe Abschnitt 6.2.2) ausschließlich Vermutung zulässt. Um die geäußerten Vermutungen zu überprüfen, sind weitere experimentelle Untersuchungen notwendig (siehe Ausblick in Kapitel 0).

¹⁴³ Obgleich es vor dem Hintergrund der theoretischen und empirischen Vorarbeiten wahrscheinlich scheint, dass sich insbesondere die Kombination der beiden Maßnahmen als lern- und verstehensförderlich für das Diagrammverstehen erweist, können alternative Erklärungen, wie die Wirksamkeit einer einzelnen Maßnahme und die Unwirksamkeit der anderen Maßnahme, vor dem Hintergrund des gewählten Untersuchungsdesigns (siehe Abschnitt 6.2.2) nicht ausgeschlossen werden.

¹⁴⁴ Die Interpretation der Befunde zu den kognitiv aktivierenden Maßnahmen wird insbesondere dadurch erschwert, dass nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Lernenden in den anderen Gruppen durch den Vorwissenstest ebenfalls kognitiv aktiviert wurden.

9. Entwicklung des zyklisch-progressiven Modells des Diagrammverstehens (F6)

9.1. Herleitung von Forschungsfrage 6

In den vorausgegangenen Kapiteln (siehe Forschungsfragen 1 bis 5) konnten bereits umfassende Einblicke in die Lern- und Verstehensprozesse von Lernenden beim Analysieren von Liniendiagrammen gewonnen werden. Aufbauend auf der detaillierten Analyse der empirischen Befunde dieser Arbeit scheint es möglich, durch Synthese der gewonnenen Erkenntnisse, theoriebildend einen Beitrag zur (Weiter-)entwicklung lokaler Lehr-Lern-Theorien zu leisten (vgl. Prediger et al. 2012; Gravemeijer & Cobb 2006). Dies erfolgt vor dem Hintergrund von Forschungsfrage 6:

Wie lassen sich die in dieser Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse synthetisieren, um theoriebildend einen Beitrag zur Erforschung des Diagrammverstehens zu leisten?

Im Fokus der Synthese steht insbesondere die Weiterentwicklung des in Abschnitt 5.2.4 beschriebenen Prozessmodells des Diagrammverstehens.

9.2. Zyklisch-progressives Modell des Diagrammverstehens

Die Erkenntnisse, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens und insbesondere der empirischen Analyse gewonnen wurden, ermöglichen es, komplexe Schlussfolgerungsprozesse im Kontext des Diagrammverstehens zu modellieren. Dabei wird – vergleichbar zum Verstehen kontinuierlicher Texte (vgl. Kintsch & van Dijk 1978; Miller & Kintsch 1980; Kintsch 2004; Johnson-Laird 1980, 1981, 1983; Christmann & Groeben 1999) – angenommen, dass Diagrammverstehen (idealtypisch) durch die zyklisch-progressive Konstruktion eines in sich kohärenten mentalen Modells der referierten Inhalte stattfindet (siehe Kapitel 3). Das entwickelte und im Folgenden beschriebene Modell wird daher auch als *zyklisch-progressives Modell des Diagrammverstehens* bezeichnet, kurz: *ZP-Modell*. Das ZP-Modell (siehe Abbildung 74 auf Seite 371) kann als Grundlage für nachfolgende Entwicklungsforschungszyklen fungieren (siehe zur Diskussion der Übertragbarkeit der Erkenntnisse Kapitel 10) und ermöglicht die Einordnung der in

den vorausgegangenen Kapiteln thematisierten Kompetenzen und Verstehenshürden. Anhand des Modells lassen sich zudem geeignete Ansatzpunkte für weitere Förderkonzepte identifizieren sowie Lernerfähigkeiten und -probleme diagnostizieren und analysieren.

Das ZP-Modell stellt eine Erweiterung und Spezifizierung des in Abschnitt 5.2.4 entwickelten Phasenmodells dar. In dem in Abschnitt 5.2.4 beschriebenen, vorläufigen Phasenmodell war es beispielweise noch nicht möglich, die Phase der ikonologischen Interpretation des Diagramms, also die Phase, in der im besonderen Maße komplexe, erklärende Schlussfolgerungsprozesse stattfinden, differenziert zu analysieren. Vor dem Hintergrund der im Rahmen der Forschungsfragen 4 und 5 hinzugewonnenen Erkenntnisse erscheint dies nun möglich. Es sei allerdings einschränkend erwähnt, dass die in dem ZP-Modell beschriebenen Prozessschritte nicht explizit beobachtet werden konnten, sondern dass anhand der explizit vorliegenden Erklärungen der Lernenden (siehe Abschnitt 7.6), theoretisch fundiert, auf die möglicherweise dahinterliegenden prozessualen Abläufe geschlossen wird.

Das *ZP-Modell* unterscheidet sechs Prozessschritte (siehe Abbildung 74). Die Schritte 1 und 2 lassen sich – vereinfachend betrachtet und unter Vernachlässigung möglicher Rückkopplungen und Interaktionen (siehe Doppelpfeile in Abbildung 74) – der ikonografischen Analyse zuordnen, die Schritte 3 bis 6 der ikonologischen Interpretation. Unter Bezugnahme auf die in Abschnitt 3.4 vorgenommene Konzeptualisierung des Diagrammverstehens in die Dimensionen Informationsentnahme, Interpretieren und Erklären, könnte auch davon gesprochen werden, dass in den Schritten 1 und 2 die Interpretation des Diagramms stattfindet (siehe Abschnitt 3.4.2) und dass die Schritte 3 bis 6 dem Erklären des Diagramms bzw. der Graphenverläufe entsprechen (siehe Abschnitt 3.4.3).

Prozesse der Entnahme explizit dargestellter Informationen (siehe Abschnitt 3.4.1), die in enger Verbindung zum vorikonografischen Beschreiben stehen (siehe Abschnitt 5.2.1), werden in dem Modell nicht explizit in den Verstehensprozess eingebunden. Stattdessen wird – insbesondere vor dem Hintergrund der Ausführungen zur Informationsentnahme in Abschnitt 4.5 – angenommen bzw. vorausgesetzt, dass Diagrammleser*innen uneingeschränkt über die notwendigen Kompetenzen verfügen, explizit dargestellte Informationen aus dem Diagramm zu entnehmen (z. B. Punktwerte ablesen). Ferner wird angenommen, dass Diagrammleser*innen die in dem Diagramm grafisch dargestellten Elemente be-

reits identifiziert (siehe Abschnitt 4.2.1) und eine visuelle Beschreibung des Diagramms im Arbeitsgedächtnis konstruiert haben (vgl. Pinker 1990; siehe dazu Ausführungen in Abschnitt 3.8.2). Die visuelle Beschreibung entspricht einer vorläufigen mentalen Repräsentation der grafischen Diagramminhalte, stellt aber noch keine Interpretation des Diagramms dar.

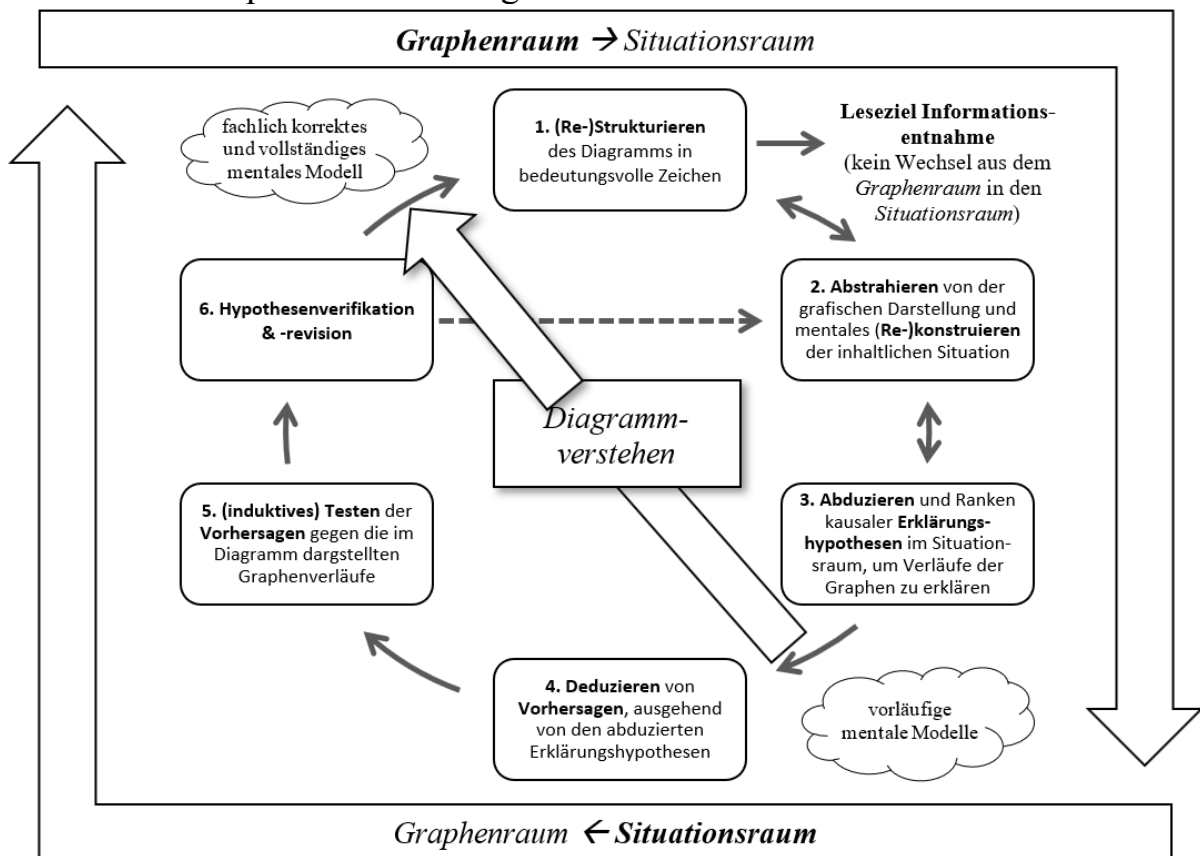


Abbildung 74. Zyklisch-progressives Modell des Diagrammverstehens (eigene Darstellung)

Das Verstehen des Diagramms beginnt in dem ZP-Modell (siehe Abbildung 74) damit, dass Diagrammleser*innen das Diagramm, aufbauend auf ihrem Vorwissen bzw. ausgehend von einem bereits vorhandenen (vorläufigen) mentalen Modell, in bedeutungsvolle Zeichen *strukturieren* (Schritt 1; siehe Ausführungen zum semiotischen Interpretieren in Abschnitt 4.4.1.3). Aufgrund der begrenzten Kapazitäten ihres Arbeitsgedächtnisses ist es den Leser*innen nicht möglich, alle gebildeten Zeichen simultan zu verarbeiten (vgl. Miller & Kintsch 1980). Sie konzentrieren sich daher – in einem Prozess lokaler Kohärenzbildung (vgl. Guthrie et al. 1993) – auf Zeichen (z. B. Graphenverläufe oder Diagrammabschnitte), die ihnen zu Beginn ihrer Analyse besonders bedeutsam erscheinen, und beginnen, ausgehend von diesen Zeichen, von der grafischen Darstellung zu *abstrahieren* (Schritt 2; vgl. Stefanelli & Ramoni 1992; siehe ST-Modell in Abschnitt 7.2.4). Analog zu den Ausführungen in den Abschnitten 3.7.1 und 4.4.1

wird hier von einem Prozess systematisch strukturierten Lesens ausgegangen (vgl. Roth & Bowen 2003; vgl. zu einer anderen Auffassung Bell & Janvier 1981).

Die Diagrammleser*innen konstruieren im Rahmen der Abstraktion einen Situationsraum (vgl. Leinhardt et al. 1990; siehe Ausführungen zur Translation in Abschnitt 3.7). Durch interpretierendes, iteratives Hin- und Herwechseln zwischen Graphen- und Situationsraum (siehe Abschnitt 3.7.1) (*re-*)konstruieren sie – in einem Prozess globaler Kohärenzbildung (vgl. Guthrie et al. 1993) – innerhalb dieses Situationsraums (siehe Abschnitt 3.7.2) die grafisch referierten Inhalte. Diagrammleser*innen, die lediglich das Leseziel verfolgen, dem Diagramm Informationen zu entnehmen, konstruieren keinen Situationsraum und verbleiben stattdessen vollständig im Graphenraum (siehe Pfeil *Leseziel Informationsentnahme* in Abbildung 74).

Verfolgen Leser*innen das Leseziel, die Graphenverläufe und -abschnitte des Diagramms kausal zu erklären, folgen auf die zuvor genannten interpretierend-abstrahierenden Prozesse in Schritt 3 komplexe, vorwissensbasierte Schlussfolgerungsaktivitäten (siehe Abschnitt 7.2). Die Leser*innen vergleichen dazu im Graphenraum Graphenverläufe und -abschnitte und *abduzieren* im Situationsraum, unter Anwendung ihres spezifischen Vorwissens über Mechanismen und Theorien, Erklärungshypothesen, um die Verläufe der Graphen zu erklären (siehe Abschnitte 7.2.2 und 7.2.3). Sie elaborieren dadurch den Situationsraum. In Schritt 4 *deduzieren* sie dann im Situationsraum, ausgehend von den abduzierten Erklärungshypothesen, *Vorhersagen* darüber, wie Graphen verlaufen müssten, die sich aus ihren Erklärungshypothesen ableiten lassen (siehe insbesondere Analyse der Lernerantworten in den Abschnitten 7.6.3 - 7.6.6). In Schritt 5 *testen*¹⁴⁵ die Leser*innen ihre grafischen *Vorhersagen* (*induktiv*) im Graphenraum gegen die Graphenverläufe. Sie überprüfen, ob die in dem Diagramm dargestellten Graphen so verlaufen, wie sie es auf Grundlage der von

¹⁴⁵ Es sei betont, dass das Hypothesentesten und das Inferieren in den ersten Zyklen des ZP-Modells, zumindest in Hinblick auf den Biologieunterricht (siehe Abschnitt 3.3), nicht unter strengen inferenzstatistischen Gesichtspunkten stattfindet. Wenn überhaupt sind hier eher vergleichsweise einfache Inferenzprozesse, ähnlich dem *informal inferential reasoning* (vgl. z. B. Pfannkuch 2006; Pfannkuch et al. 2004), von Bedeutung. Formal inferenzstatistische Überlegungen sind dagegen in dem Untersuchungskontext dieser Arbeit erst für sehr weit vorangeschrittene Verstehenszyklen zu vermuten. Entsprechende Zyklen wurden in dieser Arbeit allerdings nicht untersucht.

ihnen abduzierten Erklärungshypothesen erwartet haben. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse nutzen sie in Schritt 6, um die in Schritt 3 gebildeten Erklärungshypothesen zu verifizieren oder zu falsifizieren bzw. zu revidieren (*Hypothesenverifikation & -revision*). Entsprechen die Graphenverläufe den abduzierten Erklärungshypothesen (Hypothesenverifikation), verwenden die Leser*innen ihre Erkenntnisse, um das den Erklärungshypothesen zugrunde liegende mentale Modell weiter zu elaborieren. Sie schärfen dadurch gleichzeitig den zuvor konstruierten Situationsraum (siehe progressiver Wechsel von Schritt 6 zu Schritt 2 in Abbildung 74; die progressive Natur des Wechsel soll anhand der gestrichelten Linie angedeutet werden).¹⁴⁶ Widersprechen die antizipierten Graphenverläufe den Graphenverläufen des Diagramms, so verwerfen die Leser*innen – im Idealfall – ihre abduzierte(n) Erklärungshypothesen (Hypothesenrevision) und wählen oder konstruieren ein alternatives mentales Modell, um neue Erklärungshypothesen zu abduzieren (siehe beispielsweise Erklärung von LISE09 in Abschnitt 7.6.6.1). Im Fall der Hypothesenrevision beginnt dann, aufbauend auf einem alternativen – erneut vorläufigen – mentalen Modell, ein neuer Zyklus des Strukturierens sowie des Generierens und Testens von Erklärungshypothesen (siehe Wechsel von Schritt 6 zu Schritt 1 in Abbildung 74 unter Verwendung eines nicht explizit dargestellten neuen Situationsraums). Die Elaboration des alternativen mentalen Modells erfolgt analog zu den zuvor beschriebenen Prozessschritten durch (Re-)Iteration zwischen Phasen der Abstraktion, der Abduktion und der Hypothesenverifikation bzw. -revision. Dieser progressive Charakter des Diagrammverstehens soll in der zweidimensionalen Abbildung 74 anhand des Pfeils in der Mitte der Abbildung angedeutet werden, der sich in einer nicht dargestellten dritten Achse (von rechts unten), ausgehend von einem oder mehreren *vorläufigen mentalen Modellen*, zu einem *fachlich korrekten und vollständigem mentalen Modell* (nach links oben) entwickelt. Das (fachlich) korrekte¹⁴⁷ und vollständige mentale Modell stellt somit – insbesondere im Kontext der Biologieunterrichts – das eigentliche Produkt des zyklisch-progressiven Diagrammverstehensprozesses dar.

¹⁴⁶ Im Fall der Hypothesenverifikation erfolgt keine intensive und bewusste (Re-) oder Neustrukturierung des Diagramms im Graphenraum.

¹⁴⁷ An dieser Stelle wird bewusst darauf verzichtet, zu diskutieren, welche Intention die das Diagramm konstruierende Person hatte und mithilfe des Diagramms zum Ausdruck bringen wollte (siehe dazu Ausführungen zur pragmatischen Analyse nach Kosslyn 1989 in Abschnitt 3.1)

Vor dem Hintergrund der theoretisch und empirisch (siehe insbesondere Abschnitt 7.6) in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse sei darauf hingewiesen, dass der möglicherweise sehr zeitintensive Verstehensprozess von den Leser*innen (vorzeitig) beendet wird, sobald sie ein mentales Modell konstruiert haben, das *ihnen* als ausreichend valide und zugleich praktisch geeignet erscheint, um damit das Diagramm und die grafisch referierten Inhalte umfassend zu erklären. Es lassen sich verschiedene Lern- und Verstehenshürden vermuten, die dazu beitragen können, dass Lernende den Verstehensprozess nicht in der dargestellten idealtypischen Art und Weise durchlaufen oder frühzeitig abbrechen. Die entwickelten instruktionalen Maßnahmen erwiesen sich als erfolgreich, um einzelne Verstehenshürden zu überwinden. In dem nachfolgenden Abschnitt werden die einzelnen Hürden in die Phasen des zyklisch-progressiven Verstehensmodells eingeordnet und die Wirksamkeit der Maßnahmen in Hinblick auf ihre Überwindung diskutiert.

9.3. Analyse von Lern- und Verstehenshürden und ihrer Überwindung

Lernende haben beim Diagrammverstehen in dieser Studie über alle analysierten Gruppen hinweg vergleichbare Probleme beim Analysieren des Diagramms gezeigt, die sich zu einzelnen Analysegruppen zusammenfassen lassen.

In Abschnitt 8.3.3.2.2 wurden Lernende in Hinblick auf ihre Probleme als *NICHT-Abstrahierer*innen*, *NICHT-Abduzierer*innen* und *NICHT-Revidierer*innen* bezeichnet.

Mithilfe des zyklisch-progressiven Modell des Diagrammverstehens lassen sich die entsprechenden Probleme nun tiefergehend analysieren. Zu unterscheiden sind Probleme bei der Abstraktion, der Abduktion und der Hypothesenrevision. Da diese Probleme dazu führen, dass der Verstehensprozess nicht weiter durchlaufen werden kann, werden sie im Folgenden als *Lern- und Verstehenshürden* bezeichnet: Abstraktions-, Abduktions- und Revisionshürde.

Die einzelnen Hürden sind grafisch in Abbildung 75 dargestellt, unter expliziter Bezugnahme auf die im ZP-Modell beschriebenen Schritte 2 (Abstrahieren), 3 (Abduzieren) und 6 (Hypothesenverifikation & -revision) sowie die in Abschnitt 7.6 beschriebenen Probleme der Lernenden. Um die Nachvollziehbarkeit der Argumentation zu den einzelnen Hürden zu erleichtern, wird der zyklisch-

progressive Verstehensprozess in Abbildung 75 vereinfachend als linearer Verlauf dargestellt. Spezifische Lern- und Verstehenshürden, die vornehmlich auf den enzymatischen Kontext des Untersuchungsdiagramms und insbesondere auf das Denken in Wahrscheinlichkeiten zurückzuführen sind, werden in der Abbildung lediglich angedeutet. Sie werden im Folgenden, da sich daraus abzuleitende Erkenntnisse nur bedingt auf Diagramme aus anderen Kontexten übertragen lassen (siehe dazu Ausführungen in Abschnitt 10), nicht tiefergehend analysiert. Zu entsprechenden Beschreibungen sei auf Ausführungen zu den Niveaus 5 und 6 in Abschnitt 7.6 verwiesen.

Die Abstraktions-, die Abduktions- und die Revisionshürde werden in den nächsten drei Abschnitten beschrieben und die Wirksamkeit der instruktionalen Maßnahmen zu ihrer Überwindung diskutiert.

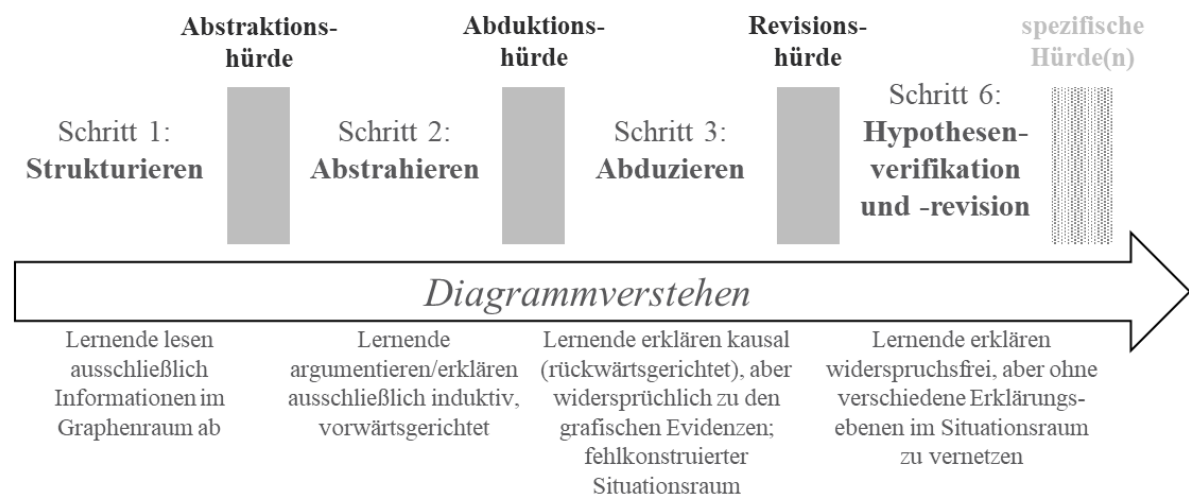


Abbildung 75. Lern- und Verstehenshürden im Prozess des zyklisch-progressiven Diagrammverstehens, vereinfachend dargestellt als linearer Verlauf (eigene Darstellung)

9.3.1. Abstraktionshürde

Im Rahmen der empirischen Analyse (siehe Abschnitt 8.3.3) wurden Lernende, denen es nicht gelingt, von der grafischen Darstellung (Graphenraum) zu abstrahieren und in den Situationsraum zu wechseln bzw. einen Situationsraum zu konstruieren, als *NICHT-Abstrahierer*innen* bezeichnet. Im Folgenden werden die Probleme, die dazu beigetragen haben könnten, vor dem Hintergrund des ZP-Modells – in Abgrenzung zu nachfolgend beschriebenen Lern- und Verstehenshürden – unter den Begriff Abstraktionshürde subsumiert.

Lernende, die von der *Abstraktionshürde* betroffen sind, sind nicht dazu fähig, von der grafischen Darstellung zu abstrahieren (siehe Schritt 2 in Abbildung 74)

und die in dem Diagramm grafisch referierten Inhalte – im Sinne eines Situationsraums - mental zu (re-)konstruieren. Sie brechen den Analyse- bzw. den Verstehensprozess frühzeitig ab oder versuchen das Diagramm mithilfe ungeeigneter Problemlösestrategien zu durchdringen. So konnten in dieser Untersuchung beispielsweise zahlreiche Lernende identifiziert werden, die vollständig im Graphenraum verbleiben und das Diagramm perzeptuell beschreiben, anstatt dieses inhaltlich zu interpretieren oder zu erklären. In Kapitel 4, insbesondere in Abschnitt 4.4.2, wurden verschiedene Studien beschrieben, in denen über ähnliche Probleme berichtet wurde (vgl. Preece & Janvier, 1992, 1993; Maichle 1994; Swatton & Taylor 1994; Tsuji 2011; siehe dazu auch die zusammenfassende Beantwortung von Forschungsfrage in Abschnitt 4.5). Auch in anderen Studien wurden vergleichbare Aspekte beschrieben. Monk (1992) bezeichnet ein solches Vorgehen als „iconic translation“ (ebd., S. 177), Clement (1985) spricht davon, dass Lernende den Graphenverlauf als ein „literal picture of the problem situation“ (ebd., S. 4) betrachten würden und Janvier (1981) deutet dies als eine Art Gefangenschaft im Graphenraum an: „Pupils tended rather to stay at the linguistic or graphical level and experienced trouble in getting out of it“ (ebd., S. 121). Beide entwickelten und erprobten instruktionalen Maßnahmen (siehe Interventionsgruppen I-KA-S-EI-Erk und I-S-EI-Erk) erwiesen sich als erfolgreich, um Lernende dabei zu unterstützen, die Abstraktionshürde zu überwinden (siehe Abschnitte 8.3.3 und 8.4). Da die Lernenden beider Interventionsgruppen vergleichbar erfolgreich waren, kann vor dem Hintergrund der theoretischen Fundierung in Kapitel 4 (Forschungsfrage 1) und Kapitel 5 (Forschungsfrage 2) vermutet werden, dass insbesondere das aktive Strukturieren des Diagramms in inhaltlich bedeutsame Zeichen (S) Lernenden den Zugang zu den grafisch referierten Inhalten bzw. die Konstruktion des Situationsraums erleichtert (siehe dazu insbesondere in Abschnitt 4.4 Ausführungen von Maichle 1994 sowie Roth und Kollegen; siehe zudem Argumentation in Abschnitt 8.4 zur mentalen Effektivität).

9.3.2. Abduktionshürde

Ein weitere Lern- und Verstehenshürde besteht darin, dass Lernende (insbesondere Lernende der Kontrollgruppen, siehe Abschnitt 8.3.3.2) dazu tendieren, die Erkenntnisse aus den Daten (vorwärtsgerichtet) zu verallgemeinern, sofern es ihnen nicht möglich ist, die Verläufe der Graphen (rückwärtsgerichtet) kausal zu erklären. Solche Lernende sind – anders als Lernende, die der Abstraktionshürde

unterliegen – prinzipiell in der Lage, von der grafischen Darstellung zu abstrahieren. Anstatt aber in einem rückwärtsgerichteten Prozess abduktiven Schlussfolgerns Erklärungshypothesen für die Graphenverläufe zu entwickeln (siehe Schritt 3 in Abbildung 74), entwickeln sie ihre Erklärungshypothesen induktiv. Es wird daher hier von einer *Abduktionshürde* gesprochen, die ähnlich wie die Abstraktionshürde verhindert, dass Lernende im Verstehensprozess voranschreiten.

In Hinblick auf das Überwinden der Abduktionshürde erwiesen sich lediglich die instruktionalen Maßnahmen als besonders erfolgreich, in denen die Lernenden zunächst kognitiv aktiviert und danach beim Strukturieren sowie bei der elaborativen Interrogation unterstützt wurden. Lernende dieser Interventionsgruppe (I-KA-S-EI-Erk) konnten die Abduktionshürde fast vollständig überwinden. Durch die kognitive Aktivierung wurden die Lernenden bereits frühzeitig – noch bevor sie das Diagramm strukturiert haben – dabei unterstützt, einen unspezifischen, vorläufigen Situationsraum zu konstruieren (siehe insbesondere Ausführungen zur kognitiven Aktivierung in Abschnitt 6.2.1.3 und zum Prozessmodell in Abschnitt 5.2.4). Vor dem Hintergrund der Ergebnisse lässt sich vermuten, dass ein derart früh konstruierter Situationsraum sich als förderlich erweist, um davon ausgehend das Diagramm zu analysieren. Wenn Lernende mit einem vor-konstruierten Situationsraum in die Analyse des Diagramms starten, scheint es ihnen leichter zu fallen, zwischen Graphen- und Situationsraum hin und her zu wechseln, den Situationsraum auf Grundlage der Daten zu spezifizieren und diesen nach möglichen Erklärungshypothesen zu durchsuchen (siehe zu vergleichbaren Ausführungen für das Experimentieren Klahr & Dunbar 1988; Klahr 2000; zu einer Zusammenfassung siehe Hammann 2007).

9.3.3. Revisionshürde

Eine weitere Lern- und Verstehenshürde, die in dieser Arbeit identifiziert werden konnte und von dem zahlreiche Lernende sowohl in den Interventions- als auch in den Kontrollgruppen gleichermaßen betroffen waren, besteht in der unzureichenden Hypothesenrevision (siehe dazu auch Chinn & Brewer 1993, 1998, 2001; Ganser & Hammann 2009). In Abschnitt 8.3.3.2.2 wurden Lernende, die zwar Erklärungshypothesen abduzieren, diese aber nicht gegen die grafischen Evidenzen testen oder sie bei Widersprüchen zumindest nicht revidieren, als NICHT-Revidierer*innen bezeichnet. Analog zu den oben beschriebenen Verstehenshürden, der Abstraktions- und der Abduktionshürde, wird hier von einer

Revisionshürde gesprochen. Auch die Revisionshürde verhindert, dass Lernende den Verstehensprozess vollständig durchlaufen. Lernende, die von der Revisionshürde beeinträchtigt werden, erkennen nicht, dass die von ihnen abduzierten Erklärungshypothesen fachwissenschaftlich ungeeignet sind und im Widerspruch zu den grafischen Evidenzen stehen und/oder können die einmal gebildeten Erklärungshypothesen zumindest nicht revidieren (siehe Schritt 6 in Abbildung 74; siehe Argumentation in den Abschnitten 4.3, 4.4.2.2.3 und 7.6.3; vgl. z. B. Shah 1995; Freedman & Shah 2002; Shah & Hoeffner 2002).

Die Revisionshürde erwies sich in allen Gruppen als wesentliche Hürde beim Diagrammverstehen. In fast jeder Gruppe waren ungefähr ein Drittel der Lernenden von ihr betroffen.¹⁴⁸

Als ‚erschreckend‘ kann dies insbesondere deshalb bezeichnet werden, weil anzunehmen ist, dass der tatsächliche Anteil von Lernenden sogar noch höher ist. Zu vermuten ist dies, weil unter der Revisionshürde Lernerantworten subsumiert wurden, in denen sich Erklärungshypothesen finden, die in direktem Widerspruch zu den grafischen Evidenzen stehen. Unter Bezug auf das ZP-Modell wird angenommen, dass diese Hypothesen fortbestehen, weil die Lernenden sie nicht oder zumindest nicht systematisch gegen die Daten getestet und/oder sie vor dem Hintergrund der grafischen Evidenzen nicht revidiert haben. Von der Revisionshürde können aber auch Lernende betroffen sein – ohne, dass sie aufgrund des hier gewählten Untersuchungsdesigns als solche erkannt werden –, die fachlich korrekte Erklärungshypothesen abduziert haben. Erklärungshypothesen solcher Lernender entstammen einem fachlich korrekt konstruierten Situationsraum (siehe Abschnitt 3.7; vgl. Leinhardt et al. 1990) und stehen aus diesem Grund nicht in Widerspruch zu den grafischen Evidenzen. Ob entsprechende Lernende ihre Erklärungshypothesen, die einem fachlich korrekt konstruierten Situationsraum entstammen, explizit getestet und verifiziert haben, lässt sich nur sehr selten und lediglich indirekt aus den Lernerantworten schlussfolgern (siehe beispielsweise Ausführungen zur Erklärung von BRAN24 in Abschnitt 7.6.4).

Mögliche Faktoren, die zur Konstruktion eines fachlich ungeeigneten Situationsraums beitragen können, wurden in Abschnitt 4.3 im Rahmen einer defizitorientierten Perspektive auf das Diagrammverstehen aus der Theorie abgeleitet (siehe

¹⁴⁸ In der Kontrollgruppe K-Be-Erk, in der die Lernenden das Diagramm beschrieben haben, bevor sie es erklärten, waren viele Lernende bereits von der Abstraktions- und der Abduktionshürde betroffen. In dieser Gruppe unterlagen daher nur ca. 22 % der Lernenden der Revisionshürde.

dazu auch die zusammenfassende Beantwortung von Forschungsfrage 1 in Abschnitt 4.5). Zu nennen sind hier beispielsweise Diagramm-Missinterpretationen wie die Intervall-Punkt-Konfusion, die Höhe-Steigungs-Konfusion und die ikonische Konfusion (siehe Abschnitt 4.3.1) sowie ungeeignete Problemlösestrategien (4.3.2). In der hier durchgeführten Untersuchung konnten insbesondere verschiedene *Vorstellungen* von Lernenden identifiziert werden, die zur Konstruktion eines ungeeigneten Situationsraums beitragen können. Dazu gehören insbesondere kontextspezifische Leitmotiv-Schemata sowie Gleichgewichtsvorstellungen und anthropomorphistische Vorstellungen (siehe Abschnitt 7.6.3). Vor allem die Leitmotiv-Schemata erwiesen sich als eine wesentliche Quelle für die Konstruktion ungeeigneter Situationsräume. Es wurde angenommen, dass die entsprechenden Schemata entstehen, wenn Lernende im Unterricht behandelte Diagramme bzw. deren (miss-)interpretierte Erläuterungen oder Erklärungen als prototypische Interpretationsschemata im Langzeitgedächtnis speichern (siehe zusätzlich zum Abschnitt 7.6.3 die Abschnitte 4.3.2.2, 4.3.2.3 und insbesondere 7.3.3; vgl. dazu auch Schönborn & Anderson 2006; Schönborn et al. 2002). Die Interpretationsschemata werden dann bei der Interpretation eines perzeptuell ähnlichen Diagramms aktiviert und lenken bzw. verzerren fortan die Konstruktion des Situationsraums und damit auch die weitere Analyse des Diagramms. Hinsichtlich der Wirksamkeit der instruktionalen Maßnahmen zur Überwindung der Revisionshürde sei ausdrücklich betont, dass die Revisionshürde erst im Verlauf der hier durchgeführten empirischen Analyse (induktiv) identifiziert werden konnte. Dies ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass komplexe Verstehens- und Schlussfolgerungsprozesse im Kontext des Diagrammverstehens in vorausgegangenen Arbeiten bisher nur selten analysiert wurden (siehe Abschnitt 4.2.2; vgl. zu einer ähnlichen Kritik z. B. Trafton & Trickett 2001; Ratwani et al. 2004; Trickett & Trafton 2006). Die Überwindung der Revisionshürde war daher kein direktes bzw. explizites Förder- bzw. Untersuchungsziel dieser Arbeit. Mögliche Hinweise darauf, dass sich die instruktionalen Maßnahmen hinsichtlich der Überwindung der Revisionshürde trotzdem indirekt als lern- bzw. verstehensförderlich erweisen, wurden bereits im Rahmen der Beantwortung von Forschungsfrage 5 diskutiert (siehe Abschnitt 8.4).

Ogleich sich Erfolge zur Überwindung der Revisionshürde verzeichnen lassen, sollten diese in erster Linie als Argument für die Durchführung weiterer Untersuchungen betrachtet werden. Die Identifikation und Entwicklung von Förderkonzepten und -maßnahmen, die Lernende gezielt beim Testen und Revidieren

von Hypothesen im Kontext des Diagrammverstehens unterstützen, stellt somit ein Forschungsdesiderat dar, das in nachfolgenden Untersuchungen weiterverfolgt werden sollte. Potenzielle Ansätze wie dies erfolgen könnte, werden in Kapitel 0 beschrieben.

9.4. Beantwortung von Forschungsfrage 6

Im Rahmen von Forschungsfrage 6 wurde untersucht, *wie sich die in dieser Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse synthetisieren lassen, um einen Beitrag zur Erforschung des Diagrammverstehens zu leisten*. Forschungsfrage 6 stellt somit den letzten Schritt in dem hier iterativ durchgeführten Forschungsvorhaben dar.

In Abschnitt 9.2 wurde das zyklisch-progressive Modell des Diagrammverstehens (ZP-Modell), im Sinne einer ersten Antwort auf diese Forschungsfrage, bereits ausführlich beschrieben. Im Folgenden werden daher hier lediglich kurz die übergeordneten Erkenntnisse zusammengefasst, die das Modell für das Diagrammverstehen liefert. Das Modell erweitert die in der Literatur bereits häufig beschriebenen Prozesse der Entnahme explizit dargestellter Informationen aus Diagrammen (siehe insbesondere Abschnitt 4.2.1) um die Beschreibung und Systematisierung der bis heute nur selten beschriebenen, komplexeren Schlussfolgerungs- und Verstehensprozesse. Das Modell ermöglicht die Synthese aller vier im Rahmen der Beantwortung von Forschungsfrage 1 (siehe Abschnitt 4.5) und Forschungsfrage 4 (siehe Abschnitt 7.2.5) identifizierten Forschungsperspektiven auf das Diagrammverstehen: der kompetenzorientierten, der defizitorientierten, der prozessorientierten und der epistemischen Perspektive. Es beschreibt insbesondere das Zusammenspiel von interpretierenden und erklärenden Tätigkeiten, die stattfinden, wenn Diagrammleser*innen das Ziel verfolgen, das Diagramm und die referierten Inhalte kausal zu erklären. Mithilfe des Modells können einzelne Tätigkeiten im Verstehensprozess voneinander abgegrenzt werden. Das Modell kann somit als Instrument zur Analyse und Diagnose von Lernerfähigkeiten und -problemen, insbesondere von konkreten Lern- und Verstehenshürden, verwendet werden. Ferner erscheint auch die Entwicklung gezielter und individualisierter Fördermaßnahmen sowie gestufter Hilfen mithilfe des Modells möglich, um die entsprechenden Lern- und Verstehenshürden, gezielt zu überwinden.

10. Diskussion der Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse

In der hier durchgeführten Untersuchung wurden instruktionale Maßnahmen entwickelt, die darauf abzielen, Lernende beim Diagrammverstehen zu fördern. Die entwickelten Maßnahmen erwiesen sich in dieser Hinsicht als überaus erfolgreich.

Kritisch zu diskutieren ist allerdings, dass die Wirksamkeit der entwickelten Maßnahmen nur anhand eines einzelnen (komplexen) Diagramms aus dem Themenbereich Enzymatik quantitativ evaluiert wurden. Es war kein explizites Ziel der hier durchgeführten Untersuchung zu ermitteln, inwieweit sich die hier gewonnenen Erkenntnisse und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen auf andere Diagramme bzw. auf andere Kontexte und Themenbereiche übertragen lassen.

Einschränkungen hinsichtlich der Übertragbarkeit der hier gewonnenen Erkenntnisse sollten insbesondere in Hinblick auf die in Kapitel 0 vorgenommene Kategorisierung des Diagrammverstehens – einem zentralen Element der empirischen Analyse – diskutiert werden. So sind beispielsweise anspruchsvolle Verstehensniveaus wie Niveau 5 und 6 (siehe Abschnitte 7.6.5 und 7.6.6) in hohem Maße durch die thematischen Inhalte des Untersuchungsdiagramms geprägt. Lernende agieren dann auf den Niveaus 5 und 6, wenn sie sich die Interaktion einer Vielzahl von Enzym- und Substratteilchen unter Berücksichtigung probabilistischer Überlegungen vorstellen können. Positiv hervorzuheben ist jedoch, dass die Niveaus 1 bis 4 – obgleich immer noch inhaltlich geprägt – weitgehend generisch sind (siehe Abschnitte 7.6.1 bis 7.6.4). Die Übertragung der in Zusammenhang mit diesen Niveaus gewonnenen Erkenntnisse auf andere Inhalte und Kontexte scheint möglich.

Ferner erscheint auch die Übertragbarkeit der Erkenntnisse zu den inhaltspezifischen Niveaus 5 und 6 auf ausgewählte Themenbereiche möglich zu sein. Zu nennen sind hier insbesondere die Themenbereiche Ökologie und Evolution. So stellt beispielsweise das Denken in Populationen in mancher Hinsicht ähnliche Anforderung an das Vorstellungsvermögen der Lernenden wie das Denken in Konzentrationen und in Wahrscheinlichkeiten.

Zudem sei betont, dass das Denken in Wahrscheinlichkeiten, das für die Zuordnung von Lernenden zu den Niveaus 5 und 6 notwendig ist, in der hier durchgeführten Untersuchung vornehmlich als Ausprägung besonders intensiver Abstraktions- und Elaborationsprozesse betrachtet wird und nicht als spezifische Kompetenz. Lernende, die in dem Kontext der hier durchgeführten Untersuchung probabilistisch argumentieren, demonstrieren dadurch, dass sie sich die grafisch referierten Inhalte im Situationsraum auf verschiedenen, unterschiedlich abstrakten Ebenen vorstellen und die jeweiligen Inhalte mental miteinander vernetzen können (vgl. z. B. Hammann 2019; siehe Abschnitte 3.7.2 und 7.5).

Des Weiteren sei darauf hingewiesen, dass die empirische Analyse von Lern- und Verstehenshürden nicht auf Probleme beim Denken in Wahrscheinlichkeiten fokussiert, sondern auf Lern- und Verstehenshürden, von denen angenommen wird, dass sie einen generischen Charakter besitzen und sich auch auf andere Diagramme und Themenbereiche übertragen lassen (siehe dazu insbesondere Ausführungen zu Beginn von Abschnitt 9.3). Im Fokus standen Lern- und Verstehenshürden bei der Abstraktion, der Abduktion und der Hypothesenrevision (siehe Abschnitte 8.3.3.2.2 und 9.3).

Zudem liefern auch die zu dieser Untersuchung durchgeführten empirischen Voruntersuchungen (siehe Abschnitt 5.4) Hinweise darauf, dass sich sowohl die identifizierten Lern- und Verstehenshürden als auch die identifizierten Förderkonzepte, zumindest das Strukturieren und das elaborative Interrogieren, auf andere Diagramme und Themenbereiche übertragen lassen. In den Voruntersuchungen wurden Diagramme aus dem Themenbereich Meiose sowie verschiedene Diagramme aus dem Themenbereich Ökologie, in denen Räuber-Beute-Zusammenhänge veranschaulicht wurden, verwendet.

Trotz der in diesem Kapitel beschriebenen Hinweise auf die Übertragbarkeit der Erkenntnisse, erscheint die Durchführung zusätzlicher Untersuchungen weiterhin notwendig. Empfehlenswert wäre insbesondere die Überprüfung der gewonnenen Erkenntnisse anhand von Diagrammen, die Inhalte veranschaulichen, die keinen Bezug zum Denken in Populationen oder Teilchenkonzentration haben. Potenzielle blinde Flecken der synthetisierten Erkenntnisse zu den Verstehensniveaus (siehe Abschnitt 7.7), den instruktionalen Maßnahmen (siehe Abschnitt 8.4), dem zyklisch-progressiven Modell des Diagrammverstehens (siehe Abschnitt 9.2) sowie den Lern- und Verstehenshürden (siehe Abschnitt 9.4) könnten auf diese Weise eruiert werden.

11. Konsequenzen für die Schulpraxis

Aus den in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen lassen sich verschiedene Implikationen für die Schulpraxis und insbesondere den Biologieunterricht ableiten. Es zeigte sich, dass Diagrammverstehen ein überaus komplexer und kognitiv anspruchsvoller Prozess ist, für den Lehrkräfte den Lernenden ausreichend Zeit zur Verfügung stellen sollten. Andernfalls werden Diagramme von den Lernenden lediglich oberflächlich analysiert (vgl. Peeck 1993, 1994; Berg & Smith 1994; Cromley et al. 2010; Weidenmann 1989; Tang 1991; Schmidt-Weigand 2010; Leinhardt et al. 1990). Wenn Lernende Diagramme nur oberflächlich analysieren und deren Inhalte nicht umfassend verstehen, scheinen sie Interpretationen und Erläuterungen zu diesen Diagrammen in Form prototypischer Interpretationsschemata zu speichern. Die gespeicherten Interpretationsschemata scheinen sie dann wiederum unreflektiert zum Interpretieren perzeptuell ähnlicher Diagramme zu verwenden (siehe Abschnitte 4.3.2.2 und 4.3.2.3). Dies wurde in der Literatur beispielsweise bereits für Wachstumskurven beschrieben (siehe Abschnitt 4.3.2.2) und konnte auch in dieser Arbeit für ein Untersuchungsdiagramm aus dem Themenbereich Enzymatik beobachtet werden (siehe Abschnitt 7.6.3). Lehrkräften ist daher zu raten, zueinander perzeptuell ähnliche Diagramme, d. h. Diagramme mit vergleichbarer Syntax, aber unterschiedlichen Inhalten, gezielt als Lerngelegenheiten zu nutzen, um die Analyse- und Interpretationsstrategien der Lernenden zu trainieren und zu flexibilisieren. Insbesondere für den Themenbereich Enzymatik könnten sich Kombinationen aus dem hier verwendeten Untersuchungsdiagramm (siehe Abschnitt 6.2.1.1) und Schulbuchdiagrammen (siehe Abschnitt 7.3.3) als sinnvoll erweisen (zu weiteren Anregungen siehe Swan 1985 sowie Diagramme von Preece & Janvier 1992, 1993 in Abschnitt 4.4.2.2.2). Mit leistungsstarken Lernenden könnte darüber hinaus der interpretative, translationale Wechsel zwischen Graphen- und Situationsraum (siehe Abschnitt 3.7) auf der Metaebene diskutiert werden.

Ferner fanden sich in dieser Untersuchung Hinweise dafür, dass das Beschreiben eines Diagramms, wie es in der Schulpraxis häufig praktiziert wird, eine eher mechanische Fähigkeit darstellt (siehe Abschnitte 4.2.2, 6.4 und 7.6.1), die das inhaltliche Verstehen von Diagrammen nicht fördert. Das Beschreiben scheint kognitive Ressourcen der Lernenden zu binden, die ihnen dann für weitere Verstehensprozesse womöglich nicht mehr zur Verfügung stehen. Diese Form der

deskriptiven Datenanalyse sollte daher im Schulunterricht in eine echte, explorative Datenanalyse transformiert werden, in der die grafisch zusammengefassten Inhalte in einem Prozess des zyklisch-progressiven Diagrammverstehens entdeckt werden (siehe Abschnitt 9.2). Um diese Form der explorativen Datenanalyse zu erleichtern, kann das in dieser Arbeit entwickelte ZP-Modell (siehe Abbildung 74 auf Seite 371) als Strukturierungshilfe fungieren. Die drei in Abschnitt 9.3 beschriebenen Lern- und Verstehenshürden, die Abstraktions-, die Abduktions- und die Revisionshürde, sollten dabei von Lehrkräften explizit berücksichtigt werden; Lernende sollten beim Überwinden dieser Hürden gezielt unterstützt werden. Die in Abschnitt 5.3 identifizierten Förderkonzepte bzw. die darauf aufbauend entwickelten instruktionalen Maßnahmen (siehe Abschnitt 6.2.1.3), bestehend aus kognitiv aktivierenden (KA), strukturierenden (S) und elaborierend-interrogativen (EI) Maßnahmen, erwiesen sich hierzu als wirksam. Unter Verwendung der Maßnahmen konnten zahlreiche Lernende sowohl die Abstraktions- als auch die Abduktionshürde überwinden (siehe Abschnitt 8.3.3.2.2). Zudem scheinen die Maßnahmen (indirekt) geeignet zu sein, um Lernenden das Überwinden der Revisionshürde zu erleichtern (siehe Abschnitt 8.4). Während sich die strukturierenden und die elaborierenden-interrogativen Maßnahmen in der hier verwendeten Art und Weise einfach im Unterricht implementieren lassen, erscheint dies für die kognitiv aktivierenden Aufgaben aufwendiger. Es ist jedoch zu vermuten, dass die in dieser Arbeit aufwendig konstruierten Aufgaben durch leichter zu gestaltende Aufgaben, die ebenfalls kognitiv aktivierend wirken, ersetzt werden können. Denkbar wären beispielsweise das Einfordern des intensiven Lesens der Überschrift und -unterschrift des zu analysierenden Diagramms (vgl. Lumer & Winter 2019), das Entwickeln einer (vorläufigen) Diagrammüberschrift (vgl. Jahnke & Lumer 2015), das Übersetzen einer kurzen Diagrammbeschreibung aus einer Zweit- oder Drittsprache in die Erstsprache oder umgekehrt (vgl. Jahnke & Lumer 2014), das Definieren relevanter Fachbegriffe oder Konzepte sowie das Skizzieren der in dem Diagramm referierten inhaltlichen Situation (vgl. Lumer et al. 2017; Taber 2009; Cheng & Gilbert 2009). Das ZP-Modell kann darüber hinaus als theoretische Grundlage fungieren, um weitere Förderkonzepte in den Prozess des Diagrammverstehens einzuordnen. Ferner kann das ZP-Modell, unterstützt durch das in Abschnitt 7.7 beschriebene Kodiersystem (siehe Tabelle 19 auf Seite 331; siehe dazu auch Abschnitt 7.6), zur Diagnose und Leistungsbewertung verwendet werden.

Zusätzlich zu den spezifischen Erkenntnissen zum Diagrammverstehen konnten in dieser Arbeit auch – obgleich dies kein direktes Untersuchungsziel war – (Schüler-)Vorstellungen von Lernenden identifiziert werden (siehe Abschnitt 7.6.3). Insbesondere die in den Lernerantworten vermehrt beobachtete, fachlich inkorrekte Vorstellung, dass Enzym- und Substratmoleküle sich zu schwerlöslichen Komplexen verbinden und damit das Produkt einer enzymatischen Reaktion darstellen, erwies sich bei der Diagrammanalyse als außerordentlich verstehens- bzw. lernhinderlich. Es fanden sich Hinweise darauf, dass Lernende diese Vorstellung auf Grundlage von Schulbuchtexten und Schulbuchabbildungen konstruieren (siehe Abschnitte 7.3.3 und 7.6.3). Entsprechende Vorstellungen sollten mit den Lernenden daher, insbesondere in Zusammenhang mit der Interpretation der entsprechenden Schulbuchdiagramme, intensiv diskutiert werden.

12. Ausblick

Die identifizierten Förderkonzepte erwiesen sich in dieser Studie als sehr gut geeignet, um Lernenden das Diagrammverstehen zu erleichtern. Gleichzeitig zeigte sich im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchung aber auch, dass Lernende zusätzlich Unterstützung bei der Revision ihrer abduzierten Erklärungshypothesen benötigen. Fast ein Drittel der Lernenden, sowohl in den Interventions- als auch in den Kontrollgruppen, war nicht eigenständig dazu in der Lage, einmal abduzierte, fachlich inkorrekte und zu den Daten im Widerspruch stehende Erklärungshypothesen mithilfe des Diagramms zu revidieren (siehe Abschnitte 8.3.3.2.2 und 9.3.3). Entsprechend dem in dieser Arbeit entwickelten zyklisch-progressiven Modell des Diagrammverstehens (ZP-Modell, siehe Abschnitt 9.2) ist zu erwarten, dass wenn Lernende zur Hypothesenrevision befähigt werden, sie in der Lage sind, mehrere aufeinander aufbauende Verstehenszyklen zu durchlaufen und das Diagramm umfassend(er) zu verstehen. Es erscheint daher sinnvoll, in zukünftigen Untersuchungen zu ermitteln, wie Lernende – aufbauend auf den in dieser Arbeit identifizierten Förderkonzepten – im Kontext des Diagrammverstehens zur Hypothesenrevision befähigt werden können und zu überprüfen, inwieweit sich dies tatsächlich als hilfreich erweist, um das Diagrammverstehen zu fördern. Digitale Medien, die eine Interaktion mit der grafischen Darstellung erlauben, erscheinen zur konkreten Umsetzung entsprechender Fördermaßnahmen vielversprechend (vgl. Van Mil et al. 2016; McNeill et al. 2006; Meir et al. 2005; Rutten, van Joolingen & van der Veen et al. 2012; Ploetzner et al. 2009; Sandoval 2003; Sandoval & Reiser 1997, 2004). Denkbar wäre beispielsweise, Lernenden mithilfe eines Computerprogramms zu veranschaulichen, welche grafischen Vorhersagen aus ihren Erklärungshypothesen abgeleitet werden können. Die Lernenden könnten so trainieren, die vorhergesagten Graphenverläufe mit den tatsächlichen Graphenverläufen abzugleichen und üben, Erklärungshypothesen mithilfe von Diagrammen systematisch zu testen und zu revidieren. Um entsprechende Vorhersagen programmieren zu können, müsste der Hypothesensuchraum allerdings gut erforscht sein. Die in dieser Untersuchung empirisch gewonnenen und bereits umfassend analysierten Lernerantworten (siehe Abschnitt 7.6) könnten als Grundlage für eine entsprechende Programmierung fungieren.

In nachfolgenden Studien sollte darüber hinaus die Wirksamkeit der einzelnen Förderkonzepte (kognitiv Aktivieren, Strukturieren und elaborativ Interrogieren;

siehe Abschnitt 5.3.2) sowie Interaktionseffekte zwischen den Förderkonzepten experimentell weiter untersucht werden. Aufgrund des hier gewählten Untersuchungsdesigns und der unvollständigen Randomisierung (siehe Abschnitte 6.2.4 und 6.3.1.2) konnten diesbezüglich lediglich Vermutungen aufgestellt werden. Weitere empirisch-experimentell abgesicherte Erkenntnisse über mögliche Wirkmechanismen könnten die Entwicklung themenübergreifender Methodentrainings erleichtern.

Das hier durchgeführte Forschungsvorhaben erscheint insbesondere auch zur Förderung und zur Diagnose fachspezifischer Sprachhandlungen als anknüpfungsfähig (vgl. z. B. Rous 2016; Gogolin et al. 2013; Redder & Weinert 2013; Nitz 2012; Nitz, Nerdel & Prechtel 2012; Prediger & Hein 2017; Oleschko & Schmitz 2016). So erwiesen sich das in dieser Arbeit entwickelte Kodiersystem (siehe Abschnitt 7.7) und das ZP-Modell (siehe Abschnitt 9.2) als außerordentlich gut geeignet, um Lernerprobleme beim Diagrammverstehen zu diagnostizieren und zu analysieren. Die Varianz, die aus unterschiedlichen sprachlichen (Argumentations-)Kompetenzen der Lernenden resultiert, wurde dabei allerdings nicht untersucht. Zu nennen sind hier beispielsweise Probleme beim Wechsel zwischen bildungssprachlichen, fachsprachlichen und alltagssprachlichen Registern sowie beim fachspezifischen Argumentieren. Auch in dieser Hinsicht erscheinen die kodierten Lernerantworten wertvoll, um darauf aufbauend weitere Analysen durchzuführen.

13. Literaturverzeichnis

- Åberg-Bengtsson, L., & Ottosson, T. (2006). What lies behind graphicacy? Relating students' results on a test of graphically represented quantitative information to formal academic achievement. *Journal of Research in Science Teaching*, 43(1), 43-62.
- Adelson, B. (1981). Problem solving and the development of abstract categories in programming languages. *Memory & cognition*, 9(4), 422-433.
- Adu-Gyamfi, K., Stiff, L. V., & Bossé, M. J. (2012). Lost in translation: Examining translation errors associated with mathematical representations. *School science and mathematics*, 112(3), 159-170.
- Ainley, J. (1995). Re-viewing graphing: Traditional and intuitive approaches. *For the learning of Mathematics*, 15(2), 10-16.
- Ainley, J. (2000). Transparency in graphs and graphing tasks: An iterative design process. *The Journal of Mathematical Behavior*, 19(3), 365-384.
- Ainley, J., & Monteiro, C. (2008). Comparing curricular approaches for statistics in primary school in England and Brazil: a focus on graphing. In C. Batanero, G. Burrill, C. Reading, & A. Rossman (Hrsg.), *Joint ICMI/IASE study: Teaching statistics in school mathematics. Challenges for teaching and teacher education. Proceedings of the ICMI Study 18 and 2008 IASE round table conference*. Mexico: ICMI/IASE. Abgerufen von https://iase-web.org/documents/papers/rt2008/T1P9_Ainley.pdf, letzter Zugriff: 19.07.2019.
- Ainsworth, S. (1999). A functional taxonomy of multiple representations. *Computers and Education*, 33(2-3), 131-152.
- Ainsworth, S. (2006). DeFT: A Conceptual Framework for Considering Learning with Multiple Representations. *Learning and Instruction*, 16(3), 183-196.
- Ainsworth, S., & Loizou, A. T. (2003). The effects of self-explaining when learning with text or diagrams. *Cognitive science*, 27(4), 669-681.
- Alberts, B., Johnson, A., Lewis, J., Raff, M., Roberts, K., & Walter, P. (2011). *Molekularbiologie der Zelle* (5. Aufl.). Weinheim: Wiley-VCH.
- Aleven, V. A., & Koedinger, K. R. (2002). An effective metacognitive strategy: Learning by doing and explaining with a computer-based Cognitive Tutor. *Cognitive science*, 26(2), 147-179.

Alvarez, M. C., & Risko, V. J. (1988). Using a thematic organizer to facilitate transfer learning with college developmental studies students. *Literacy Research and Instruction*, 28(2), 1-15.

Angra, A., & Gardner, S. M. (2018). The Graph Rubric: Development of a Teaching, Learning, and Research Tool. *CBE—Life Sciences Education*, 17(4), ar65.

Aoyama, K. (2006). Investigating a hierarchy of students' graph interpretation. In A. Rossman, & B. Chance (Hrsg.), *Working cooperatively in statistics education: proceedings of the 7th International Conference on Teaching Statistics, Salvador, Bahia, Brazil*, (2. Aufl., S. 2-7). Voorburg: International Association for Statistical Education and International Statistical Institute. Abgerufen von https://www.ime.usp.br/~abe/ICOTS7/Proceedings/PDFs/InvitedPapers/6C2_AOYA.pdf, letzter Zugriff: 19.07.2019.

Aoyama, K. (2007). Investigating a hierarchy of students' interpretations of graphs. *International Electronic Journal of Mathematics Education*, 2(3), 298-318.

Aoyama, K., & Stephens, M. (2003). Graph interpretation aspects of statistical literacy: A Japanese perspective. *Mathematics Education Research Journal*, 15(3), 207-225.

Appelrath, H. J. (1985). *Von Datenbanken zu Expertensystemen*. Informatik-Fachberichte 102. Berlin, Heidelberg: Springer.

Arteaga, P., & Batanero, C. (2011). Relating graph semiotic complexity to graph comprehension in statistical graphs produced by prospective teachers. In M. Pytlak, T. Rowland, & E. Swoboda (Hrsg.), *Proceeding of CERME* (Bd. 7, S. 725-734). Poland: University of Rzeszów.

Arteaga, P., Batanero, C., Contreras, J. M., & Cañadas, G. R. (2012). Understanding statistical graphs: a research survey. *Boletín de Estadística e Investigación Operativa*, 28(3), 261-277.

Artelt, C., McElvany, N., Christmann, U., Richter, T., Groeben, N., Köster, J., Schneider, W., Stanat, P., Ostermeier, C., Schiefele, U., Valtin, R., Ring, K. (2007). *Förderung von Lesekompetenz. Expertise*. Berlin: Bundesministerium für Bildung und Forschung.

Arts, J. A., Gijssels, W. H., & Boshuizen, H. P. (2006). Understanding managerial problem-solving, knowledge use and information processing: Investigating stages from school to the workplace. *Contemporary Educational Psychology*, 31(4), 387-410.

- Ayres, P., & Sweller, J. (2005). The split-attention principle in multimedia learning. In R.E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 135–146). New York, NY: Cambridge University Press.
- Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W., & Weiber, R. (2018). *Multivariate Analysemethoden: eine anwendungsorientierte Einführung* (15. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Bakker, A. (2007). Diagrammatic reasoning and hypostatic abstraction in statistics education. *Semiotica*, *164*, 9-29.
- Bakker, A., & Hoffmann, M. H. (2005). Diagrammatic reasoning as the basis for developing concepts: A semiotic analysis of students' learning about statistical distribution. *Educational Studies in Mathematics*, *60*(3), 333-358.
- Ballstaedt, S. P. (1997). *Wissensvermittlung: Die Gestaltung von Lernmaterial*. Beltz, Psychologie Verlags Union.
- Bannert, M., & Reimann, P. (2009). Metakognitives Fördern des Lernens mit digitalen Medien durch Prompting-Maßnahmen. In R. Plötzner, T. Leuders, & A. Wichert (Hrsg.), *Lernchance Computer. Strategien für das Lernen mit digitalen Medienverbänden* (S. 67-87). Münster: Waxmann.
- Bannert, M., & Schnotz, W. (2006). Vorstellungsbilder und Imagery-Strategien. In H. Mandl & H. Friedrich (Hrsg.), *Handbuch Lernstrategien* (S. 72–88). Goettingen: Hogrefe.
- Bassler, A. (2010). *Die Visualisierung von Daten im Controlling*. Lohmar: Josef Eul.
- Barclay, W. L. (1986). *Graphing Misconceptions and Possible Remedies Using Microcomputer-based Labs*. Paper presented at the National Educational Computing Conference, San Diego, CA. Abgerufen von <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED264129.pdf>, letzter Zugriff: 19.07.2019.
- Bauer, M. I., & Johnson-Laird, P. N. (1993). How diagrams can improve reasoning. *Psychological science*, *4*(6), 372-378.
- Baumert, J., Lehmann, R., Lehrke, M., Clausen, M., Hosenfeld, I., Neubrand, J., et al. (Hrsg.). (1998). Testaufgaben Mathematik TIMSS 7./8. Klasse (Population 2). Berlin: Max-Planck-Institut für Bildungsforschung.
- Bayrhuber, H., Hauber, W., & Kull, U. (Hrsg.) (2014). *Linder Biologie Lehrbuch für die Oberstufe* (23. Auf). Nordrhein-Westfalen Einführungsphase. Braunschweig: Schroedel.

- Bean, T. W., Searles, D., & Cowen, S. (1990). Test-based analogies. *Reading Psychology: An International Quarterly*, 11(4), 323-333.
- Bechtel, W. (2006). *Discovering cell mechanisms: The creation of modern cell biology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Bechtel, W., & Abrahamsen, A. (2005). Explanation: A mechanist alternative. *Studies in History and Philosophy of Science Part C: Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 36(2), 421-441.
- Beck, C. (2017). *Biologiespezifisches Bildverständnis beim Umgang mit multiplen externen Repräsentationen* (Dissertation). München: Technische Universität München.
- Beck, C., & Nerdel, C. (2015). Integration multipler externer Repräsentationen: Kompetenzmodellierung und der Einfluss von Aufgabenmerkmalen auf die Schwierigkeit. In U. Gebhard, M. Hammann, B. Knaelmann (Hrsg.), *Abstractband - Bildung durch Biologieunterricht* (S. 95). Hamburg: Universität Hamburg.
- Beckmann, J. F. (2010). Taming a beast of burden—On some issues with the conceptualisation and operationalisation of cognitive load. *Learning and instruction*, 20(3), 250-264.
- Bell, A., Brekke, G., & Swan, M. (1987a). Diagnostic teaching: 4 graphical interpretations. *Mathematics Teaching*, 119, 56–60.
- Bell, A., Brekke, G., & Swan, M. (1987b). Diagnostic teaching: 5 graphical interpretations teaching styles and their effects. *Mathematics Teaching*, 120, 50–57.
- Bell, A., & Janvier, C. (1981). The interpretation of graphs representing situations. *For the learning of mathematics*, 2(1), 34-42.
- Bentler, P. M. (1990). Comparative fit indexes in structural models. *Psychological bulletin*, 107(2), 238-246.
- Berg, C. A., & Smith, P. (1994). Assessing students' abilities to construct and interpret line graphs: Disparities between multiple-choice and free-response instruments. *Science Education*, 78(6), 527-554.
- Berg, H. C. (1993). *Random walks in biology*. Princeton: Princeton University Press.
- Bergey, B. W., Cromley, J. G., Kirchgessner, M. L., & Newcombe, N. S. (2015a). Using diagrams versus text for spaced restudy: Effects on learning in

10th grade biology classes. *British Journal of Educational Psychology*, 85(1), 59-74.

Bergey, B. W., Cromley, J. G., & Newcombe, N. S. (2015b). Teaching high school biology students to coordinate text and diagrams: Relations with transfer, effort, and spatial skill. *International Journal of Science Education*, 37(15), 2476-2502.

Bering, C., & Bering, K. (2014). *Konzeptionen der Kunstdidaktik: Dokumente eines komplexen Gefüges* (Bd. 12). Oberhausen: ATHENA.

Berthold, K., Eysink, T. H., & Renkl, A. (2009). Assisting self-explanation prompts are more effective than open prompts when learning with multiple representations. *Instructional Science*, 37(4), 345-363.

Berthold, K., & Renkl, A. (2009). Instructional aids to support a conceptual understanding of multiple representations. *Journal of Educational Psychology*, 101(1), 70-87.

Bertin, J. (1983) *Semiology of Graphics: Diagrams, Networks, Maps*. Madison. Best, H., & Wolf, C. (2014). *The SAGE handbook of regression analysis and causal inference*. London: SAGE Publications Ltd.

Beyer, I., Bickel, H., Gropengießer, H., Kluge, S., Knauer, B., Kronberg, I., Krull H.-P., Lichtner H.-D., Schneeweiß, H., Ströhla, G., & Tischer, W. (Hrsg.) (2016). *Natura. Biologie für Gymnasien: Oberstufe*. Stuttgart: Ernst Klett.

Bhatt, R. (2008). *Modern Methods Of Teaching (Biology)*. S. B. Nangia, New Delhi: A. P. H. Publishing Corporation.

Biggs, J. B., & Collis, K. F. (1982). *Evaluating the quality of learning: The SOLO taxonomy (Structure of the Observed Learning Outcome)*. New York: Academic Press.

Biggs, J. B., & Collis, K. F. (1991). Multimodal learning and the quality of intelligent behavior. In H. Rowe (Hrsg.), *Intelligence: Reconceptualization and Measurement* (S. 57-76). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.

Biggs, J., & Tang, C. (2011). *Teaching For Quality Learning At University*. England, UK: McGraw-Hill Education.

Biological Sciences Curriculum Study (2006). *BSCS Biology: A human approach: teacher guide* (3. Aufl.). Dubuque, IA: Kendall/Hunt.

Blanca, M., Alarcón, R., Arnau, J., Bono, R., & Bendayan, R. (2017). Non-normal data: Is ANOVA still a valid option? *Psicothema*, 29(4), 552-557.

Bohnsack, R., Nentwig-Gesemann, I., & Nohl, A. M. (2013). Einleitung: Die dokumentarische Methode und ihre Forschungspraxis. In R. Bohnsack, I. Nentwig-Gesemann & A. M. Nohl (Hrsg.), *Die dokumentarische Methode und ihre Forschungspraxis* (S. 9-32). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Bommarius, A. S., & Riebel, B. R. (2004). *Biocatalysis: fundamentals and applications*. Weinheim: Wiley-VCH.

Boote, S. K. (2014). Assessing and understanding line graph interpretations using a scoring rubric of organized cited factors. *Journal of Science Teacher Education*, 25(3), 333-354.

Bortz, J., & Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human und Sozialwissenschaftler* (4. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer.

Bortz, J., & Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Boshuizen, H. P., & Schmidt, H. G. (1992). On the role of biomedical knowledge in clinical reasoning by experts, intermediates and novices. *Cognitive science*, 16(2), 153-184.

Bossé, M. J., Adu-Gyamfi, K., & Chandler, K. (2014). Students' Differentiated Translation Processes. *International Journal for Mathematics Teaching & Learning*, 113-133. Abgerufen von <http://www.cimt.org.uk/journal/bosse5.pdf>, letzter Zugriff: 19.07.2019.

Bowen, G. M., & Roth, W. M. (1998). Lecturing graphing: What features of lectures contribute to student difficulties in learning to interpret graph? *Research in Science Education*, 28(1), 77.

Bowen, G. M., & Roth, W. M. (2002). Why students may not learn to interpret scientific inscriptions. *Research in Science Education*, 32(3), 303-327.

Bowen, G. M., Roth, W. M., & McGinn, M. K. (1999). Interpretations of graphs by university biology students and practicing scientists: Toward a social practice view of scientific representation practices. *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching*, 36(9), 1020-1043.

Braaten, M., & Windschitl, M. (2011). Working toward a stronger conceptualization of scientific explanation for science education. *Science education*, 95(4), 639-669.

- Brillard, P.-A., & Malaterre, C. (2015). Explanation in biology: An introduction. In P.-A. Brillard C. Malaterre (Hrsg.), *Explanation in Biology* (S. 1-28). Dordrecht: Springer.
- Brandstetter-Korinth, M. (2017). *Abbildungen im Biologieunterricht* (Bd. 19). Berlin: Logos.
- Bransford, J. D., Brown, A. L., & Cocking, R. R. (2000). *How people learn* (Bd. 11). Washington, DC: National Academy.
- Bransford, J. D., & Johnson, M. K. (1972). Contextual prerequisites for understanding: Some investigations of comprehension and recall. *Journal of verbal learning and verbal behavior*, *11*(6), 717-726.
- Breidenmoser, T., & Wolkenhauer, O. (2015). Explanation and organizing principles in systems biology. In P.-A. Brillard C. Malaterre (Hrsg.), *Explanation in Biology* (S. 249-264). Dordrecht: Springer.
- Bretz, S. L., & Linenberger, K. J. (2012). Development of the enzyme–substrate interactions concept inventory. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, *40*(4), 229-233.
- Brigandt, I. (2013). Explanation in biology: Reduction, pluralism, and explanatory aims. *Science & Education*, *22*(1), 69-91.
- Bright, G. W. & Friel, S. N. (1998). Graphical Representations: Helping Students Interpret Data. In S. P. Lajoie (Hrsg.), *Reflections on Statistics: Learning, Teaching, and Assessment in Grades K-12* (S. 63-88). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Brown, T. A. (2014). *Confirmatory factor analysis for applied research*. New York: Guilford Publications.
- Browne, M. W., & Cudeck, R. (1993). Alternative Ways of Assessing Model Fit. In K. A. Bollen, & J. S. Long (Hrsg.), *Testing Structural Equation Models* (S. 136-162). Newbury Park: Sage.
- Bryant, P. E., & Somerville, S. C. (1986). The spatial demands of graphs. *British Journal of Psychology*, *77*(2), 187-197.
- Bühner, M. (2011). *Einführung in die Test-und Fragebogenkonstruktion*. München: Pearson.
- Bühner, M., & Ziegler, M. (2009). *Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. München: Pearson.

- Büttner, F., & Gottdang, A. (2006). *Einführung in die Ikonographie. Wege zur Deutung von Bildinhalten*. München: CH Beck.
- Buiatti, M., & Longo, G. (2013). Randomness and multilevel interactions in biology. *Theory in Biosciences*, *132*(3), 139-158.
- Butcher, K. R. (2006). Learning from text with diagrams: Promoting mental model development and inference generation. *Journal of Educational Psychology*, *98*(1), 182-197.
- Canham, M., & Hegarty, M. (2010). Effects of knowledge and display design on comprehension of complex graphics. *Learning and instruction*, *20*(2), 155-166.
- Carpenter, P. A., & Shah, P. (1998). A model of the perceptual and conceptual processes in graph comprehension. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, *4*(2), 75-100.
- Carr, S. C., & Thompson, B. (1996). The effects of prior knowledge and schema activation strategies on the inferential reading comprehension of children with and without learning disabilities. *Learning Disability Quarterly*, *19*(1), 48-61.
- Carswell, C., Emery, C., & Lonon, A. M. (1993). Stimulus complexity and information integration in the spontaneous interpretations of line graphs. *Applied Cognitive Psychology*, *7*(4), 341-357.
- Chabris, C. F., & Kosslyn, S. M. (2005). Representational correspondence as a basic principle of diagram design. In S. O. Tergan, & T. Keller (Hrsg.), *Knowledge and information visualization* (S. 36-57). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Chase, W. G., & Simon, H. A. (1973). Perception in chess. *Cognitive psychology*, *4*(1), 55-81.
- Chen, F., Curran, P. J., Bollen, K. A., Kirby, J., & Paxton, P. (2008). An empirical evaluation of the use of fixed cutoff points in RMSEA test statistic in structural equation models. *Sociological methods & research*, *36*(4), 462-494.
- Cheng, M., & Gilbert, J. K. (2009). Towards a better utilization of diagrams in research into the use of representative levels in chemical education. In J. K. Gilbert, & D. Treagust (Hrsg.), *Multiple representations in chemical education* (S. 55-73). Dordrecht: Springer.
- Chi, M. T. (2005). Commonsense conceptions of emergent processes: Why some misconceptions are robust. *The journal of the learning sciences*, *14*(2), 161-199.

- Chi, M. T., Bassok, M., Lewis, M. W., Reimann, P., & Glaser, R. (1989). Self-explanations: How students study and use examples in learning to solve problems. *Cognitive science*, *13*(2), 145-182.
- Chi, M. T., De Leeuw, N., Chiu, M. H., & LaVancher, C. (1994). Eliciting self-explanations improves understanding. *Cognitive science*, *18*(3), 439-477.
- Chi, M. T. H., Feltovich, P. J., & Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive science*, *5*(2), 121-152.
- Chi, M. T. H., Glaser, R., & Rees, E. (1982). Expertise in Problem Solving. In R. J. Sternberg (Hrsg.), *Advances in Development of Human Intelligence*, (Bd. 1., S. 7-75). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Chiasson, P., & Tristan, J. (2012). *Relational Thinking Styles and Natural Intelligence: Assessing Inference Patterns for Computational Modeling*. Hershey, Pennsylvania: IGI Global.
- Chinn, C. A., & Brewer, W. F. (1993). The role of anomalous data in knowledge acquisition: A theoretical framework and implications for science instruction. *Review of educational research*, *63*(1), 1-49.
- Chinn, C. A., & Brewer, W. F. (1998). An empirical test of a taxonomy of responses to anomalous data in science. *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching*, *35*(6), 623-654.
- Chinn, C. A., & Brewer, W. F. (2001). Models of data: A theory of how people evaluate data. *Cognition and Instruction*, *19*(3), 323-393.
- Chinn, C. A., & Malhotra, B. A. (2002). Epistemologically authentic inquiry in schools: A theoretical framework for evaluating inquiry tasks. *Science Education*, *86*(2), 175-218.
- Christian, A., Mackensen-Friedrichs, I., Wendel, C., & Westendorf-Bröring, E. (Hrsg.) (2014). *Grüne Reihe. Materialien S II. Biologie: Stoffwechselphysiologie*. Braunschweig: Schroedel.
- Christmann, U. (1989). *Modelle der Textverarbeitung: Textbeschreibung als Textverstehen* (No. 21). Münster: Aschendorff.
- Christmann, U. (2015a). Kognitionspsychologische Ansätze des Lesens. In U. von Rautenberg & U. Schneider (Hrsg.), *Lesen. Ein interdisziplinäres Handbuch* (S. 21-45). Berlin: de Gruyter.

- Christmann, U. (2015b). Lesen als Sinnkonstruktion. In U. von Rautenberg & U. Schneider (Hrsg.), *Lesen. Ein interdisziplinäres Handbuch* (S. 169-184). Berlin: de Gruyter.
- Christmann, U., & Groeben, N. (1999). Psychologie des Lesens. In B. Franzmann, K. Hasemann, D. Löffler & E. Schön (Hrsg.), *Handbuch Lesen* (S. 145-223). München: Saur.
- Cierniak (2011). Facilitating and Inhibiting Learning by the Spatial Contiguity of Text and Graphic: How Does Cognitive Load Mediate the Split-Attention and Expertise Reversal Effect? (Dissertation). Tübingen: Universität Tübingen.
- Cierniak, G., Scheiter, K., & Gerjets, P. (2009). Explaining the split-attention effect: Is the reduction of extraneous cognitive load accompanied by an increase in germane cognitive load? *Computers in Human Behavior*, 25(2), 315-324.
- Clark, R. C., & Mayer, R. E. (2011). *E-learning and the science of instruction: Proven guidelines for consumers and designers of multimedia learning* (3. Aufl.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Clement, J. (1985). Misconceptions in graphing. In L. Streefland (Hrsg.), *Proceedings of the ninth international conference for the psychology of mathematics education* (Bd. 1, S. 369-375). Utrecht: Utrecht University.
- Clement, J. (1989). The concept of variation and misconceptions in Cartesian graphing. *Focus on Learning Problems in Mathematics*, 11(2), 77-87.
- Clement, J., Mokros, J. R., & Schultz, K. (1986). *Adolescents' graphing skills: A descriptive analysis*. Cambridge: Technical Education Research Center. Abgerufen von <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED264127.pdf>, letzter Zugriff: 19.07.2019.
- Cleveland, W. S., & McGill, R. (1985). Graphical perception and graphical methods for analyzing scientific data. *Science*, 229(4716), 828-833.
- Cobb, P., Confrey, J., DiSessa, A., Lehrer, R., & Schauble, L. (2003). Design experiments in educational research. *Educational researcher*, 32(1), 9-13.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2. Aufl.). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Coleman, E. B., Brown, A. L., & Rivkin, I. D. (1997). The effect of instructional explanations on learning from scientific texts. *The Journal of the Learning Sciences*, 6(4), 347-365.

- Console, L., & Saitta, L. (2000). On the relations between abductive and inductive explanation. In P. Flach & A. Kakas (Hrsg.). *Abduction and Induction: Essays on their Relation and Integration* (S. 133-151). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Coté, N., & Goldman, S. R. (1999). Building representations of informational text: Evidence from children's think-aloud protocols. In H. van Oostendorp, & S. R. Goldman (Hrsg.), *The construction of mental representations during reading* (S. 151-174). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Cowan, N. (2010). The Magical Mystery Four How Is Working Memory Capacity Limited, and Why? *Current Directions in Psychological Science*, 19(1), 51-57.
- Cox, R. (1999). Representation construction, externalised cognition and individual differences. *Learning and instruction*, 9(4), 343-363.
- Craver, C. F. (2001). Role functions, mechanisms, and hierarchy. *Philosophy of science*, 68(1), 53-74.
- Craver, C. F. (2006). When mechanistic models explain. *Synthese*, 153(3), 355-376.
- Craver, C. F. (2008). Physical law and mechanistic explanation in the Hodgkin and Huxley model of the action potential. *Philosophy of Science*, 75(5), 1022-1033.
- Craver, C. F., & Bechtel, W. (2007). Top-down causation without top-down causes. *Biology & Philosophy*, 22(4), 547-563.
- Craver, C. F., & Darden, L. (2013). *In search of mechanisms: Discoveries across the life sciences*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Cromley, J. G., Perez, T. C., Fitzhugh, S. L., Newcombe, N. S., Wills, T. W., & Tanaka, J. C. (2013a). Improving students' diagram comprehension with classroom instruction. *The Journal of Experimental Education*, 81(4), 511-537.
- Cromley, J. G., Bergey, B. W., Fitzhugh, S. L., Newcombe, N., Wills, T. W., Shipley, T. F., & Tanaka, J. C. (2013b). Effectiveness of student-constructed diagrams and self-explanation instruction. *Learning and Instruction*, 26(1), 45-58.
- Cromley, J. G., Bergey, B. W., Fitzhugh, S., Newcombe, N., Wills, T. W., Shipley, T. F., & Tanaka, J. C. (2013c). Effects of three diagram instruction methods on transfer of diagram comprehension skills: The critical role of inference while learning. *Learning and Instruction*, 26, 45-58.

- Cromley, J. G., Snyder-Hogan, L. E., & Luciw-Dubas, U. A. (2010). Cognitive activities in complex science text and diagrams. *Contemporary Educational Psychology*, 35(1), 59-74.
- Croskerry, P. (2009). A universal model of diagnostic reasoning. *Academic medicine*, 84(8), 1022-1028.
- Croskerry, P. (2014). Bias: a normal operating characteristic of the diagnosing brain. *Diagnosis*, 1(1), 23-27.
- Croskerry, P., Singhal, G., & Mamede, S. (2013). Cognitive debiasing 1: origins of bias and theory of debiasing. *BMJ Qual Saf*, 22(Suppl 2), ii58-ii64.
- Curcio, F. R. (1987). Comprehension of mathematical relationships expressed in graphs. *Journal for research in mathematics education*, 18(5), 382-393.
- Curcio, F. R. (1989). *Developing Graph Comprehension. Elementary and Middle School Activities*. Reston, VA: National Council of Teachers of Mathematics.
- Darden, L. (2008). Thinking again about biological mechanisms. *Philosophy of science*, 75(5), 958-969.
- De Grave, W. S., Schmidt, H. G., & Boshuizen, H. P. (2001). Effects of problem-based discussion on studying a subsequent text: A randomized trial among first year medical students. *Instructional Science*, 29(1), 33-44.
- De Jong, T., & Van Joolingen, W. R. (1998). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of educational research*, 68(2), 179-201.
- DeLeeuw, K. E., & Mayer, R. E. (2008). A comparison of three measures of cognitive load: Evidence for separable measures of intrinsic, extraneous, and germane load. *Journal of educational psychology*, 100(1), 223-234.
- Dettmer, U. (2005). *Intensivkurs Biochemie: mit 93 Tabellen*. München: Elsevier, Urban & Fischer.
- DiSessa, A. A. (2004). Metarepresentation: Native competence and targets for instruction. *Cognition and instruction*, 22(3), 293-331.
- Döring, N., & Bortz, J. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften* (5. Aufl.). Berlin, Heidelberg.
- Dornisch, M., Sperling, R. A., & Zeruth, J. A. (2011). The effects of levels of elaboration on learners' strategic processing of text. *Instructional Science*, 39(1), 1-26.

- Dunlosky, J., Rawson, K. A., Marsh, E. J., Nathan, M. J., & Willingham, D. T. (2013). Improving students' learning with effective learning techniques: Promising directions from cognitive and educational psychology. *Psychological Science in the Public Interest*, 14(1), 4-58.
- Dutke, S. (1994). *Mentale Modelle: Konstrukte des Wissens und Verstehens. Kognitionspsychologische Grundlagen für die Software-Ergonomie*. Göttingen: Verlag für Angewandte Psychologie.
- Duval, R. (2006). A cognitive analysis of problems of comprehension in a learning of mathematics. *Educational studies in mathematics*, 61(1-2), 103-131.
- Eckhardt, M. (2010). *Instruktionale Unterstützung beim Lernen mit Computersimulationen im Fach Biologie* (Dissertation). Kiel: Christian-Albrechts Universität Kiel.
- Eco, U. (1976) *A Theory of Semiotics* (Bd. 217). Bloomington: Indiana University Press.
- Ehmer, M. (2008). *Förderung von kognitiven Fähigkeiten beim Experimentieren im Biologieunterricht der 6. Klasse: eine Untersuchung zur Wirksamkeit von methodischem, epistemologischem und negativem Wissen* (Dissertation). Kiel: Christian-Albrechts Universität Kiel.
- Eitel, A., & Scheiter, K. (2015). Picture or text first? Explaining sequence effects when learning with pictures and text. *Educational psychology review*, 27(1), 153-180.
- Eitel, A., Scheiter, K., & Schüler, A. (2013). How inspecting a picture affects processing of text in multimedia learning. *Applied Cognitive Psychology*, 27(4), 451-461.
- Emmler, P., Frankenberg, T., Hausfeld, R., Kläßen, D., Peters, J., Ratermann, M., Schmalz, R., Schulenberg, W., Stoppel, F., Toben, B. (2014). In: R. Hausfeld & W. Schulenberg (Hrsg.), *BIOskop. Einführungsphase S II. Nordrhein-Westfalen*. Braunschweig: Westermann.
- Eppler, M. J., & Mengis, J. (2004). The concept of information overload: A review of literature from organization science, accounting, marketing, MIS, and related disciplines. *The information society*, 20(5), 325-344.
- Erning, J. (2013). *Lesekompetenzförderung im Biologieunterricht - Entwicklung und didaktische Analyse von Materialien zum Lesen von Diagrammen in der Sekundarstufe I* (Nicht veröffentlichte Masterarbeit). WWU Münster.

- Fahrmeir, L., Brachinger, W., Hamerle, A., & Tutz, G. (Hrsg.). (1996). *Multivariate statistische Verfahren*. Berlin: de Gruyter.
- Fallon, K. A., Light, J., McNaughton, D., Drager, K., & Hammer, C. (2004). The effects of direct instruction on the single-word reading skills of children who require augmentative and alternative communication. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 47*(6), 1424-1439.
- Fangmeier, T., Knauff, M., Ruff, C. C., & Sloutsky, V. (2006). fMRI evidence for a three-stage model of deductive reasoning. *Journal of Cognitive Neuroscience, 18*(3), 320-334.
- Fausset, C. B. (2008). *On processing line graphs: understanding aging and the role of spatial and verbal resources* (Dissertation). Atlanta, GA: Georgia Institute of Technology. Abgerufen von https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/24605/fausset_cara_b_200808_mast.pdf?sequence=1&isAllowed=y, letzter Zugriff: 19.07.2019.
- Feeney, A., Hola, A. K., Liversedge, S. P., Findlay, J. M., & Metcalfe, R. (2000). How people extract information from graphs: Evidence from a sentence-graph verification paradigm. In M. Anderson, P. Cheng, & V. Haarslev (Hrsg.), *International Conference on Theory and Application of Diagrams* (S. 149-161). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Feeney, A., & Webber, L. (2003). Analogical representation and graph comprehension. In A. Butz, A. Krüger, & P. Olivier (Hrsg.), *International Symposium on Smart Graphics* (S. 212-221). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Felbrich, A. (2005). *Kontrastierungen als effektive Lerngelegenheiten zur Vermittlung von Wissen über Repräsentationsformen am Beispiel des Graphen einer linearen Funktion*. Berlin: Technische Universität Berlin.
- Ferry, B. (1997). *Interpreting graphs and tables with cognitive tools* (Dissertation). University of Wollongong. Abgerufen von <https://ro.uow.edu.au/cgi/view-content.cgi?filename=0&article=2780&context=theses&type=additional>, letzter Zugriff: 19.07.2019.
- Fiedler, D. (2018). *Relevance of Threshold Concepts for Understanding Evolution* (Dissertation). Kiel: Christian-Albrechts Universität zu Kiel.
- Fiedler, D., Tröbst, S., & Harms, U. (2017). University students' conceptual knowledge of randomness and probability in the contexts of evolution and mathematics. *CBE—Life Sciences Education, 16*(2), ar38.
- Field, A., Miles, J., & Field, Z., (2012). *Discovering statistics using R*. Los Angeles: Sage.

- Flach, P., & Kakas, A. C. (2000). Abductive and Inductive Reasoning: Background and Issues. In P. Flach and A. Kakas (Hrsg.), *Abduction and Induction: Essays on their Relation and Integration* (S. 1-27). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Freedman, E. G., & Shah, P. (2002). Toward a model of knowledge-based graph comprehension. In M. Hegarty, B. Meyer, & N. H. Narayanan (Hrsg.), *International Conference on Theory and Application of Diagrams* (S. 18-30). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Frensch, P. A., & Funke, J. (2014). *Complex problem solving: The European perspective*. Hove, Sussex: Psychology Press.
- Friedrich, H. F. (2009). Lernen mit Texten. In R. Plötzner, T. Leuders, & A. Wichert (Hrsg.), *Lernchance Computer: Strategien für das Lernen mit digitalen Medienverbänden* (S. 21-43). Münster: Waxmann.
- Friedrich, H. F., & Mandl, H. (1992). *Lern- und Denkstrategien – ein Problemaufriß*. In H. Mandl, & H. F. Friedrich (Hrsg.), *Lern- und Denkstrategien. Analyse und Intervention* (S. 3-54). Göttingen: Hogrefe.
- Friedrich, H. F., & Mandl, H. (2006). *Lernstrategien: Zur Strukturierung des Forschungsfeldes*. In H. Mandl & H. F. Friedrich (Hrsg.), *Handbuch Lernstrategien* (S. 1.-23). Göttingen: Hogrefe.
- Friel, S. N., Curcio, F. R., & Bright, G. W. (2001). Making sense of graphs: Critical factors influencing comprehension and instructional implications. *Journal for Research in mathematics Education*, 32(2), 124-158.
- Fromm, S. (2012). *Datenanalyse mit SPSS für Fortgeschrittene 2: Multivariate Verfahren für Querschnittsdaten* (Bd. 2). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Funke, J. (2003). *Problemlösendes Denken*. In H. Heuer, F. Rösler, W. Tack (Hrsg.), *Standards Psychologie*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Gärtner, P. (2014). *Beschreiben und Erklären von Liniendiagrammen im Biologieunterricht: eine empirische Untersuchung in der Einführungsphase der Sekundarstufe II* (Nicht veröffentlichte Masterarbeit). WWU Münster.
- Gal, I. (2002). Adults' statistical literacy: Meanings, components, responsibilities. *International statistical review*, 70(1), 1-25.
- Galesic, M., & Garcia-Retamero, R. (2011). Graph literacy: A cross-cultural comparison. *Medical Decision Making*, 31(3), 444-457.

Ganser, M., & Hammann, M. (2009). Hypothesen verändern können. Aufgaben zum Umgang mit unerwarteten Daten im Kontext historischer Experimente. *Praxis der Naturwissenschaften - Biologie in der Schule*, 58(3), 39-43.

Garcia, G. G., & Cox, R. (2010). "Graph-as-Picture" Misconceptions in Young Students. In A. K. Goel, M. Jamnik, & N. H. Narayanan (Hrsg.), *Diagrammatic representation and inference* (S. 310-312). Berlin, Heidelberg: Springer.

Garvin-Doxas, K., & Klymkowsky, M. W. (2008). Understanding randomness and its impact on student learning: lessons learned from building the Biology Concept Inventory (BCI). *CBE—Life Sciences Education*, 7(2), 227-233.

Gattis, M. (2002). Structure mapping in spatial reasoning. *Cognitive Development*, 17(2), 1157-1183.

Gattis, M., & Holyoak, K. J. (1996). Mapping conceptual to spatial relations in visual reasoning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 22(1), 231-239.

Gebhard, U., & Oschatz, K. (2019). Bildung im Biologieunterricht: Intuitionen als Chance zur Transformation von Selbst-, Welt- und Menschenbildern. In J. Groß, M. Hammann, P. Schmiemann, J. Zabel (Hrsg.), *Biologiedidaktische Forschung: Erträge für die Praxis* (S. 21 – 37). Berlin: Springer Spektrum.

Geig, P., & Rubba, P. (1993). Translation of representations of the structure and the relationship to reasoning, gender, spatial reasoning, and specific prior knowledge. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(8), 883–903.

Geise, S., & Rössler, P. (2012). Visuelle Inhaltsanalyse: Ein Vorschlag zur theoretischen Dimensionierung der Erfassung von Bildinhalten. *m&k Medien & Kommunikationswissenschaft*, 60(3), 341-361.

Geise, S., & Rössler, P. (2013). Standardisierte Bildinhaltsanalyse. In W. Möhring, & D. Shlütz (Hrsg.), *Handbuch standardisierte Erhebungsverfahren in der Kommunikationswissenschaft* (S. 307-326). Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Gerjets, P., Scheiter, K., & Catrambone, R. (2004). Designing instructional examples to reduce intrinsic cognitive load: Molar versus modular presentation of solution procedures. *Instructional Science*, 32(1-2), 33-58.

Gerjets, P., Scheiter, K., & Catrambone, R. (2006). Can learning from molar and modular worked examples be enhanced by providing instructional explanations and prompting self-explanations? *Learning and Instruction*, 16(2), 104-121.

- Gerjets, P., Scheiter, K., Opfermann, M., Hesse, F. W., & Eysink, T. H. (2009). Learning with hypermedia: The influence of representational formats and different levels of learner control on performance and learning behavior. *Computers in Human Behavior*, 25(2), 360-370.
- Gil, E., & Ben-Zvi, D. (2011). Explanations and context in the emergence of students' informal inferential reasoning. *Mathematical Thinking and Learning*, 13(1-2), 87-108.
- Gilbert, J. K., & Treagust, D. F. (2009). Introduction: Macro, submicro and symbolic representations and the relationship between them: Key models in chemical education. In J. K. Gilbert & D. Treagust (Hrsg.), *Multiple Representations in Chemical Education* (S. 1-8). Dordrecht: Springer.
- Glazer, N. (2011). Challenges with graph interpretation: A review of the literature. *Studies in Science Education*, 47(2), 183-210.
- Goetz, E. T., Schallert, D. L., Reynolds, R. E., & Radin, D. I. (1983). Reading in perspective: What real cops and pretend burglars look for in a story. *Journal of Educational Psychology*, 75(4), 500-510.
- Gogolin, I., Lange, I., Michel, U., & Reich, H. H. (Hrsg.). (2013). *Herausforderung Bildungssprache- und wie man sie meistert*. Münster: Waxmann.
- Gott, R., & Duggan, S. (2007). A framework for practical work in science and scientific literacy through argumentation. *Research in Science & Technological Education*, 25(3), 271-291.
- Gott, R., & Roberts, R. (2008). Concepts of evidence and their role in open-ended practical investigations and scientific literacy; background to published papers. *The School of Education, Durham University, UK*. Abgerufen von https://www.dur.ac.uk/resources/education/research/res_rep_short_master_final.pdf, letzter Zugriff: 19.07.2019.
- Gottschling, V. (2006). Visual imagery, mental models, and reasoning. *Advances in Psychology*, 138, 211-235.
- Graesser, A. C., Baggett, W., & Williams, K. (1996). Question-driven explanatory reasoning. *Applied Cognitive Psychology*, 10(7), 17-31.
- Graesser, A. C., Lu, S., Olde, B. A., Cooper-Pye, E., & Whitten, S. (2005). Question asking and eye tracking during cognitive disequilibrium: Comprehending illustrated texts on devices when the devices break down. *Memory & Cognition*, 33(7), 1235-1247.

- Graesser, A. C., & Olde, B. A. (2003). How does one know whether a person understands a device? The quality of the questions the person asks when the device breaks down. *Journal of Educational Psychology*, 95(3), 524-536.
- Gravemeijer, K. P. E. (2001). Fostering a dialectic relation between theory and practice. In J. Anghileri (Hrsg.), *Principles and Practice in Arithmetic Teaching: Innovative approaches for the primary classroom* (S. 147-161). Philadelphia: Open University Press.
- Gravemeijer, K. P. E. (2007). Emergent modelling as a precursor to mathematical modelling. In W. Blum, P. L. Galbraith, HW. Henn, & M. Niss (Hrsg.), *Modelling and applications in mathematics education* (S. 137-144). Boston, MA: Springer.
- Gravemeijer, K. P. E., & Cobb, P. (2006). Design research from a learning design perspective. In J. Van den Akker, K. P. E. Gravemeijer, S. McKenney, & N. Nieveen (Hrsg.), *Educational design research* (S. 29-63). London: Routledge.
- Greca, I. M., & Moreira, M. A. (2002). Mental, physical, and mathematical models in the teaching and learning of physics. *Science education*, 86(1), 106-121.
- Greenberg, R. A. (2014). *Graph Comprehension: Difficulties, Individual Differences, and Instruction* (Dissertation). Michigan: University of Michigan.
- Greve, W., & Wentura, D. (1997). *Wissenschaftliche Beobachtung: Eine Einführung*. Weinheim: Psychologie Verlags Union.
- Griffard, P. B. (2013). Deconstructing and decoding complex process diagrams in university biology. In D. F. Treagust & C. Y. Tsui (Hrsg.), *Multiple representations in biological education* (S. 164–184). Dordrecht: Springer.
- Gurlitt, J., & Renkl, A. (2008). Are high-coherent concept maps better for prior knowledge activation? Differential effects of concept mapping tasks on high school vs. university students. *Journal of Computer Assisted Learning*, 24(5), 407-419.
- Guthrie, J. T., Weber, S., & Kimmerly, N. (1993). Searching documents: Cognitive processes and deficits in understanding graphs, tables, and illustrations. *Contemporary educational psychology*, 18(2), 186-221.
- Hadie, S. N., & Yusoff, M. S. (2016). Assessing the validity of the cognitive load scale in a problem-based learning setting. *Journal of Taibah University Medical Sciences*, 11(3), 194-202.
- Hadjidemetriou, C., & Williams, J. (2002). Children's graphical conceptions. *Research in Mathematics Education*, 4(1), 69-87.

- Hahn, U. (2011). The problem of circularity in evidence, argument, and explanation. *Perspectives on Psychological Science*, 6(2), 172-182.
- Hair Jr, J., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2014). *Multivariate data analysis* (7. Aufl.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.
- Halford, G. S., Baker, R., McCredden, J. E., & Bain, J. D. (2005). How many variables can humans process? *Psychological science*, 16(1), 70-76.
- Halverson, K. L., & Friedrichsen, P. (2013). Learning tree thinking: Developing a new framework of representational competence. In D. F. Treagust, & C.-Y. Tsui (Hrsg.), *Multiple representations in biological education* (S. 185-201). Dordrecht: Springer.
- Hamami, Y., & Mumma, J., (2013). Prolegomena to a cognitive investigation of Euclidean diagrammatic reasoning. *Journal of Logic, Language and Information*, 22(4), 421–448.
- Hammann, M. (2002). *Kriteriengeleitetes Vergleichen im Biologieunterricht*. Innsbruck. München: Studien-Verlag.
- Hammann, M. (2004). Kompetenzentwicklungsmodelle: Merkmale und ihre Bedeutung – dargestellt anhand von Kompetenzen beim Experimentieren. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 57(4), 196-203.
- Hammann, M. (2006). Kompetenzförderung und Aufgabenentwicklung. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 59(2), 85-95.
- Hammann, M. (2007). Das scientific discovery as dual search-modell. In D. Krüger, & H. Vogt (Hrsg.), *Theorien in der biologiedidaktischen Forschung* (S. 187-196). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Hammann, M. (2019) Organisationsebenen biologischer Systeme unterscheiden und vernetzen: Empirische Befunde und Empfehlungen für die Praxis. In J. Groß, M. Hammann, P. Schmiemann, & J. Zabel (Hrsg), *Biologiedidaktische Forschung: Perspektiven für die Praxis*. Berlin: Springer Spektrum.
- Hammann, M., & Asshoff, R. (2014). *Schülervorstellungen im Biologieunterricht. Ursachen für Lernschwierigkeiten*. Seelze: Klett Kallmeyer.
- Hammann, M., & Jördens, J. (2014). Offene Aufgaben codieren. In D. Krüger, I. Parchmann, & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 169-178). Berlin, Heidelberg: Springer.

Hammann, M., Phan, T. T. H., & Bayrhuber, H. (2007). Experimentieren als Problemlösen: Lässt sich das SDDS-Modell nutzen, um unterschiedliche Kompetenzen beim Experimentieren zu messen. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaften, Sonderheft 8*, 33-49.

Hammann, M., Phan, T. T. H., Ehmer, M., & Bayrhuber, H. (2006). Fehlerfrei experimentieren. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 59(5), 292-299.

Hammer, D. (1996). Misconceptions or p-prims: How may alternative perspectives of cognitive structure influence instructional perceptions and intentions. *The Journal of the Learning Sciences*, 5(2), 97-127.

Handwerker, B. (2008). Chunks und Konstruktionen.— Zur Integration von lerntheoretischem und grammatischem Ansatz. *Estudios Filológicos Alemanes*, 15, 49-64.

Harman, G. (1965). Inference to the best explanation. *Philosophical Review*, 74(1), 88-95.

Hart, S. G., & Staveland, L. E. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. *Advances in psychology*, 52, 139-183.

Hartmann, T., & Reinecke, L. (2013). Skalenkonstruktion in der Kommunikationswissenschaft. In W. Möhring & D. Schlütz (Hrsg.), *Handbuch standardisierte Erhebungsmethoden der Kommunikationswissenschaft* (S. 41-60). Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Hattie, J. (2009). *Visible Learning*. London: Routledge.

Havlicek, L. L., & Peterson, N. L. (1974). Robustness of the t test: A guide for researchers on effect of violations of assumptions. *Psychological Reports*, 34(3_suppl), 1095-1114.

Hawlitschek, A. (2013). *Spielend lernen. Didaktisches Design digitaler Lernspiele zwischen Spielmotivation und Cognitive Load* (Bd. 20). Berlin: Logos.

Hector, U., Walory, M., Westendorf-Bröring, E. (2014). In M. Walory & E. Westendorf-Bröring (Hrsg.), *Biologie heute S II. Nordrhein-Westfalen: Einführungsphase*. Braunschweig: Schroedel.

Hegarty, M. (2005). Multimedia learning about physical systems. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (S. 447-465). New York, NY: Cambridge University Press.

- Hegarty, M. (2011). The cognitive science of visual-spatial displays: Implications for design. *Topics in cognitive science*, 3(3), 446-474.
- Heinrich, P. C., Müller, M., & Graeve, L. (Hrsg.). (2014). *Löffler/Petrides Biochemie und Pathobiochemie*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Helms, C. (2017). *Entwicklung und Evaluation eines Trainings zur Verbesserung der Erklärqualität von Schülerinnen und Schülern im Gruppenpuzzle* (Bd. 219). Berlin: Logos.
- Hölting (2013). *Modul: Diagramme beschreiben und auswerten*. In H. Bayrhuber & M. Hammann (Hrsg.). *Linder Biologie. Abi-Aufgabentrainer. Wissen anwenden und Kompetenzen einüben* (S. 28-33). Braunschweig: Schroedel.
- Holling, H., & Gediga, G. (2010). *Statistik-Deskriptive Verfahren*. Göttingen: Hogrefe.
- Höst, G. E., & Anward, J. (2017). Intentions and actions in molecular self-assembly: perspectives on students' language use. *International Journal of Science Education*, 39(6), 627-644.
- Hoffmann, M. (1999). Problems with Peirce's concept of abduction. *Foundations of science*, 4(3), 271-305.
- Hoffmann, M. H., & Roth, W. M. (2005). What you should know to survive in knowledge societies: On a semiotic understanding of 'knowledge'. *Semiotica*, 157, 105-142.
- Hoffmann, M. H., & Roth, W. M. (2007). The complementarity of a representational and an epistemological function of signs in scientific activity. *Semiotica*, 164, 101-121.
- Hofmann, R., & Roth, J. (2018). *Von der Situation zum Graph und umgekehrt - Hindernisse und Schülervorstellungen*. In P. Bender (Hrsg.), *Beiträge zum Mathematikunterricht 2018* (S. 819-822). Münster: WTM.
- Horn, J. L. (1965). A rationale and test for the number of factors in factor analysis. *Psychometrika*, 30(2), 179-185.
- Hu, L. T., & Bentler, P. M. (1999). Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: Conventional criteria versus new alternatives. *Structural equation modeling: a multidisciplinary journal*, 6(1), 1-55.
- Huang, W. (2014). Evaluating overall quality of graph visualizations indirectly and directly. In W. Huang (Hrsg.), *Handbook of Human Centric Visualization* (S. 373–390). New York, NY: Springer.

- Huang, W., Eades, P., & Hong, S. H. (2009). Measuring effectiveness of graph visualizations: A cognitive load perspective. *Information Visualization*, 8(3), 139-152.
- Hutcheson, G., & Sofroniou, N. (1999). *The multivariate social scientist*. London: Sage.
- Hwang, M. I., & Wu, B. J. (1991). The effectiveness of computer graphics for decision support: meta-analytical integration of research findings. *ACM SIGMIS Database: the DATABASE for Advances in Information Systems*, 21(2-3), 11-20.
- Inderelst, J. (2014). *Diagramme beschreiben und erklären – Evaluation eines Methodentrainings im Biologieunterricht in der Sekundarstufe I* (Nicht veröffentlichte Masterarbeit). WWU Münster.
- Jackson, M. B. (2006). *Molecular and cellular biophysics*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jahnke, L., & Lumer, J. (2014). Heilpflanzen in der Schule – Teil 4. Johanniskraut und Depressionen – Einblicke in die Forschung. *Zeitschrift für Phytotherapie*, 35(5), 219–223.
- Jahnke, L., & Lumer, J. (2015). Was macht das Ebola-Virus so gefährlich? *PdN Biologie in der Schule*, 64(6), 34–39.
- Jahnke, L., Lumer, J., & Hammann, M. (2015, 23.02.-26.02.2015). *Förderung des Beschreibens und Erklärens von Liniendiagrammen im Biologieunterricht*. Paper presented at the 17. Frühjahrsschule der Fachsektion Didaktik der Biologie, München. Abgerufen von https://www.vbio.de/fileadmin/user_upload/fachgesellschaften/pdf/FDdB/Fruehere_FJS/FJS_2015_Muenchen.pdf, 30 -31, letzter Zugriff: 19.07.2019.
- Janssen, J., & Laatz, W. (2017). *Statistische Datenanalyse mit SPSS: eine anwendungsorientierte Einführung in das Basissystem und das Modul Exakte Tests* (9. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Janvier, C. (1978). *The interpretation of complex cartesian graphs representing situations - studies and teaching experiments* (Dissertation). Nottingham: University of Nottingham.
- Janvier, C. (1981). Use of situations in mathematics education. *Educational Studies in Mathematics*, 12(1), 113-122.
- Janvier, C. (1987). Translation processes in mathematics education. In C. Janvier (Hrsg.), *Problems of representation in the teaching and learning of mathematics* (S. 27-32). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.

- Janvier, C. (1998). The notion of chronicle as an epistemological obstacle to the concept of function. *The Journal of Mathematical Behavior*, 17(1), 79-103.
- Jarvenpaa, S. L. (1989). The effect of task demands and graphical format on information processing strategies. *Management Science*, 35(3), 285-303.
- Jarvenpaa, S. L., & Dickson, G. W. (1988). Graphics and managerial decision making: Research-based guidelines. *Communications of the ACM*, 31(6), 764-774.
- Johnson-Laird, P. N. (1980). Mental models in cognitive science. *Cognitive science*, 4(1), 71-115.
- Johnson-Laird, P. N. (1981). Comprehension as the construction of mental models. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 295(1077), 353-374.
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models: Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness* (No. 6). Cambridge: Harvard University Press.
- Johnson-Laird, P. N. (2013). Mental models and cognitive change. *Journal of Cognitive Psychology*, 25(2), 131-138.
- Johnson-Laird, P. N., & Byrne, R. M. (1991). *Deduction*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Jördens, J., Asshoff, R., Kullmann, H., & Hammann, M. (2016). Providing vertical coherence in explanations and promoting reasoning across levels of biological organization when teaching evolution. *International Journal of Science Education*, 38(6), 960-992.
- Jördens, J., Asshoff, R., Kullmann, H., & Hammann, M. (2018). Interrelating concepts from genetics and evolution: why are cod shrinking? *The American Biology Teacher*, 80(2), 132-138.
- Josephson, J. (2000). Smart Inductive Generalisations are Abductions. In Flach, P., & Kakas, A. (Hrsg.), *Abduction and Induction: Essays on their Relation and Integration* (S. 31-44). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Justi, R. (2002). Teaching and Learning Chemical Kinetics. In J. K. Gilbert, O. D. Jong, R. Justi, D. F. Treagust & J. H. Van Driel (Hrsg.), *Chemical Education: Towards Research-Based Practice* (S. 293-315). Dordrecht: Kluwer.
- Kahneman, D. (2011). *Thinking, fast and slow*. New York, NY: Farrar, Straus and Giroux.

- Kalyuga, S. (1998). *Studies in split-attention and redundancy* (Dissertation). Sydney: University of New South Wales.
- Kalyuga, S. (2010). Schema acquisition and sources of cognitive load. In J. Plass, R. Moreno, & R. Brünken (Hrsg.), *Cognitive load theory* (S. 48–64). New York, NY: Cambridge University Press.
- Kalyuga, S. (2011). Cognitive load theory: How many types of load does it really need? *Educational Psychology Review*, 23(1), 1-19.
- Kalyuga, S., Ayres, P., Chandler, P., & Sweller, J. (2003). The expertise reversal effect. *Educational Psychologist*, 38(1), 23-31.
- Kalyuga, S., Chandler, P., & Sweller, J. (1998). Levels of expertise and instructional design. *Human factors*, 40(1), 1-17.
- Kalyuga, S., Chandler, P., & Sweller, J. (1999). Managing split-attention and redundancy in multimedia instruction. *Applied Cognitive Psychology: The Official Journal of the Society for Applied Research in Memory and Cognition*, 13(4), 351-371.
- Kanari, Z., & Millar, R. (2004). Reasoning from data: How students collect and interpret data in science investigations. *Journal of Research in Science Teaching*, 41(7), 748-769.
- Karsai, I., & Kampis, G. (2010). The crossroads between biology and mathematics: The scientific method as the basics of scientific literacy. *BioScience*, 60(8), 632-638.
- Kattmann, U. (2008). Diagramme. In H. Gropengießer, & U. Kattmann (Hrsg.), *Fachdidaktik Biologie. Die Biologiedidaktik begründet von Dieter Eschenhagen, Ulrich Kattmann und Dieter Rodi* (8. Aufl, S. 340-357). Köln: Aulis.
- Katz, I. R., Xi, X., Kim, H.-J., & Cheng, P. C. H. (2002). Graph Structure Supports Graph Description. In W. Gray & C. Schunn (Hrsg.), *Proceedings of the Twenty Fourth Annual Conference of the Cognitive Science Society* (S. 530-535). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Katz, I. R., Xi, X., Kim, H. J., & Cheng, P. C. H. (2004). Elicited Speech From Graph Items on the Test of Spoken English™. *ETS Research Report Series*, 1, i-31.
- Keller, S. K. (2008). *Levels of line graph question interpretation with intermediate elementary students of varying scientific and mathematical knowledge and ability: A think aloud study* (Dissertation). University of Central Florida Orlando, Florida.

- Kemp, M. (2005). *Developing critical numeracy at the tertiary level* (Dissertation). Murdoch University.
- Kemp, M., & Kissane, B. (2010) *A five step framework for interpreting tables and graphs in their contexts*. 8th International Conference on Teaching Statistics (11 - 16 July 2010). Ljubljana, Slovenia. Abgerufen von https://researchrepository.murdoch.edu.au/id/eprint/6240/1/five_step_framework.pdf, letzter Zugriff: 19.07.2019.
- Kerslake, D. (1977). The understanding of graphs. *Mathematics in school*, 6(2), 22-25.
- Kerslake, D. (1981). Graphs. In K. M. Hart (Hrsg.), *Children's understanding of mathematics* 11-16 (S. 120-136). London: John Murray.
- King, A. (1989). Effects of self-questioning training on college students' comprehension of lectures. *Contemporary Educational Psychology*, 14(4), 366-381.
- King, A. (1992). Facilitating elaborative learning through guided student-generated questioning. *Educational Psychologist*, 27(1), 111-126.
- King, A. (1994). Guiding knowledge construction in the classroom: Effects of teaching children how to question and how to explain. *American educational research journal*, 31(2), 338-368.
- King, A. (2007). Beyond literal comprehension: A strategy to promote deep understanding of text. In D. S. McNamara (Hrsg.), *Reading comprehension strategies: Theories, interventions, and technologies* (S. 267–290). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Kintsch, W. (1988). The role of knowledge in discourse comprehension: A construction-integration model. *Psychological review*, 95(2), 163-182.
- Kintsch, W. (1998). *Comprehension: A paradigm for cognition*. Cambridge: Cambridge university press.
- Kintsch, W. (2004). The construction-integration model of text comprehension and its implications for instruction. In R. B. Ruddell & N. J. Unrau (Hrsg.), *Theoretical models and processes of reading* (S. 1270-1328). Newark, DE: International Reading Association.
- Kintsch, W., & van Dijk, T. A. (1978). Toward a model of text comprehension and production. *Psychological review*, 85(5), 363-394.
- Klahr, D. (2000). *Exploring Science: The Cognition and Development of Discovery Processes*. Cambridge: MIT Press.

Klahr, D., & Dunbar, K. (1988). Dual space search during scientific reasoning. *Cognitive science*, *12*(1), 1-48.

Klahr, D., & Nigam, M. (2004). The equivalence of learning paths in early science instruction: Effects of direct instruction and discovery learning. *Psychological science*, *15*(10), 661-667.

KMK. (2005). *Bildungsstandards im Fach Biologie für den mittleren Bildungsabschluss*. Neuwied: Luchterhand. Abgerufen von https://www.kmk.org/fileadmin/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Biologie.pdf, letzter Zugriff 05.05.2019.

KMK (2013). Operatoren für die naturwissenschaftlichen Fächer (Physik, Biologie, Chemie) an den Deutschen Schulen im Ausland (Stand Februar 2013). Vereinbarung zur Gestaltung der gymnasialen Oberstufe und der Abiturprüfung. Abgerufen von <https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/pdf/Bildung/Auslandsschulwesen/Kerncurriculum/Auslandsschulwesen-Operatoren-Naturwissenschaften-02-2013.pdf>, letzter Zugriff 05.05.2019.

Knauff, M. (2006). Deduktion und logisches Denken. In J. Funke (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie Band C/II/8 Denken und Problemlösen*. Abgerufen von http://www.psychologie.uni-heidelberg.de/ae/allg/enzykl_denken/Enz_04_Deduktion.pdf, letzter Zugriff: 19.07.2019.

Knauff, M. (2007). How our brains reason logically. *Topoi*, *26*(1), 19-36.

Knauff, M. (2009). A neuro-cognitive theory of deductive relational reasoning with mental models and visual images. *Spatial Cognition & Computation*, *9*(2), 109-137.

Knauff, M. (2013). *Space to Reason: A Spatial Theory of Human Thought*. Cambridge: MIT Press.

Knauff, M., Fangmeier, T., Ruff, C. C., & Johnson-Laird, P. N. (2003). Reasoning, models, and images: behavioral measures and cortical activity. *Journal of cognitive neuroscience*, *15*(4), 559-573.

Knauff, M., & Johnson-Laird, P. N. (2002). Visual imagery can impede reasoning. *Memory & cognition*, *30*(3), 363-371.

Knauff, M., & May, E. (2006). Mental imagery, reasoning, and blindness. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *59*(1), 161-177.

- Knippels, M. C. P. J. (2002). *Coping with the abstract and complex nature of genetics in biology education: The yo-yo learning and teaching strategy* (Dissertation). Utrecht University.
- Knippels, M. C., & Waarlo, A. (2018). Development, Uptake, and Wider Applicability of the Yo-yo Strategy in Biology Education Research: A Reappraisal. *Education Sciences*, 8(3), 129. <https://doi.org/10.3390/educsci8030129>
- Knippels, M. C. P., Waarlo, A. J., & Boersma, K. T. (2005). Design criteria for learning and teaching genetics. *Journal of Biological Education*, 39(3), 108-112.
- Knöner, S. (2017). *Cognitive Biases beim Umgang mit Daten im Biologieunterricht*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Koedinger, K. R., & Anderson, J. R. (1990). Abstract planning and perceptual chunks: Elements of expertise in geometry. *Cognitive Science*, 14(4), 511-550.
- Köster, J., & Rosebrock, C. (2009). Lesen–mit Texten und Medien umgehen. In A. Bremerich-Vos, D. Granzer, U. Behrens, & O. Köller (Hrsg.), *Lehrerbücherei Grundschule: Bildungsstandards für die Grundschule: Deutsch konkret* (S. 104-138). Berlin: Cornelsen.
- Koslowski, B. (1996). *Theory and evidence: The development of scientific reasoning*. Cambridge: MIT Press.
- Kosslyn, S. M. (1973). Scanning visual images: Some structural implications. *Perception & Psychophysics*, 14(1), 90-94.
- Kosslyn, S. M. (1980). *Image and mind*. Cambridge: Harvard University Press.
- Kosslyn, S. M. (1985). Graphics and human information processing: A review of five books. *Journal of the American Statistical Association*, 80(391), 499-512.
- Kosslyn, S. M. (1989). Understanding charts and graphs. *Applied cognitive psychology*, 3(3), 185-225.
- Kosslyn, S. M. (1994). *Image and brain*. Cambridge: MIT Press.
- Kosslyn, S. M. (2006). *Graph design for the eye and mind*. New York, NY: Oxford University Press.
- Kosslyn, S. M., Ball, T. M., & Reiser, B. J. (1978). Visual images preserve metric spatial information: evidence from studies of image scanning. *Journal of experimental psychology: Human perception and performance*, 4(1), 47-60.
- Kosslyn, S. M., & Pomerantz, J. R. (1977). Imagery, propositions, and the form of internal representations. *Cognitive psychology*, 9(1), 52-76.

- Kozma, R., & Russell, J. (2005). Students becoming chemists: Developing representational competence. In J. K. Gilbert (Hrsg.), *Visualization in science education* (S. 121–146). Dordrecht: Springer.
- Kragten, M., Admiraal, W., & Rijlaarsdam, G. (2015). Students' ability to solve process-diagram problems in secondary biology education. *Journal of Biological Education*, 49(1), 91-103.
- Krause, U. M., & Stark, R. (2006). Vorwissen aktivieren. In H. Mandl, & H. F. Friedrich (Hrsg.), *Handbuch Lernstrategien* (S. 38-49). Göttingen: Hofgrefe.
- Kriz, S., & Hegarty, M. (2007). Top-down and bottom-up influences on learning from animations. *International Journal of Human-Computer Studies*, 65(11), 911-930.
- Krüger, D., & Riemeier, T. (2014). Die qualitative Inhaltsanalyse - eine Methode zur Auswertung von Interviews. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 133-146). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Kuckartz, U., Rädiker, S., Ebert, T., & Schehl, J. (2013). *Statistik: eine verständliche Einführung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Kuhnke, K. (2013). *Vorgehensweisen von Grundschulkindern beim Darstellungswechsel: Eine Untersuchung am Beispiel der Multiplikation im 2. Schuljahr* (Bd. 10). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Kulhavy, R. W., Stock, W. A., & Caterino, L. C. (1994). Reference maps as a framework for remembering text. *Advances in psychology*, 108, 153-162.
- Kunze, I. (2005). „Das steht doch aber gar nicht im Text!“ Zum Umgang mit Sachtexten in allen Fächern. In E. Gläser, & G. Franke-Zöllmer (Hrsg.), *Lesekompetenz fördern von Anfang an. Didaktische und methodische Anregungen zur Leseförderung* (S. 80-89). Baltmannsweiler: Schneider Verlag Hohengehren.
- Kuriyan, J., Konforti, B., & Wemmer, D. (2012). *The molecules of life: Physical and chemical principles*. New York, NY: Garland Science.
- Kurt, H., Ekici, G., Aktas, M., & Aksu, Ö. (2013). Determining Biology Student Teachers' Cognitive Structure on the Concept of " Diffusion" through the Free Word-Association Test and the Drawing-Writing Technique. *International Education Studies*, 6(9), 187-206.
- Lachmayer, S. (2008). *Entwicklung und Überprüfung eines Strukturmodells der Diagrammkompetenz für den Biologieunterricht* (Dissertation). Kiel: Christian-Albrechts Universität Kiel.

- Lachmayer, S., Nerdel, C., & Prechtel, H. (2007). Modellierung kognitiver Fähigkeiten beim Umgang mit Diagrammen im naturwissenschaftlichen Unterricht Modelling of cognitive abilities regarding the handling of graphs in science education. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 13, 145-160.
- Lai, K., Cabrera, J., Vitale, J. M., Madhok, J., Tinker, R., & Linn, M. C. (2016). Measuring graph comprehension, critique, and construction in science. *Journal of Science Education and Technology*, 25(4), 665-681.
- Langer, E. J. (1984). Playing the middle against both ends: The influence of adult cognitive activity as a model for cognitive activity in childhood and old age. In S. R. Yussen (Hrsg.), *The development of reflection* (S. 605-635). New York, NY: Academic Press.
- Langer, E. J. (1989). Minding matters: The consequences of mindlessness–mindfulness. *Advances in experimental social psychology*, 22, 137-173.
- Larkin, J. H., & Simon, H. A. (1987). Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words. *Cognitive science*, 11(1), 65-100.
- Lau, K. C. V. (2013). Seeing & Feeling How Enzymes Work Using Tangible Models. *The american biology Teacher*, 75(7), 499-501.
- Lave, J., & Wenger, E. (1991). *Situated learning: legitimate peripheral participation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lazarsfeld, P. F. (1937). Some remarks on the typological procedures in social research. *Zeitschrift für Sozialforschung*, 6(1), 119-139.
- Lee, H., Plass, J. L., & Homer, B. D. (2006). Optimizing cognitive load for learning from computer-based science simulations. *Journal of educational psychology*, 98(4), 902-913.
- Legare, C. H. (2012). Exploring explanation: Explaining inconsistent evidence informs exploratory, hypothesis-testing behavior in young children. *Child development*, 83(1), 173-185.
- Lehmkuhl, A. (2012). *Die Entwicklung eines praxisorientierten Trainings zur Förderung der Diagrammlesekompetenz für den Biologieunterricht der Sekundarstufe II* (Nicht veröffentlichte Masterarbeit). WWU Münster
- Leinhardt, G., Zaslavsky, O., & Stein, M. K. (1990). Functions, graphs, and graphing: Tasks, learning, and teaching. *Review of Educational Research*, 60(1), 1–64.
- Leisen, J. (2005). Wechsel der Darstellungsformen. Ein Unterrichtsprinzip für alle Fächer. *Der Fremdsprachliche Unterricht Englisch*, 78, 9-11.

- Lenhard, W., & Lenhard, A. (2016). *Calculation of Effect Sizes*. Dettelbach (Germany): Psychometrica. Abgerufen von https://www.psychometrica.de/effect_size.html, letzter Zugriff: 19.07.2019.
- Leopold, C. (2009). *Lernstrategien und Textverstehen* (Bd. 76). Münster: Waxmann.
- Leopold, C., & Mayer, R. E. (2015). An imagination effect in learning from scientific text. *Journal of Educational Psychology*, *107*(1), 47-63.
- Leppink, J., Paas, F., van der Vleuten, C. P., van Gog, T., & van Merriënboer, J. J. (2013). Development of an instrument for measuring different types of cognitive load. *Behavior research methods*, *45*(4), 1058-1072.
- Leppink, J., Paas, F., van Gog, T., van der Vleuten, C. P., & Van Merrienboer, J. J. (2014). Effects of pairs of problems and examples on task performance and different types of cognitive load. *Learning and Instruction*, *30*, 32-42.
- Lesgold, A., Rubinson, H., Feltovich, P., Glaser, R., Klopfer, D., & Wang, Y. (1988). Expertise in a complex skill: Diagnosing x-ray pictures. In M. T. H. Chi, R. Glaser, & M. J. Farr (Hrsg.), *The nature of expertise* (S. 311-342). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Lesh, R., & Doerr, H. M. (2003). Foundations of a models and modeling perspective on mathematics teaching, learning, and problem solving. In R. Lesh & H. M. Doerr (Hrsg.), *Beyond constructivism: Models and modeling perspectives on mathematics problem solving, learning, and teaching* (S. 3-33). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Lesh, R., Post, T. R., & Behr, M. (1987). Representations and translations among representations in mathematics learning and problem solving. In C. Janvier (Hrsg.), *Problems of representations in the teaching and learning of mathematics* (S. 33-40). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Leuders, T., & Philipp, K. (2014): Entdeckungskompetenzen verstehen, erfassen und fördern-Mathematikaufgaben für entdeckendes Lernen. Aufgabenentwicklung zwischen fachdidaktischer Entwicklungsforschung und empirischer Lehr-Lernforschung. In B. Ralle, S. Prediger, M. Hammann & M. Rothgangel (Hrsg.). *Lernaufgaben entwickeln, bearbeiten und überprüfen—Ergebnisse und Perspektiven der fachdidaktischen Forschung* (S. 149-158). Münster: Waxmann.
- Leutner, D., Leopold, C., & Sumfleth, E. (2009). Cognitive load and science text comprehension: Effects of drawing and mentally imagining text content. *Computers in Human Behavior*, *25*(2), 284-289.

- Levin, A., & Arnold, K. H. (2008). Fragen stellen, um Antworten zu erhalten–oder Fragen generieren, um zu lernen? *Zeitschrift für pädagogische Psychologie*, 22(2), 135-142.
- Li, X. (2006): *Cognitive Analysis of Student's Errors and Misconceptions in Variables, Equations, and Functions* (Dissertation). Texas A&M University.
- Lichti, M. (2018). *Funktionales Denken fördern: Experimentieren mit gegenständlichen Materialien oder Computer-Simulationen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Lienert, G. A., & Raatz, U. (1998). *Testaufbau und Testanalyse* (6. Aufl). Weinheim: Beltz Psychologie Verlags Union.
- Linenberger, K. J., & Bretz, S. L. (2012). Generating cognitive dissonance in student interviews through multiple representations. *Chemistry education research and practice*, 13(3), 172-178.
- Linenberger, K. J., & Bretz, S. L. (2014). Biochemistry students' ideas about shape and charge in enzyme–substrate interactions. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 42(3), 203-212.
- Linenberger, K. J., & Bretz, S. L. (2015): Biochemistry students' ideas about how an enzyme interacts with a substrate. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 43(4), 213–222.
- Lingnau, V., Steinmann, J. C., & Koffler, U. (2013). Implikationen der Cognitive Load Theory für das Controlling. Beiträge zur Controlling-Forschung, 22. Lehrstuhl für Unternehmensrechnung und Controlling. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern.
- Lipton, P. (2001). “What good is an explanation?”. In G. Hon, & S. S. Rakover (Hrsg.), *Explanation* (S. 43-59). Dordrecht: Springer.
- Lipton, P. (2004). *Inference to the best explanation*. London, UK and New York, NY: Routledge.
- Liu, Z., & Stasko, J. (2010). Mental models, visual reasoning and interaction in information visualization: A top-down perspective. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 16(6), 999-1008.
- Lloyd, R. (1982). A look at images. *Annals of the Association of American Geographers*, 72(4), 532-548.
- Löffler, G., & Petrides, P. E. (1990). *Physiologische Chemie* (4. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer.

- Lohse, G. L. (1993). A cognitive model for understanding graphical perception. *Human-Computer Interaction*, 8(4), 353-388.
- Lohse, G. L. (1997). Models of graphical perception. In M. G. Helander, T. K. Landauer, & P. V. Prabhu (Hrsg.), *Handbook of Human-Computer Interaction* (S. 107-135). Amsterdam: Elsevier.
- Lombrozo, T. (2012). Explanation and abductive inference. In K. J. Holyoak & R. G. Morrison (Hrsg.), *Oxford handbook of thinking and reasoning* (S. 260–276). Oxford: Oxford University Press.
- Lord, C. G., Ross, L., & Lepper, M. R. (1979). Biased assimilation and attitude polarization: The effects of prior theories on subsequently considered evidence. *Journal of personality and social psychology*, 37(11), 2098-2109.
- Lotz, M. (2015). *Kognitive Aktivierung im Leseunterricht der Grundschule: Eine Videostudie zur Gestaltung und Qualität von Leseübungen im ersten Schuljahr*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Lowe, R. K. (1993). Constructing a mental representation from an abstract technical diagram. *Learning and Instruction*, 3(3), 157-179.
- Lumer, J. (2011). Lesestrategien trainieren im Biologieunterricht – Vermehrungszyklus des HI-Virus. *PdN Biologie in der Schule*, 60(2), 46–47.
- Lumer, J., & Bönninghausen, M. (2012). Lesestrategien in allen Fächern: Biologie. In M. Bönninghausen & K. Winter (Hrsg.), *Lesen(d) lernen! Texte besser verstehen. Ein Trainingsprogramm* (S. 101–107). Bottrop: Henselowsky Boschmann.
- Lumer, J., & Winter, K. (2019). Herausforderungen und Chancen einer sprachsensiblen Textarbeit im Biologieunterricht – ein Lehr-Lern-Konzept. In Y. Danilovich, & G. Putjata (Hrsg.), *Sprachliche Vielfalt im Unterricht* (S. 47-77). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Lumer, J., Winter, K., Dammers, E., Jahnke, L., Ohmann, B., & Weichselgärtner R. (2017). *Textarbeit in der Sekundarstufe II sprachsensibel gestalten*. In S. Oleschko (Hrsg.), *Sprachsensibles Unterrichten fördern – Angebote für den Vorbereitungsdienst* (S. 106–137). Stiftung Mercator, Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalens und die Landesweite Koordinierungsstelle Kommunale Integrationszentren (LaKi) NRW. Abgerufen von https://www.stiftung-mercator.de/media/downloads/3_Publikationen/2017/Dezember/Sprachsensibles_Unterrichten_foerdern/Buch_Sprachsensibles-Unterrichten-foerdern.pdf, letzter Zugriff: 19.07.2019.

- MacEachren, A. M. (2004). *How maps work: representation, visualization, and design*. New York, NY: Guilford Press.
- Machamer, P., Darden, L., & Craver, C. F. (2000). Thinking about mechanisms. *Philosophy of science*, 67(1), 1-25.
- Machiels-Bongaerts, M., Schmidt, H. G., & Boshuizen, H. P. (1993). Effects of mobilizing prior knowledge on information processing: Studies of free recall and allocation of study time. *British Journal of Psychology*, 84(4), 481-498.
- Magnani, L. (1992). Abductive Reasoning: Philosophical and Educational Perspectives in Medicine. In D. A. Evans and V. L. Patel (Hrsg.), *Advanced Models of Cognition for Medical Training and Practice* (S. 21-41). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Magnani, L. (2001). *Abduction, Reason, and Science. Processes of Discovery and Explanation*. New York, NY: Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- Magnani, L. (2004). Model-based and manipulative abduction in science. *Foundations of science*, 9(3), 219-247.
- Magnani, L. (2009). *Abductive cognition: The epistemological and eco-cognitive dimensions of hypothetical reasoning* (Bd. 3). New York, NY: Springer.
- Maichle, U. (1994). Cognitive processes in understanding line graphs. *Advances in psychology*, 108, 207-226.
- Makar, K., & Rubin, A. (2009). A framework for thinking about informal statistical inference. *Statistics Education Research Journal*, 8(1), 82-105.
- Maltby, J., Day, L., & Macaskill, A. (2011). *Differentielle Psychologie, Persönlichkeit und Intelligenz*. München: Pearson Studium.
- Mandl, H., Friedrich, H. F., & Hron, A. (1988). Theoretische Ansätze zum Wissenserwerb. In H. Mandl, H. Spada und H. Aebli (Hrsg.), *Wissenspsychologie* (S. 123-160). München, Weinheim: Psychologie Verlags Union.
- Mariotti, M. A. (2009). Artifacts and signs after a Vygotskian perspective: the role of the teacher. *ZDM —The International Journal on Mathematics Education*, 41(4), 427-440.
- Marsh, H. W., & Hocevar, D. (1985). Application of confirmatory factor analysis to the study of self-concept: First-and higher order factor models and their invariance across groups. *Psychological bulletin*, 97(3), 562-582.
- Marton, F., & Säljö, R. (1976). On qualitative differences in learning: I. Outcome and process. *British journal of educational psychology*, 46(1), 4-11.

- Mautone, P. D., & Mayer, R. E. (2001). Signaling as a cognitive guide in multimedia learning. *Journal of educational Psychology*, 93(2), 377-389.
- Mautone, P. D., & Mayer, R. E. (2007). Cognitive aids for guiding graph comprehension. *Journal of Educational Psychology*, 99(3), 640-652.
- Mayer, R. E. (1996). Learning strategies for making sense out of expository text: The SOI model for guiding three cognitive processes in knowledge construction. *Educational psychology review*, 8(4), 357-371.
- Mayer, R. E. (2003). Memory and information processes. In W. M. Reynolds & G. E. Miller (Hrsg.), *Handbook of psychology: Educational psychology* (Bd. 7., S. 47–57). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Mayer, R. E. (2004). Should there be a three-strikes rule against pure discovery learning? *American psychologist*, 59(1), 14-19.
- Mayer, R. E. (2005). Principles for Managing Essential Processing in Multimedia Learning: Segmenting, Pretraining, and Modality Principles. In R. E. Mayer (Hrsg.), *Cambridge handbook of multimedia learning* (S. 169 – 182). Cambridge: Cambridge University Press.
- Mayer, R. E., Bove, W., Bryman, A., Mars, R., & Tapangco, L. (1996). When less is more: Meaningful learning from visual and verbal summaries of science textbook lessons. *Journal of educational psychology*, 88(1), 64-73.
- Mayer, R. E., Griffith, E., Jurkowitz, I. T., & Rothman, D. (2008). Increased interestingness of extraneous details in a multimedia science presentation leads to decreased learning. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 14(4), 329-339.
- Mayer, R. E., & Moreno, R. (2003). Nine ways to reduce cognitive load in multimedia learning. *Educational psychologist*, 38(1), 43-52.
- Mayer, R. E., & Moreno (2010). Techniques that reduce extraneous cognitive load and manage intrinsic cognitive load during multimedia learning. In J. L. Plass, R. Moreno, & R. Brünken (Hrsg.), *Cognitive load theory* (S. 131-152). New York, NY: Cambridge University Press.
- Mayer, R. E., Steinhoff, K., Bower, G., & Mars, R. (1995). A generative theory of textbook design: Using annotated illustrations to foster meaningful learning of science text. *Educational Technology Research and Development*, 43(1), 31-41.

- Mayer, R. E., & Wittrock, M. C. (1996). Problem-solving transfer. In D. C. Berliner, & R. C. Calfee (Hrsg.), *Handbook of educational psychology* (S. 47-62). New York, NY: Routledge.
- Mayring, P. (2000). Qualitative Inhaltsanalyse. *Forum Qualitative Sozialforschung/Forum Qualitative Social Research*, 1(2). Abgerufen von <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0114-fqs0002204>, letzter Zugriff: 19.07.2019.
- Mayring, P. (2003). *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken* (8. Aufl.). Weinheim: Beltz.
- Mayring P. & Fenzl T. (2014). Qualitative Inhaltsanalyse. In N. Baur, & J. Blasius (Hrsg.), *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung* (S. 543-556). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Mazur, D. J., & Hickam, D. H. (1993). Patients' and physicians' interpretations of graphic data displays. *Medical Decision Making*, 13(1), 59-63.
- McDermott, L. C., Rosenquist, M. L., & van Zee, E. H. (1987). Student difficulties in connecting graphs and physics: Examples from kinematics. *American Journal of Physics*, 55(6), 503-513.
- McKenzie, D. L., & Padilla, M. J. (1986). The construction and validation of the test of graphing in science (TOGS). *Journal of Research in Science Teaching*, 23(7), 571-579.
- McNeill, K. L., Lizotte, D. J., Krajcik, J., & Marx, R. W. (2006). Supporting students' construction of scientific explanations by fading scaffolds in instructional materials. *The Journal of the Learning Sciences*, 15(2), 153-191.
- Meira, L. (1998). Making sense of instructional devices: The emergence of transparency in mathematical activity. *Journal for Research in Mathematics Education*, 29(2), 121-142.
- Meir, E., Perry, J., Stal, D., Maruca, S., & Klopfer, E. (2005). How effective are simulated molecular-level experiments for teaching diffusion and osmosis? *Cell biology education*, 4(3), 235-248.
- Meiser, T., Klauer, K. C., & Naumer, B. (2001). Propositional reasoning and working memory: The role of prior training and pragmatic content. *Acta Psychologica*, 106(3), 303-327.
- Meister, J. (2018). *Mathematisierungen im Biologieunterricht: Funktionales Denken bei der Modellierung biologischer Kontexte*. BestMasters. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Meister, J., & Upmeyer zu Belzen, A. (2017). Lichtintensität und Fotosyntheseleistung. Den reflektierten Umgang mit Funktionen üben. *Unterricht Biologie*, 41(423), 32-37.

Meister, J., & Upmeyer zu Belzen, A. (2018). Naturwissenschaftliche Phänomene mit Liniendiagrammen naturwissenschaftlich-mathematisch modellieren. In M. Hammann & M. Lindner (Hrsg.), *Lehr- und Lernforschung in der Biologiedidaktik Band 8* (S. 87–106). Innsbruck: Studien-Verlag.

Mevarech, Z. R., & Kramarsky, B. (1997). From verbal descriptions to graphic representations: Stability and change in students' alternative conceptions. *Educational Studies in Mathematics*, 32(3), 229-263.

Meyer, M. (2009). Abduktion, Induktion–Konfusion. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 12(2), 302-320.

Miller, G. A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological review*, 63(2), 81-97.

Miller, J. R., & Kintsch, W. (1980). Readability and recall of short prose passages: A theoretical analysis. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 6(4), 335-354.

Mokros, J. R., & Tinker, R. F. (1987). The impact of microcomputer-based labs on children's ability to interpret graphs. *Journal of research in science teaching*, 24(4), 369-383.

Monk, S. (1992). Students' understanding of a function given by a physical model. *The concept of function: Aspects of epistemology and pedagogy*, 25, 175-194.

Monteiro, C., & Ainley, J. (2004). Critical Sense in Interpretations of Media Graphs. In M. Johnsen Høines & A. B. Fuglestad (Hrsg.), Proceedings of the Twenty Eighth Annual Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education, Bergen University College, 3, 361-368. Abgerufen von http://emis.impa.br/EMIS/proceedings/PME28/RR/RR086_Monteiro.pdf, letzter Zugriff: 19.07.2019.

Monteiro, C., & Ainley, J. (2007). Investigating the Interpretation of Media Graphs among Student Teachers. *International Electronic Journal of Mathematics Education*, 2(3), 187-207.

Moore, G. E. (1903). The refutation of idealism. *Mind*, 12(48), 433-453.

- Moore, K. C. (2016). Graphing as figurative and operative thought. In C. Csíkos, A. Rausch, & J. Szitányi (Hrsg.), *Proceedings of the 40th Conference of the International Groups for the Psychology of Mathematics Education* (Bd. 3, S. 323-330). Szeged, Hungary: PME.
- Moore, K. C., & Thompson, P. W. (2015). Shape thinking and students' graphing activity. In T. Fukawa-Connelly, N. Infante, K. Keene, & M. Zandieh (Hrsg.), *Proceedings of the 18th meeting of the MAA special interest group on research in undergraduate mathematics education* (S. 782-789). Pittsburgh, PA: RUME.
- Moosbrugger, H., & Kelava, A. (2012). *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Moreno, R., & Mayer, R. E. (2010). Techniques that increase generative processing in multimedia learning: Open questions for cognitive load research. In J. L. Plass, R. Moreno, & R. Brünken (Hrsg.), *Cognitive load theory* (S. 153-177). New York, NY: Cambridge University Press.
- Moreno, R., & Park, B. (2010). Cognitive load theory: Historical development and relation to other theories. In J. L. Plass, R. Moreno, & R. Brünken (Hrsg.), *Cognitive load theory* (S. 9-28). New York, NY: Cambridge University Press.
- Moreno, A., Ruiz-Mirazo, K., & Barandiaran, X. (2011). The impact of the paradigm of complexity on the foundational frameworks of biology and cognitive science. In C. A. Hooker, D. V. Gabbay, P. Thagard, & J. Woods (Eds.), *Handbook of the philosophy of science* (Philosophy of complex systems, S. 311-333). Amsterdam: Elsevier.
- Morris, C. W. (1946). *Signs, Language, and Behavior* (2. Aufl.). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Morrison, B. B., Dorn, B., & Guzdial, M. (2014). Measuring cognitive load in introductory CS: adaptation of an instrument. In Q. Cutts, B. Simon, & B. Dorn (Hrsg.), *Proceedings of the tenth annual conference on International computing education research (ICER'14 Glasgow, Scotland, United Kingdom 11.-13.08.2014)*, S. 131-138). New York, NY: ACM.
- Moser, K. S. (2003). Mentale Modelle und ihre Bedeutung. Kognitionspsychologische Grundlagen des (Miss-)Verstehens. In U. Ganz-Blättler, U., & P. Michel (Hrsg.), *Sinnbildlich schief: Missgeschicke bei Symbolgenese und Symbolgebrauch* (Schriften zur Symbolforschung, Band 13, S. 181-205). Bern: Peter Lang.
- Moyes, C. D., & Schulte, P. M. (2008). *Tierphysiologie*. München: Pearson Studium.

- Myers, D. G., & Wilson, J. (2014). Gedächtnis. In D. G. Myers (Hrsg.), *Psychologie* (S. 327-365). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Myles-Worsley, M., Johnston, W. A., & Simons, M. A. (1988). The influence of expertise on X-ray image processing. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *14*(3), 553-557.
- Nachtigall, W. (2010). Schlussfolgern, Beurteilen, Erklären in der Biologie. In W. Nachtigall (2010) *Bionik als Wissenschaft - Erkennen - Abstrahieren - Umsetzen* (S. 33-58). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Narayanan, N. H., & Hegarty, M. (1998a). On designing comprehensible interactive hypermedia manuals. *International journal of human-computer studies*, *48*(2), 267-301.
- Narayanan, N. H., & Hegarty, M. (1998b). Intelligible multimedia. *Journal of Educational Psychology*, *84*, 444-452.
- Narayanan, N. H., & Hegarty, M. (2002). Multimedia design for communication of dynamic information. *International journal of human-computer studies*, *57*(4), 279-315.
- Narayanan, N. H., Suwa, M., & Motoda, H. (1995). Diagram-based problem solving: The case of an impossible problem. In J. D. Moore, & J. F. Lehman (Hrsg.), *Proceedings of the 17th annual conference of the Cognitive Science Society* (S. 206-211). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Neber, H. (2004). Forderung epistemischen Fragens im Religionsunterricht. *Unterrichtswissenschaft*, *38*(4), 308-320.
- Neber, H. (2006). Fragenstellen. In H. Mandl & H. F. Friedrich (Hrsg.), *Handbuch Lernstrategien* (S. 50–58). Göttingen: Hogrefe.
- Neber, H., & Anton, M. A. (2008). Förderung präexperimenteller epistemischer Aktivitäten im Chemieunterricht. *Zeitschrift für pädagogische Psychologie*, *22*(2), 143-150.
- Nemirovsky, R. (2005). Mathematical places. In R. Nemirovsky, A. S. Rosebery, J. Solomon, & B. Warren (Hrsg.), *Everyday matters in science and mathematics: Studies of complex classroom events* (S. 45-94). Mahawh, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Nemirovsky, R., & Monk, S. (2000). If you look at it the other way.: an exploration into the nature of symbolizing. In P. Cobb, E. Yackel, & K. McClain

(Hrsg.), *Symbolizing and communicating in mathematics classrooms: perspectives on discourse, tools, and instrumental design* (S. 177-221). New Jersey: Lawrence Erlbaum.

Nemirovsky, R., & Rubin, A. (1991). *It makes sense if you think about how the graphs work. But in reality...* In F. Furinghetti (Hrsg.), *Proceedings of the 15th International Conference for the Psychology of Mathematics Education* (Bd. III, S. 57–64). Assisi: University of Assisi.

Nemirovsky, R., Tierney, C., & Wright, T. (1998). Body motion and graphing. *Cognition and instruction*, 16(2), 119-172.

Nerdel, C. (2017). *Grundlagen der Naturwissenschaftsdidaktik: Kompetenzorientiert und aufgabenbasiert für Schule und Hochschule*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Newell, A., Shaw, J. C., & Simon, H. A. (1958). Elements of a theory of human problem solving. *Psychological review*, 65(3), 151-166.

Newell, A., & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving* (Bd. 104, Nr. 9). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Nitsch, R. (2015). *Diagnose von Lernschwierigkeiten im Bereich funktionaler Zusammenhänge: eine Studie zu typischen Fehlermustern bei Darstellungswechseln*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Nitz, S. (2012). *Fachsprache im Biologieunterricht: Eine Untersuchung zu Bedingungsfaktoren und Auswirkungen* (Dissertation). Kiel: Christian-Albrechts Universität Kiel.

Nitz, S., & Fechner, S. (2018). Mentale Modelle. In D. Krüger, I. Parchmann, & H. Schrecker (Hrsg.), *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 69-86). Berlin, Heidelberg: Springer.

Nitz, S., Meister, S., Schwanewedel, J., & Upmeyer zu Belzen, A. (2018). Kompetenzraster zum Umgang mit Liniendiagrammen: Ein Beispiel für Diagnostik im Lehr-Lern-Labor. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 71(6), 393-400.

Nitz, S., Nerdel, C., & Prechtel, H. (2012). Entwicklung eines Erhebungsinstruments zur Erfassung der Verwendung von Fachsprache im Biologieunterricht. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 18, 117-139.

Nitz, S., Prechtel, H., & Nerdel, C. (2014). Survey of classroom use of representations: Development, field test and multilevel analysis. *Learning Environments Research*, 17(3), 401-422.

- Nokes, T. J., Hausmann, R. G., VanLehn, K., & Gershman, S. (2011). Testing the instructional fit hypothesis: the case of self-explanation prompts. *Instructional Science*, 39(5), 645-666.
- OECD (2013). *PISA 2012 Assessment and Analytical Framework: Mathematics, Reading, Science, Problem Solving and Financial Literacy*. PISA: OECD Publishing.
- Oestermeier, U., & Hesse, F. W. (2000). Verbal and visual causal arguments. *Cognition*, 75(1), 65-104.
- Ogle, D. H. (2016). *Introductory fisheries analyses with R*. Boca Raton: Chapman and Hall/CRC.
- Oleschko, S., & Schmitz, A. (2016). Sprachliches Handeln von Lernenden im Sachfachunterricht. In J. Menthe, D. Höttecke, T. Zabka, M. Hammann, & M. Rothgangel (Hrsg.), *Befähigung zu gesellschaftlicher Teilhabe: Beiträge der fachdidaktischen Forschung* (S. 219-230). Münster: Waxmann.
- Orgill, M., & Bodner, G. M. (2006). An analysis of the effectiveness of analogy use in college-level biochemistry textbooks. *Journal of Research in Science Teaching*, 43(10), 1040-1060.
- Orgill, M., & Bodner, G. (2007). Locks and keys: An analysis of biochemistry students' use of analogies. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 35(4), 244-254.
- Osborne, J. F., & Patterson, A. (2011). Scientific argument and explanation: A necessary distinction? *Science Education*, 95(4), 627-638.
- Oser, F., Hascher, T., & Spychiger, M. (1999). Lernen aus Fehlern Zur Psychologie des „negativen“ Wissens. In W. Althof (Hrsg.), *Fehlerwelten* (S. 11-41). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Otero, J., Caldeira, H., & Gomes, C. J. (2004). The influence of the length of causal chains on question asking and on the comprehensibility of scientific texts. *Contemporary Educational Psychology*, 29(1), 50-62.
- Özarslan, M., & Çetin, G. (2014). An investigation of students' views about enzymes by fortune lines technique. In *Asia-Pacific Forum on Science Learning & Teaching*, 15(1), 1-19.
- Paas, F. G. (1992). Training strategies for attaining transfer of problem-solving skill in statistics: A cognitive-load approach. *Journal of educational psychology*, 84(4), 429-434.

- Paas, F., Renkl, A., & Sweller, J. (2003). Cognitive load theory and instructional design: Recent developments. *Educational psychologist*, 38(1), 1-4.
- Paas, F., Tuovinen, J. E., Tabbers, H., & Van Gerven, P. W. (2003). Cognitive load measurement as a means to advance cognitive load theory. *Educational psychologist*, 38(1), 63-71.
- Paas, F. G., & van Merriënboer, J. J. (1993). The efficiency of instructional conditions: An approach to combine mental effort and performance measures. *Human factors*, 35(4), 737-743.
- Paas, F. G., & van Merriënboer, J. J. (1994). Variability of worked examples and transfer of geometrical problem-solving skills: A cognitive-load approach. *Journal of educational psychology*, 86(1), 122-133.
- Padilla, M. J., McKenzie, D. L., & Shaw Jr, E. L. (1986). An Examination of the Line Graphing Ability of Students in Grades Seven Through Twelve. *School Science and Mathematics*, 86(1), 20-26.
- Paivio, A. (1990). *Mental representations: A dual coding approach* (Bd. 9). Oxford: Oxford University Press.
- Panofsky, E. (1975). Ikonographie und Ikonologie. Eine Einführung in die Kunst der Renaissance. In E. Panfosky (Hrsg.) *Sinn und Deutung in der bildenden Kunst* (S. 36-67). Köln: Dumont. (Original: Panofsky, E. (1955). *Iconography and Iconology: An Introduction to the Study of Renaissance Art*. In E. Panfosky (Hrsg.) *Meaning in the visual arts*. Chicago: University of Chicago Press.)
- Pape, H. (2004). Kreative Interpretationen – Denkerfahrung und die Identität abstrakter Gegenstände. In G. Mattenklott (Hrsg.), *Ästhetische Erfahrung im Zeichen der Entgrenzung der Künste: epistemische, ästhetische und religiöse Formen von Erfahrung im Vergleich* (S. 19-31). Hamburg: Felix Meiner.
- Park, B. (2010). *Testing the additivity hypothesis of cognitive load theory* (Dissertation). Saarbrücken: Universität des Saarlandes.
- Park, W. (2017). *Abduction in context: The conjectural dynamics of scientific reasoning* (Bd. 32). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Parmar, R. S., & Signer, B. R. (2005). Sources of error in constructing and interpreting graphs: A study of fourth-and fifth-grade students with LD. *Journal of learning disabilities*, 38(3), 250-261.
- Pearson, P. D., & Johnson, D. D. (1978). *Teaching reading comprehension*. New York, NY: Holt, Rinehart, & Winston.

- Peebles, D., & Cheng, P. C. H. (2003). Modeling the effect of task and graphical representation on response latency in a graph reading task. *Human Factors*, 45(1), 28-46.
- Peeck, J. (1982). Effects of mobilization of prior knowledge on free recall. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 8(6), 608-612.
- Peeck, J. (1993). Increasing picture effects in learning from illustrated text. *Learning and instruction*, 3(3), 227-238.
- Peeck, J. (1994). Enhancing graphic-effects in instructional texts: Influencing learning activities. *Advances in psychology*, 108, 291-301.
- Peirce, C. S. (1931). *Collected papers of charles sanders peirce*. Cambridge: Harvard University Press.
- Pereira-Mendoza, L. (1995). Graphing in the primary school: Algorithm versus comprehension. *Teaching Statistics*, 17(1), 2-6.
- Pereira-Mendoza, L., & Mellor, J. (1991). Students' concepts of bar graphs-Some preliminary findings. In D. Vere-Jones (Hrsg.), *Proceedings of the third international conference on teaching statistics* (Bd. 1, S. 150-157).
- Pfannkuch, M. (2006). Informal inferential reasoning. *Proceedings of the Seventh International Conference on Teaching Statistics*. Voorburg, The Netherlands: International Statistical Institute. Abgerufen von http://iase-web.org/documents/papers/icots7/6A2_PFAN.pdf, letzter Zugriff: 19.07.2019.
- Pfannkuch, M., Budgett, S., Parsonage, R., & Horring, J. (2004). *Comparison of data plots: Building a pedagogical framework*. Paper presented at the 10th International Congress on Mathematics Education (ICME-10). Copenhagen, Denmark. Abgerufen von <http://iase-web.org/documents/papers/icme10/Pfannkuch.pdf>, letzter Zugriff: 19.07.2019.
- Philipp, K. (2012). *Experimentelles Denken: theoretische und empirische Konkretisierung einer mathematischen Kompetenz*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Phillipp, J. (2008). *Förderung des Verstehens von Liniendiagrammen durch interpretierende und konstruierende Lernhandlungen* (Dissertation). Freiburg i. Br: Psychologisches Institut der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- Phillips, R., Theriot, J., Kondev, J., & Garcia, H. (2012). *Physical biology of the cell*. New York, NY: Garland Science.

- Phillips, R. J. (1997). Can juniors read graphs? A review and analysis of some computer-based activities. *Journal of information technology for teacher education*, 6(1), 49–58.
- Pichert, J. W., & Anderson, R. C. (1977). Taking different perspectives on a story. *Journal of educational psychology*, 69(4), 309-315.
- Pinker, S. (1983). *Pattern perception and the comprehension of graphs* (Dissertation). Cambridge: Department of Psychology and Center for Cognitive Science, Massachusetts Institute of Technology.
- Pinker, S. (1990). A theory of graph comprehension. In R. Freedle (Hrsg.), *Artificial intelligence and the future of testing* (S. 73-126). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Plass, J. L., Moreno, R., & Brünken, R. (Hrsg.). (2010). *Cognitive load theory*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Plicht, C. (2018). *Diagramme im Unterricht. Explorative Studien zum Lesen von statistischen Repräsentationen im Biologieunterricht* (Dissertation). Heidelberg: Pädagogische Hochschule Heidelberg.
- Ploetzner, R., Lippitsch, S., Galmbacher, M., Heuer, D., & Scherrer, S. (2009). Students' difficulties in learning from dynamic visualisations and how they may be overcome. *Computers in Human Behavior*, 25(1), 56-65.
- Pollock, E., Chandler, P., & Sweller, J. (2002). Assimilating complex information. *Learning and instruction*, 12(1), 61-86.
- Pratt, D. (1995). Young children's active and passive graphing. *Journal of Computer Assisted Learning*, 11(3), 157-169.
- Prediger, S., & Hein, K. (2017). Learning to meet language demands in multi-step mathematical argumentations: Design research on a subject-specific genre. *European Journal of Applied Linguistics*, 5(2), 309-335.
- Prediger, S., Link, M., Hinz, R., Hussmann, St., Ralle, B., & Thiele, J. (2012): Lehr-Lernprozesse initiieren und erforschen. Fachdidaktische Entwicklungsforschung im Dortmunder Modell. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 65(8), 452–457. Abgerufen von http://www.mathematik.uni-dortmund.de/~prediger/veroeff/12Prediger_et_al_MNU_FUNKEN_Webversion.pdf, letzter Zugriff: 19.07.2019.
- Preece, J. (1983). *A survey of graph interpretation and sketching errors*. (CAL Research Group Tech. Rep. No. 34). Milton Keynes, England: Institute of Educational Technology, The Open University, Walton Hall.

Preece, J., & Janvier, C. (1992). A study of the interpretation of trends in multiple curve graphs of ecological situations. *School Science and Mathematics*, 92(6), 299-306.

Preece, J., & Janvier, C. (1993). Interpreting trends in multiple-curve graphs of ecological situations: the role of context. *International journal of science education*, 15(2), 199-212.

Przyborski, A., & Slunecko, T. (2012). Learning to think iconically in the human and social sciences: Iconic standards of understanding as a pivotal challenge for method development. *Integrative Psychological and Behavioral Science*, 46(1), 39-56.

Pylyshyn, Z. W. (1973). What the mind's eye tells the mind's brain: A critique of mental imagery. *Psychological bulletin*, 80(1), 1-24.

R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*. Vienna, Austria. Abgerufen von <https://www.R-project.org/>, letzter Zugriff: 19.07.2019.

Radford, L. (2009). "No! He starts walking backwards!": Interpreting motion graphs and the question of space, place and distance. *Zdm*, 41(4), 467-480.

Ragni, M., & Knauff, M. (2013). A theory and a computational model of spatial reasoning with preferred mental models. *Psychological review*, 120(3), 561-588.

Raïche, G., Walls, T. A., Magis, D., Riopel, M., & Blais, J. G. (2013). Non-graphical solutions for Cattell's scree test. *Methodology*, 9(1), 23-29.

Ramoni, M., Stefanelli, M., Magnani, L., & Barosi, G. (1992). An epistemological framework for medical knowledge-based systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 22(6), 1361-1375.

Randall, D. J., Eckert, R., Burggren, W., & French, K. (2002). *Tierphysiologie* (4. Aufl.). Stuttgart: Georg Thieme.

Rao, A. R., & Sieben, W. A. (1992). The effect of prior knowledge on price acceptability and the type of information examined. *Journal of consumer research*, 19(2), 256-270.

Rasch, B., Friese, M., Hofmann, W. J., & Naumann, E. (2010). *Quantitative Methoden Band 2. Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Ratwani, R. M., & Trafton, J. G. (2004). Making Graphical Inferences: A Hierarchical Framework. In K. Forbus, D. Gentner, & T. Regier (Hrsg.), *Proceedings*

of the *Annual Meeting of the Cognitive Science Society* (S. 1119-1124). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.

Ratwani, R. M., Trafton, J. G., & Boehm-Davis, D. A. (2003). Thinking graphically: Extracting local and global information. In *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society* (S. 958-963). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.

Ratwani, R. M., Trafton, J. G., & Boehm-Davis, D. A. (2004). From Specific Information Extraction to Inferences: A Hierarchical Framework of Graph Comprehension. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (S. 1808-1812). Los Angeles, CA: SAGE Publications.

Ratwani, R. M., Trafton, J. G., & Boehm-Davis, D. A. (2008). Thinking graphically: Connecting vision and cognition during graph comprehension. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 14(1), 36-49.

Rauh, R., Schlieder, C., & Knauff, M. (1996). Präferierte mentale Modelle beim räumlich-relationalen Schließen: Empirie und kognitive Modellierung. *Kognitionswissenschaft*, 6(1), 21-34.

Redder, A., & Weinert, S. (Hrsg.). (2013). *Sprachförderung und Sprachdiagnostik: Interdisziplinäre Perspektiven*. Münster: Waxmann.

Reid, D. J., Zhang, J., & Chen, Q. (2003). Supporting scientific discovery learning in a simulation environment. *Journal of Computer Assisted Learning*, 19(1), 9-20.

Reimann, P. (1997). *Lernprozesse beim Wissenserwerb aus Beispielen: Analyse, Modellierung, Förderung*. Bern: Hans Huber

Reingold, E. M., Charness, N., Schultetus, R. S., & Stampe, D. M. (2001). Perceptual automaticity in expert chess players: Parallel encoding of chess relations. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8(3), 504-510.

Reinhold, P., Lind, G., & Friege, G. (1999). Wissenszentriertes Problemlösen in der Physik. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 5, 41-62.

Renkl, A. (2009). Wissenserwerb. In E. Wild & J. Möller (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie* (S. 3-26). Berlin, Heidelberg: Springer.

Renkl, A., Mandl, H., & Gruber, H. (1996). Inert knowledge: Analyses and remedies. *Educational Psychologist*, 31(2), 115-121.

Reuber, P., & Pfaffenbach, C. (2005). *Methoden der empirischen Humangeographie: Beobachtung und Befragung*. Braunschweig: Westermann.

Rey, G. D. (2009). *E-Learning: Theorien. Gestaltungsempfehlungen und Forschung*. Bern: Hans Huber.

Rey, G. D., & Nieding, G. (2010). Arbeitsgedächtnis und Cognitive Load - Formen, Messmethoden und Anwendungen. In H.-P. Trollenier, W. Lenhard & P. Marx (Hrsg.), *Brennpunkte der Gedächtnisforschung. Entwicklungs- und pädagogisch-psychologische Perspektiven* (S. 67-85). Göttingen: Hogrefe.

Richter, T., & Schnotz, W. (2018). Textverstehen. In S. Buch, D. Rost & J. Sparfeldt (Hrsg.), *Handwörterbuch Pädagogische Psychologie* (4. Aufl., S. 826-837). Weinheim: Beltz.

Ricœur, P. (1991) *From Text to Action: Essays in Hermeneutics, II*, übersetzt von. K. Blaney and J. B. Thompson. Evanston, IL: Northwestern University Press.

Rikers, R. M., Schmidt, H. G., & Boshuizen, H. P. (2000). Knowledge encapsulation and the intermediate effect. *Contemporary educational psychology*, 25(2), 150-166.

Roeger, C. (2015). Philosophisches Argumentieren. In A. Budke, M. Kuckuck, M. Meyer, F. Schäbitz, K. Schlüter, G. Weiss (Hrsg.), *Fachlich argumentieren lernen. Didaktische Forschungen zur Argumentation in den Unterrichtsfächern* (S. 62–74). Münster: Waxmann.

Rollett, W. (2008). *Strategieinsatz, erzeugte Information und Informationsnutzung bei der Exploration und Steuerung komplexer dynamischer Systeme* (Bd. 1). Münster: LIT.

Rosenshine, B., Meister, C., & Chapman, S. (1996). Teaching students to generate questions: A review of the intervention studies. *Review of educational research*, 66(2), 181-221.

Rosseel, Y. (2012). Lavaan: An *r* package for structural equation modeling and more. Version 0.5–12 (BETA). *Journal of statistical software*, 48(2), 1-36.

Rost J (2004). Lehrbuch Testtheorie – Testkonstruktion (2. Aufl.), Bern: Hans Huber.

Roth, W. M. (2002). Reading graphs: contributions to an integrative concept of literacy. *Journal of curriculum studies*, 34(1), 1-24.

Roth, W. M. (2003). Toward an anthropology of graphing – An Introduction. In W. M. Roth (Hrsg.), *Toward an Anthropology of Graphing* (S. 1-21). Dordrecht: Springer.

- Roth, W. M. (2009). The Gap Between University and the Workplace. In O. Skovsmose, P. Valero, & O. R. Christensen (Hrsg.), *University science and mathematics education in transition* (S. 133-155). Boston, MA: Springer.
- Roth, W. M. (2011). *Passibility: At the limits of the constructivist metaphor* (Bd. 3). Dordrecht: Springer.
- Roth, W.-M. (2012). Limits to general expertise: A study of in- and out-of-field graph interpretation. In C. A. Wilhelm (Hrsg.), *Encyclopedia of cognitive psychology* (S. 1–38). Hauppauge: Nova Science.
- Roth, W. M. (2014). *Uncertainty and Graphing in Discovery Work: Implications for and Applications in STEM Education*. Dordrecht: Springer.
- Roth, W. M., & Barton, A. C. (2004). *Rethinking scientific literacy*. London: Psychology Press.
- Roth, W.-M., & Bowen, G. M. (1999a). Complexities of graphical representations during lectures: A phenomenological approach. *Learning and Instruction*, 9, 235–255.
- Roth, W.-M., & Bowen, G. M. (1999b). Of cannibals, missionaries, and converts: Graphing competencies from grade 8 to professional science inside (classrooms) and outside (field/laboratory). *Science, Technology & Human Values*, 24, 179–212.
- Roth, W.-M., & Bowen, G. M. (2001). Professionals read graphs: A semiotic analysis. *Journal for Research in Mathematics Education*, 32, 159–194.
- Roth, W.-M., & Bowen, G. M. (2003). When are graphs ten thousand words worth? An expert/expert study. *Cognition and Instruction*, 21, 429–473.
- Roth, W.-M., Bowen, G. M., & Masciotra, D. (2002). From thing to sign and “natural object”: Toward a genetic phenomenology of graph interpretation. *Science, Technology & Human Values*, 27, 327–356.
- Roth, W.-M., Bowen, G. M., & McGinn, M. K. (1999). Differences in graph-related practices between high school biology textbooks and scientific ecology journals. *Journal of Research in Science Teaching*, 36, 977–1019.
- Roth, E., Heidenreich, K., & Holling, H. (1999). *Sozialwissenschaftliche Methoden: Lehr- und Handbuch für Forschung und Praxis*. München: de Gruyter.
- Roth, W.-M., & McGinn, M. K. (1997). Graphing: A cognitive ability or cultural practice? *Science Education*, 81, 91–106.

Roth, W. M., & McGinn, M. K. (1998). Inscriptions: Toward a theory of representing as social practice. *Review of educational research*, 68(1), 35-59.

Roth, W. M., Pozzer-Ardenghi, L., & Han, J. Y. (2005). *Critical graphicacy: Understanding visual representation practices in school science* (Bd. 26). Dordrecht: Springer.

Rous, M. (2016). *Fachsprache im Biologieunterricht: Förderung von konzeptuellem Lernen und Textverstehen durch fachspezifisch-sprachsensible Aufgaben* (Bd. 16). Berlin: Logos.

Ruiz-Primo, M. A., Li, M., Tsai, S. P., & Schneider, J. (2010). Testing one premise of scientific inquiry in science classrooms: Examining students' scientific explanations and student learning. *Journal of Research in Science Teaching: The Official Journal of the National Association for Research in Science Teaching*, 47(5), 583-608.

Ruscio, J., & Roche, B. (2012). Determining the number of factors to retain in an exploratory factor analysis using comparison data of known factorial structure. *Psychological assessment*, 24(2), 282-292.

Rutten, N., van Joolingen, W. R., & van der Veen, J. T. (2012). The learning effects of computer simulations in science education. *Computers & Education*, 58(1), 136-153.

Sadoski, M., Goetz, E. T., & Fritz, J. B. (1993). Impact of concreteness on comprehensibility, interest, and memory for text: Implications for dual coding theory and text design. *Journal of Educational Psychology*, 85(2), 291-304.

Sadoski, M., & Paivio, A. (2001). *Imagery and text. A dual coding theory of reading and writing*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.

Salomon, G. (1984). Television is "easy" and print is "tough": The differential investment of mental effort in learning as a function of perceptions and attributions. *Journal of Educational Psychology*, 76(4), 647-658.

Sampson, V., & Blanchard, M. R. (2012). Science teachers and scientific argumentation: Trends in views and practice. *Journal of Research in Science Teaching*, 49(9), 1122-1148.

Sander, E. (1998). *Das Verständnis des biologischen Gleichgewichts in der Fachwissenschaft und in den Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern*. Didaktisches Zentrum (Hrsg.), Oldenburger Vordrucke Nr. 366. Oldenburg: Didaktisches Zentrum.

Sandoval, W. A. (2001). Students' uses of data as evidence in scientific explanations. Paper presented at the Annual Meeting of the American Educational Research Assn, Seattle, WA. Abgerufen von <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.29.1047&rep=rep1&type=pdf>, letzter Zugriff: 19.07.2019.

Sandoval, W. A. (2003). Conceptual and epistemic aspects of students' scientific explanations. *The journal of the learning sciences*, 12(1), 5-51.

Sandoval, W. A., & Reiser, B. J. (1997). Evolving Explanations in High School Biology. Presented at the annual meeting of the American Educational Research Association, Chicago, IL. Abgerufen von <https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED409165.pdf>, letzter Zugriff: 19.07.2019.

Sandoval, W. A., & Reiser, B. J. (2004). Explanation-driven inquiry: Integrating conceptual and epistemic scaffolds for scientific inquiry. *Science Education*, 88(3), 345-372.

Sanger, M. J., Brecheisen, D. M., & Hynek, B. M. (2001). Can computer animations affect college biology students' conceptions about diffusion & osmosis? *The American Biology Teacher*, 63(2), 104-109.

Sato, Y., & Mineshima, K. (2012). The efficacy of diagrams in syllogistic reasoning: A case of linear diagrams. In P. Cox, B. Plimmer, & P. Rodgers (Hrsg.), *International Conference on Theory and Application of Diagrams* (S. 352-355). Berlin, Heidelberg: Springer.

Sato, Y., Wajima, Y., & Ueda, K. (2014). Visual bias of diagram in logical reasoning. In *Proc. 36th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (S. 2342-2347). Austin, TX: Cognitive Science Society.

Schecker, H., & Duit, R. (2018). Schülervorstellungen und Physiklernen. In H. Schecker, T. Wilhelm, M. Hopf & R. Duit (Hrsg.). (2018). *Schülervorstellungen und Physikunterricht: Ein Lehrbuch für Studium, Referendariat und Unterrichtspraxis* (S. 1-22). Berlin, Heidelberg: Springer.

Schermelleh-Engel, K., Werner, C. S., & Moosbrugger, H. (2007). Exploratorische Faktorenanalyse. Hauptachsenanalyse und Hauptkomponentenanalyse. In H. Moosbrugger & A. Kelava (Hrsg.), *Testtheorie und Fragebogenkonstruktion* (S. 1-25). Berlin, Heidelberg: Springer.

Scherrmann, A. (2013). Veranschaulichungen statistischer Daten verstehen. Eine Herausforderung für den Mathematikunterricht der Sekundarstufe I. In J. Sprenger, A. Wagner & M. Zimmerman (Hrsg.), *Mathematik lernen, darstellen, deuten, verstehen* (S. 161-176). Wiesbaden: Springer Fachmedien.

- Schlag, S. (2011). *Kognitive Strategien zur Förderung des Text-und Bildverstehens beim Lernen mit illustrierten Sachtexten: theoretische Konzeptualisierung und empirische Prüfung* (Bd. 19). Berlin: Logos.
- Schmidt-Weigand, F., Kohnert, A., & Glowalla, U. (2010). A closer look at split visual attention in system-and self-paced instruction in multimedia learning. *Learning and instruction, 20*(2), 100-110.
- Schnotz, W. (1994). Wissenserwerb mit logischen Bildern. In B. Weidenmann (Hrsg.), *Wissenserwerb mit Bildern* (S. 95-148). Göttingen: Hogrefe.
- Schnotz, W. (2001). Wissenserwerb mit Multimedia. *Unterrichtswissenschaft, 29*(4), 292–318.
- Schnotz, W. (2002). Wissenserwerb mit Texten, Bildern und Diagrammen. In L. Issing & P. Klimsa (Hrsg.), *Information und Lernen mit Multimedia und Internet* (S. 65-81). Weinheim: Beltz/PVU.
- Schnotz, W. (2003). Bild- und Sprachverarbeitung aus psychologischer Sicht. In K. Sachs-Hombach (Hrsg.), *Was ist Bildkompetenz?* (S. 25-42). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Schnotz, W. (2005). An integrated model of text and picture comprehension. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (S. 72-103). New York, NY: Cambridge University Press.
- Schnotz, W. (2006). Was geschieht im Kopf des Lesers? Mentale Konstruktionsprozesse beim Textverstehen aus der Sicht der Psychologie und der kognitiven Linguistik. In H. Blühorn, E. Breindl, & U. H. Waßner (Hrsg.), *Text–Verstehen. Grammatik und darüber hinaus* (S. 222-238). Berlin, New York: de Gruyter.
- Schnotz, W. (2014a). Integrated model of text and picture comprehension. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (S. 72–103). New York, NY: Cambridge University Press.
- Schnotz, W. (2014b). *Visuelle kognitive Werkzeuge beim Mathematikverstehen*. In J. Roth & J. Ames (Hrsg.), *Beiträge zum Mathematikunterricht 2014. Beiträge zur 48. Jahrestagung der Gesellschaft für Didaktik der Mathematik vom 10. bis 14. März in Koblenz* (S. 45-52). Münster: WTM.
- Schnotz, W., & Bannert, M. (1999). Einflüsse der Visualisierungsform auf die Konstruktion mentaler Modelle beim Text-und Bildverstehen. *Zeitschrift für experimentelle Psychologie, 46*(3), 217-236.

- Schnotz, W., & Bannert, M. (2003). Construction and interference in learning from multiple representation. *Learning and instruction*, 13(2), 141-156.
- Schnotz, W., & Kürschner, C. (2007). A reconsideration of cognitive load theory. *Educational psychology review*, 19(4), 469-508.
- Schönborn, K. J., & Anderson, T. R. (2006). The importance of visual literacy in the education of biochemists. *Biochemistry and molecular biology education*, 34(2), 94-102.
- Schönborn, K. J., Anderson, T. R., & Grayson, D. J. (2002). Student difficulties with the interpretation of a textbook diagram of immunoglobulin G (IgG). *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 30(2), 93-97.
- Schönborn, K. J., & Bögeholz, S. (2009). Knowledge transfer in biology and translation across external representations: Experts' views and challenges for learning. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 7(5), 931-955.
- Schrenk, M., Gropengießer, H., Groß, J., Hammann, M., Weitzel, H., & Zabel, J. (2019). Schülervorstellungen im Biologieunterricht. In J. Groß, M. Hammann, P. Schmiemann, J. Zabel (Hrsg.), *Biologiedidaktische Forschung: Erträge für die Praxis* (S. 3–20). Heidelberg: Springer Spektrum.
- Schulz, A., Wirtz, M., & Starauschek, E. (2012). Das Experiment in den Naturwissenschaften. In W. Rieß, M. Wirtz, B. Barzel, & A. Schulz (Hrsg.), *Experimentieren im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht. Schüler lernen wissenschaftlich denken und arbeiten* (S. 15-38). Münster: Waxmann.
- Schwamborn, A., Thillmann, H., Opfermann, M., & Leutner, D. (2011). Cognitive load and instructionally supported learning with provided and learner-generated visualizations. *Computers in human behavior*, 27(1), 89-93.
- Schwartz, D. L., & Bransford, J. D. (1998). A time for telling. *Cognition and instruction*, 16(4), 475-522.
- Seeger, F. (2005). Notes on a semiotically inspired theory of teaching and learning. In M. H. G. Hoffmann, J. Lenhard, & F. Seeger (Hrsg.), *Activity and sign—grounding mathematics education* (S. 67–76). New York: Springer.
- Seifert, T. L. (1993). Effects of elaborative interrogation with prose passages. *Journal of Educational Psychology*, 85(4), 642-651.
- Seufert, T. (2003). Supporting coherence formation in learning from multiple representations. *Learning and instruction*, 13(2), 227-237.

- Shaft, T. M., & Vessey, I. (2006). The role of cognitive fit in the relationship between software comprehension and modification. *Mis Quarterly*, 30(1), 29-55.
- Shah, P. (1995). *Cognitive Processes in Graph Comprehension* (Dissertation). Carnegie Mellon University.
- Shah, P. (1997). A model of the cognitive and perceptual processes in graphical display comprehension. In M. Anderson (Hrsg.), *Reasoning with diagrammatic representations* (S. 94–101). Menlo Park, CA: AAAI Press
- Shah, P. (2002). Graph comprehension: The role of format, content and individual differences. In M. Anderson, B. Meyer, & P. Olivier (Hrsg.), *Diagrammatic representation and reasoning* (S. 173-185). London: Springer.
- Shah, P., & Carpenter, P. A. (1995). Conceptual limitations in comprehending line graphs. *Journal of Experimental Psychology: General*, 124(1), 43-61.
- Shah, P., & Freedman, E. G. (2011). Bar and line graph comprehension: An interaction of top-down and bottom-up processes. *Topics in cognitive science*, 3(3), 560-578.
- Shah, P., Freedman, E. G., & Vekiri, I. (2005). The comprehension of quantitative information in graphical displays. In P. Shah, & A. Miyake (Hrsg.), *The Cambridge handbook of visuospatial thinking* (S. 426-476). Cambridge: Cambridge University Press.
- Shah, P., & Hoeffner, J. (2002). Review of graph comprehension research: Implications for instruction. *Educational Psychology Review*, 14(1), 47-69.
- Shah, P., Mayer, R. E., & Hegarty, M. (1999). Graphs as aids to knowledge construction: Signaling techniques for guiding the process of graph comprehension. *Journal of educational psychology*, 91(4), 690-702.
- Shaughnessy, J. M. (2007). Research on statistics learning and reasoning. In F. K. Lester (Hrsg.), *Second handbook of research on mathematics teaching and learning* (S. 957–1009). Charlotte, NC: Information Age.
- Shaughnessy, J. M., Garfield, J., & Greer, B. (1996). Data handling. In A. J. Bishop, K. Clements, C. Keitel, J. Kilpatrick, & C. Laborde (Hrsg.), *International handbook of mathematics education* (S. 205-237). Dordrecht: Springer.
- Shaughnessy, J. M., & Pfannkuch, M. (2002). How faithful is old faithful. *Mathematics Teacher*, 95(4), 252-259.
- Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning, automatic attending and a general theory. *Psychological review*, 84(2), 127-190.

- Shimojima, A., & Katagiri, Y. (2013). An Eye-Tracking Study of Exploitations of Spatial Constraints in Diagrammatic Reasoning. *Cognitive science*, 37(2), 211–254.
- Sibbertsen, P., & Lehne, H. (2015). *Statistik* (2. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Simcox, W. A. (1983). *A perceptual analysis of graphic information processing* (Dissertation). Medford, MA: Tufts University.
- Simkin, D., & Hastie, R. (1987). An information-processing analysis of graph perception. *Journal of the American Statistical Association*, 82(398), 454-465.
- Simon, H. A. (1974). How big is a chunk? By combining data from several experiments, a basic human memory unit can be identified and measured. *Science*, 183(4124), 482-488.
- Simon, D. P., & Simon, H. A. (1978). Individual differences in solving physics problems. In R. S. Siegler (Hrsg.), *Children's thinking: What develops?* (S. 325-348). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Sindhu, R., & Sharma, R. (1999). Some Misconceptions in the understanding of Enzymes. *Chemistry Education Review*, 14, 21-24.
- Sinha, A. P., & Vessey, I. (1992). Cognitive fit: an empirical study of recursion and iteration. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 18(5), 368-379.
- Sloman, S. A. (1996). The empirical case for two systems of reasoning. *Psychological bulletin*, 119(1), 3-22.
- Southard, K., Wince, T., Meddleton, S., & Bolger, M. S. (2016). Features of knowledge building in biology: Understanding undergraduate students' ideas about molecular mechanisms. *CBE—Life Sciences Education*, 15(1), ar7.
- Speier, C. (2006). The influence of information presentation formats on complex task decision-making performance. *International Journal of Human-Computer Studies*, 64(11), 1115-1131.
- Stanton, J. M. (2017). *Reasoning with Data: An Introduction to Traditional and Bayesian Statistics Using R*. New York: Guilford Publications.
- Stefanelli, M., & Ramoni, M. (1992). Epistemological constraints on medical knowledge-based systems. In D. A. Evans, & V. L. Patel (Hrsg.), *Advanced models of cognition for medical training and practice* (S. 3-20). Berlin, Heidelberg: Springer.

- Stegmüller, W. (1973). Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie, *Band IV: Personelle und statistische Wahrscheinlichkeit, 1. Halbband: Personelle Wahrscheinlichkeit und rationale Entscheidung*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Strahl, A. (2018). *Fachdidaktik der Naturwissenschaften unter besonderer Berücksichtigung der Physik*. Norderstedt: BoD.
- Streiner, D. L. (1998). Factors affecting reliability of interpretations of scree plots. *Psychological Reports*, 83(2), 687-694.
- Sumfleth, E., & Schüttler, S. (1995). Linguistische Textverständlichkeitskriterien — helfen sie bei der Darstellung chemischer Inhalte? *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 1, 55-72.
- Sumfleth, E., & Telgenbüscher, L. (2000). Zum Einfluss von Bildmerkmalen und zusätzlichen Fragen beim Chemielernen mit Hilfe von Bildern. Beispiel Massenspektrometrie. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 6, 59-78.
- Surber, J. R., & Schroeder, M. (2007). Effect of prior domain knowledge and headings on processing of informative text. *Contemporary educational psychology*, 32(3), 485-498.
- Swan, M. (1985). *The language of functions and graphs*. Shell Centre & Joint Matriculation Board, Nottingham.
- Swatton, P., & Taylor, R. M. (1994). Pupil performance in graphical tasks and its relationship to the ability to handle variables. *British Educational Research Journal*, 20(2), 227-243.
- Sweller, J. (2005). Implications of cognitive load theory for multimedia learning. In R. E. Mayer (Hrsg.), *The Cambridge handbook of multimedia learning* (S. 19-30). New York, NY: Cambridge University Press.
- Sweller, J. (2010). Element interactivity and intrinsic, extraneous, and germane cognitive load. *Educational psychology review*, 22(2), 123-138.
- Sweller, J., Ayres, P. L., & Kalyuga, S. (2011). Measuring Cognitive Load. In J. Sweller, P. Ayres & S. Kalyuga (Hrsg.), *Cognitive Load Theory* (S. 71-85). New York: Springer.
- Sweller, J., van Merriënboer, J. J., & Paas, F. G. (1998). Cognitive architecture and instructional design. *Educational psychology review*, 10(3), 251-296.
- Taber, K. S. (2009). Learning at the symbolic level. In J. K. Gilbert, & D. Treagust (Hrsg.), *Multiple representations in chemical education* (S. 75-105). Dordrecht: Springer.

- Taber, K. S., & Watts, M. (2000). Learners' explanations for chemical phenomena. *Chemistry Education Research and Practice*, 1(3), 329-353.
- Taboada, A., & Guthrie, J. T. (2006). Contributions of student questioning and prior knowledge to construction of knowledge from reading information text. *Journal of literacy research*, 38(1), 1-35.
- Tall, D., & Vinner, S. (1981). Concept image and concept definition in mathematics with particular reference to limits and continuity. *Educational studies in mathematics*, 12(2), 151-169.
- Tang, G. M. (1991). The Role and Value of Graphic Representation of Knowledge Structures in ESL Student Learning: An Ethnographic Study. *TESL Canada Journal*, 9(1), 29-41.
- Tanggaard, L., & Hjorth, R. (2017). Promoting abduction – a teaching experiment on creative learning processes in a high school classroom context. In R. A. Beghetto & B. Sriraman (Hrsg.), *Creative contradictions in education: Cross disciplinary paradoxes and perspectives* (Bd. 1, S. 221–247). Schweiz: Springer.
- Taylor, H. A., & Tversky, B. (1992). Spatial mental models derived from survey and route descriptions. *Journal of Memory and language*, 31(2), 261-292.
- Tepner, O., & Dollny, S. (2014). Entwicklung eines Testverfahrens zur Analyse fachdidaktischen Wissens. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 311-323). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Thaler, A. (2015). *Von ontologischen Dualismen des Bildes: philosophische Ästhetik als Grundlage kunstwissenschaftlicher Hermeneutik*. Basel: Schwabe.
- Thielen, J. (1999). *Wilhelm Dilthey und die Entwicklung des geschichtlichen Denkens in Deutschland im ausgehenden 19. Jahrhundert*. Würzburg: Königshausen & Neumann.
- Trafton, J. G., Marshall, S., Mintz, F., & Trickett, S. B. (2002). Extracting explicit and implicit information from complex visualizations. In M. Hegarty, B. Meyer, & N. H. Narayanan (Hrsg.), *International Conference on Theory and Application of Diagrams* (S. 206-220). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Trafton, J. G., & Trickett, S. B. (2001). A new model of graph and visualization usage. In J. D. Moore & K. Stenning (Hrsg.), *The proceedings of the twenty third annual conference of the cognitive science society* (S. 1048-1053). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.

- Trafton, J. G., Trickett, S. B., & Mintz, F. E. (2005). Connecting internal and external representations: Spatial transformations of scientific visualizations. *Foundations of Science*, *10*(1), 89-106.
- Trickett, S. B., & Trafton, J. G. (2006). Toward a comprehensive model of graph comprehension: Making the case for spatial cognition. In D. Barker-Plummer, R. Cox, & N. Swoboda (Hrsg.), *International Conference on Theory and Application of Diagrams* (S. 286-300). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Tsui, C. Y., & Treagust, D. F. (2013). Introduction to multiple representations: Their importance in biology and biological education. In D. F. Treagust, & C. Y. Tsui (Hrsg.), *Multiple representations in biological education* (S. 3-18). Dordrecht: Springer.
- Tsuji, B. H. (2011). *Expert and novice strategies in the exploration of data in line graphs* (Dissertation). Ottawa: Carleton University.
- Tversky, B. (1991). Spatial mental models. In *Psychology of Learning and Motivation* (Bd. 27, S. 109-145). New York: Academic Press.
- Urban, D., & Mayerl, J. (2014). *Strukturgleichungsmodellierung: ein Ratgeber für die Praxis*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Urhahne, D., & Harms, U. (2006). Instruktionale Unterstützung beim Lernen mit Computersimulationen. *Unterrichtswissenschaft*, *34*(4), 358-377.
- Van Bruggen, J. M., Kirschner, P. A., & Jochems, W. (2002). External representation of argumentation in CSDL and the management of cognitive load. *Learning and instruction*, *12*(1), 121-138.
- Van Dijk, T. A., & Kintsch, W. (1983). *Strategies of discourse comprehension*. New York: Academic Press.
- Van Gog, T., & Paas, F. (2008). Instructional efficiency: Revisiting the original construct in educational research. *Educational Psychologist*, *43*(1), 16-26.
- Van Merriënboer, J. J., Kirschner, P. A., & Kester, L. (2003). Taking the load off a learner's mind: Instructional design for complex learning. *Educational psychologist*, *38*(1), 5-13.
- Van Meter, P., Aleksic, M., Schwartz, A., & Garner, J. (2006). Learner-generated drawing as a strategy for learning from content area text. *Contemporary Educational Psychology*, *31*(2), 142-166.
- Van Mil, M. H., Boerwinkel, D. J., & Waarlo, A. J. (2013). Modelling molecular mechanisms: A framework of scientific reasoning to construct molecular-level explanations for cellular behaviour. *Science & Education*, *22*(1), 93-118.

- Van Mil, M. H., Postma, P. A., Boerwinkel, D. J., Klaassen, K., & Waarlo, A. J. (2016). Molecular mechanistic reasoning: Toward bridging the gap between the molecular and cellular levels in life science education. *Science Education*, *100*(3), 517-585.
- Verhoeff, R. P., Waarlo, A. J., & Boersma, K. T. (2008). Systems modelling and the development of coherent understanding of cell biology. *International Journal of Science Education*, *30*(4), 543-568.
- Vessey, I. (1991). Cognitive Fit: A Theory-Based Analysis of the Graphs Versus Tables Literature. *Decision Sciences*, *22*(2), 219-240.
- Vessey, I. (1994). The effect of information presentation on decision making: A cost-benefit analysis. *Information & Management*, *27*(2), 103-119.
- Vessey, I., & Galletta, D. (1991). Cognitive fit: An empirical study of information acquisition. *Information Systems Research*, *2*(1), 63-84.
- Vinner, S., & Dreyfus, T. (1989). Images and definitions for the concept of function. *Journal for research in mathematics education*, *20*(4), 356-366.
- Vinner, S., Hershkowitz, R., & Bruckheimer, M. (1981). Some cognitive factors as causes of mistakes in the addition of fractions. *Journal for Research in Mathematics Education*, *12*(1), 70-76.
- Vogel, M. (2007). Multimediale Unterstützung zum Lesen von Funktionsgraphen. *mathematica didactica*, *30*(1), 3-28.
- Von Kotzebue, L. (2014). *Diagrammkompetenz als biologiedidaktische Aufgabe für die Lehrerbildung: Konzeption, Entwicklung und empirische Validierung eines Strukturmodells zum diagrammspezifischen Professionswissen im biologischen Kontext* (Dissertation). München: Technische Universität München.
- Von Kotzebue, L., Gerstl, M., & Nerdel, C. (2015). Common mistakes in the construction of diagrams in biological contexts. *Research in Science Education*, *45*(2), 193-213.
- Von Kotzebue, L., & Nerdel, C. (2012). Professionswissen von Biologielehrkräften zum Umgang mit Diagrammen Biology teachers' professional knowledge on handling with diagrams. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, *18*, 181-200.
- Von Kotzebue, L., & Nerdel, C. (2015). Modellierung und Analyse des Professionswissens zur Diagrammkompetenz bei angehenden Biologielehrkräften. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, *18*(4), 687-712.

- Vosniadou, S. (1994). Capturing and modeling the process of conceptual change. *Learning and instruction*, 4(1), 45-69.
- Vosniadou, S., & Brewer, W. F. (1992). Mental models of the earth: A study of conceptual change in childhood. *Cognitive psychology*, 24(4), 535-585.
- Vygotsky, L. S. (1980). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Cambridge: Harvard university press.
- Wainer, H. (1992). Understanding graphs and tables. *Educational researcher*, 21(1), 14-23.
- Wallman, K. K. (1993). Enhancing statistical literacy: Enriching our society. *Journal of the American Statistical Association*, 88(421), 1-8.
- Wang, C. Y., & Barrow, L. H. (2011). Characteristics and levels of sophistication: An analysis of chemistry students' ability to think with mental models. *Research in Science Education*, 41(4), 561-586.
- Wang, Z. H., Wei, S., Ding, W., Chen, X., Wang, X., & Hu, K. (2012). Students' Cognitive Reasoning of Graphs: Characteristics and progression. *International Journal of Science Education*, 34(13), 2015-2041.
- Warden, A. C., Little, B. A., & Haritos, V. S. (2011). A cellular automaton model of crystalline cellulose hydrolysis by cellulases. *Biotechnology for biofuels*, 4(39), 1-14.
- Wason, P. C. (1960). On the failure to eliminate hypotheses in a conceptual task. *Quarterly journal of experimental psychology*, 12(3), 129-140.
- Watson, J., & Callingham, R. (2003). Statistical literacy: A complex hierarchical construct. *Statistics Education Research Journal*, 2(2), 3-46.
- Watson, J.M., Kelly, B.A., & Izard, J.F. (2005). Statistical literacy over a decade. In P. Clarkson, A. Downton, D. Gronn, M. Horne, A. McDonough, R. Pierce, & A. Roche (Hrsg.), *Building connections: Theory, research and practice* (Proceedings of the 28th annual conference of the Mathematics Education Research Group of Australasia, Melbourne, S. 775-782). Sydney: MERGA.
- Weidenmann, B. (1989). 9 When Good Pictures Fail: An Information-Processing Approach to the Effect of Illustrations. *Advances in psychology*, 58, 157-170.
- Weidenmann, B. (1994). Informierende Bilder. In: Weidenmann, B. (Hrsg.), *Wissenserwerb mit Bildern: Instruktionale Bilder in Printmedien, Film/Video und Computerprogrammen* (S. 59–94). Bern: Hans Huber.

- Weintraub, S. (1967). Reading graphs, charts and diagrams. *Reading Teacher*, 20, 345-349.
- Westermann, R. (2016). *Methoden psychologischer Forschung und Evaluation: Grundlagen, Gütekriterien und Anwendungen*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Wetzels, S. A., Kester, L., & Van Merriënboer, J. J. (2011). Adapting prior knowledge activation: Mobilisation, perspective taking, and learners' prior knowledge. *Computers in Human Behavior*, 27(1), 16-21.
- Wild, C. J., & Pfannkuch, M. (1999). Statistical thinking in empirical enquiry. *International statistical review*, 67(3), 223-248.
- Winn, W. (1991). Learning from maps and diagrams. *Educational Psychology Review*, 3(3), 211-247.
- Winn, W. (1994). Contributions of perceptual and cognitive processes to the comprehension of graphics. *Advances in psychology*, 108, 3-27.
- Wolff, H.-G., & Bacher, J. (2010). Hauptkomponentenanalyse und explorative Faktorenanalyse. In C. Wolf und H. Best (Hrsg.), *Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse* (S. 333–365). Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- Woodward, J. (2003). *Making things happen: A theory of causal explanation*. Oxford: Oxford university press.
- Wu, H. K., & Krajcik, J. S. (2006). Inscriptional practices in two inquiry-based classrooms: A case study of seventh graders' use of data tables and graphs. *Journal of research in science teaching*, 43(1), 63-95.
- Wu, Y. (2004). *Singapore secondary school students' understanding of statistical graphs*. Paper presented at the 10th International Congress on Mathematics Education (ICME-10). Copenhagen, Denmark. Abgerufen von <https://iase-web.org/documents/papers/icme10/Yingkang.pdf>, letzter Zugriff: 19.07.2019.
- Wu, Y., & Wong, K. Y. (2009) Understanding of statistical graphs among Singapore secondary students. In K. Y. Wong, P. Y. Lee, B. Kaur, P. Y. Foong & S. F. Ng (Hrsg.), *Mathematics Education: The Singapore Journey* (S. 227-243). Singapore: World Scientific.
- Xi, X. (2005). Do visual chunks and planning impact performance on the graph description task in the SPEAK exam? *Language Testing*, 22(4), 463-508.
- Yip, D. Y. (1998). Identification of misconceptions in novice biology teachers and remedial strategies for improving biology learning. *International Journal of Science Education*, 20(4), 461-477.

Zander, S. (2010). *Motivationale Lernervoraussetzungen in der Cognitive Load Theory: zwei Studien zum Einfluss motivationaler Lernervoraussetzungen auf die kognitive Belastung beim Lernen mit unterschiedlichen Instruktionsdesigns* (Bd. 18). Berlin: Logos.

Zhang, J. (1997). The nature of external representations in problem solving. *Cognitive science*, 21(2), 179-217.

Zheng, R. Z., Gupta, U., & Dewald, A. (2012). Does the Format of Pretraining Matter? A Study on the Effects of Different Pretraining Approaches on Prior Knowledge Construction in an Online Learning Environment. *International Journal of Cyber Behavior, Psychology and Learning (IJCBPL)*, 2(2), 35-47.

Ziepprecht, K. (2016). *Strategien und Kompetenzen von Lernenden beim Erschließen von biologischen Informationen aus unterschiedlichen Repräsentationen* (Bd. 15). Berlin: Logos.

Zuckerman, J. T. (1994). Problem solver's conceptions about osmosis. *The American Biology Teacher*, 56(1), 22-25.

Zumbach, J. (2003). *Problembasiertes Lernen*. Münster: Waxmann.

Zumbach, J., Haider, K., & Mandl, H. (2008). Fallbasiertes Lernen: Theoretischer Hintergrund und praktische Anwendung. In J. Zumbach, H. Mandl, (Hrsg.), *Pädagogische Psychologie in Theorie und Praxis: ein fallbasiertes Lehrbuch* (S. 1-14). Göttingen: Hogrefe.

14. Anhang

14.1. Titelblatt des Untersuchungsheftes

Angaben zur Person

*Die Teilnahme an dieser Untersuchung ist **anonym**. Ihre Ergebnisse werden nicht an Ihre Lehrkraft übermittelt!*

Zur Vereinfachung der Auswertung erhält jeder Teilnehmer einen 6-stelligen Code. Diesen Code ermitteln Sie bitte selbst, indem Sie die Tabelle ausfüllen:

<i>Tragen Sie bitte in diese Zeile die <u>ersten</u> beiden Buchstaben des <u>Vornamens Ihrer Mutter</u> ein (z. B. Monika → MO)</i>		
<i>Tragen Sie bitte in diese Zeile die <u>ersten</u> beiden Buchstaben des <u>Vornamens Ihres Vaters</u> ein (z. B. Jürgen → Juergen → JU)</i>		
<i>Tragen Sie bitte in diese Zeile die <u>ersten</u> beiden Ziffern Ihres Geburtsdatums ein (z. B. 04.08.2000 → 04)</i>		

Datum: _____ Geschlecht: weiblich männlich

Schule: _____ Alter: _____ Jahrgangsstufe: _____

Welche Note hatten Sie auf Ihrem letzten Zeugnis in ...

Biologie? _____

Mathematik? _____

Bitte umblättern! 149

¹⁴⁹ Die Biologie- und Mathenoten wurden in der Untersuchung nicht berücksichtigt, da zahlreiche Lernende sich entweder nicht mehr an ihre Noten erinnern konnten oder diese nicht angeben wollten. Damit die Lernenden sich vollständig auf die nachfolgenden Aufgaben konzentrieren konnten, durften sie die beiden Felder frei lassen.

14.2. Vorwissenstest

Bitte beantworten Sie alle Fragen! Wenn Sie sich unsicher sind, so wählen Sie die Antwort, die Ihnen am wahrscheinlichsten erscheint.

Bei den folgenden 18 Fragen ist jeweils nur eine Antwort richtig. Kreuzen Sie diese an!

1. Aus welchen Grundbausteinen sind die meisten Enzyme aufgebaut?

- Fettsäuren
- Nukleinsäuren
- Aminosäuren
- Zuckersäuren

2. Ein Enzym-Substrat-Komplex ist dadurch charakterisiert, dass ein Substrat sich...

- dauerhaft mit einem Enzym verbindet
- vorübergehend mit einem Enzym verbindet
- dauerhaft mit mehreren Enzymen verbindet
- vorübergehend mit mehreren Enzymen verbindet

3. Ein Enzym, das eine Reaktion katalysiert hat, geht aus dieser Reaktion typischerweise wie hervor?

- unverändert
- in der Stabilität verändert
- in der räumlichen Struktur verändert
- in der Ladung verändert

4. Welche Enzymstruktur lässt sich als langgezogene Kette darstellen?

- Primärstruktur
- Sekundärstruktur
- Tertiärstruktur
- Quartärstruktur

5. Enzyme beschleunigen chemische Reaktionen, indem sie die für die Reaktion notwendige Aktivierungsenergie...

- erhöhen
- senken
- zunächst erhöhen und dann senken
- zunächst senken und dann erhöhen

6. Die meisten Enzyme gehören zur Stoffgruppe der...

- Zucker (auch Kohlenhydrate genannt)
- Fette (auch Lipide genannt)
- Eiweiße (auch Proteine genannt)
- Nukleinsäuren

7. Welcher Vorgang ist in der Abbildung dargestellt?



- allosterische Hemmung
- allosterische Aktivierung
- kompetitive Hemmung
- kompetitive Aktivierung

8. Wenn ein Enzym „denaturiert“ wird, dann wird dieses Enzym...

- abgebaut
- gespalten
- in seinen Grundbausteinen verändert
- in seiner räumlichen Struktur verändert

9. Was wird durch das Enzym *Amylase* abgebaut?
- Stärke
 - Cellulose
 - EiweiÙe (auch Proteine genannt)
 - Fette (auch Lipide genannt)
10. Nachdem ein Enzym ein Substrat zu einem Produkt umgesetzt und sich das Produkt vom Enzym gelöst hat, steht das Enzym meist...
- nicht mehr für weitere Reaktionen zur Verfügung
 - unmittelbar für weitere Reaktionen zur Verfügung
 - nach einer gewissen Zeit für weitere Reaktionen zur Verfügung
 - nach Aktivierung durch ein anderes Enzym für weitere Reaktionen zur Verfügung
11. Kompetitive Hemmstoffe binden an das...
- aktive Zentrum
 - allosterische Zentrum
 - inaktive Zentrum
 - kompetitive Zentrum
12. Der Begriff Wirkungsspezifität drückt aus, dass jedes Enzym in der Regel nur...
- an einem bestimmten Substrat wirken kann
 - unter bestimmten Bedingungen wirken kann
 - eine bestimmte Veränderung des Substrates bewirken kann
 - an einer bestimmten Stelle im Körper wirken kann
13. Die meisten Enzyme, die im menschlichen Organismus aktiv sind, werden...
- über die Nahrung aufgenommen
 - in Zellen produziert
 - im Speichel produziert
 - Im Blut produziert
14. Ohne Enzyme kann ein Mensch nicht überleben, weil ohne Enzyme zahlreiche chemische Reaktionen im Körper viel zu...
- langsam ablaufen würden
 - schnell ablaufen würden
 - unkontrolliert ablaufen würden
 - häufig ablaufen würden
15. Enzymatische Reaktionen lassen sich durch eine Erhöhung der Temperatur beschleunigen, weil bei höherer Temperatur...
- Enzym und Substrat sich schneller bewegen und deshalb häufiger aufeinander treffen
 - Enzyme sich leichter verformen lassen und deshalb Substrate leichter binden können
 - jedes einzelne Enzym schneller arbeiten und deshalb Substrate schneller umsetzen kann
 - Enzyme näher an ihrem Temperaturoptimum arbeiten und deshalb weniger Energie für die Umsetzung von Substraten benötigen
16. Ein allosterischer Aktivator steigert die Enzymaktivität, indem er die...
- räumliche Struktur des Enzyms verändert
 - räumliche Struktur des Substrates verändert
 - Aktivierungsenergie senkt
 - Aktivierungsenergie erhöht
17. Ein kompetitiver Hemmstoff hemmt die Enzymaktivität umso stärker, je ähnlicher dieser dem...
- Produkt ist
 - Substrat ist
 - aktiven Zentrum ist
 - allosterischen Zentrum ist
18. Der hemmende Einfluss eines kompetitiven Hemmstoffes, lässt sich verringern durch eine Erhöhung der...
- Produktkonzentration
 - Reaktionszeit
 - Substratkonzentration
 - Temperatur

Bitte umblättern!

Bei den folgenden acht Fragen können eine, mehrere oder alle Antworten zutreffen. Kreuzen Sie bei jeder Antwort an, ob diese zutrifft oder nicht zutrifft!

19. An welchen Vorgängen sind Enzyme beteiligt?
- | | | | | |
|-----------------------|-----------|--------------------------|-----------------|--------------------------|
| Abbau von Molekülen | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| Aufbau von Molekülen | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| Diffusion von Stoffen | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| Bindung von Antigenen | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
20. Am aktiven Zentrum kann...
- | | | | | |
|---|-----------|--------------------------|-----------------|--------------------------|
| das Substrat binden | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| ein kompetitiver Hemmstoff binden | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| ein allosterischer Hemmstoff binden | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| die Umsetzung von Substrat zu Produkt stattfinden | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
21. Die maximal mögliche Anzahl an Produktmolekülen, die bei einer enzymatischen Reaktion entstehen können, lässt sich steigern durch eine Erhöhung der...
- | | | | | |
|-----------------------|-----------|--------------------------|-----------------|--------------------------|
| Substratkonzentration | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| Enzymkonzentration | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| Reaktionszeit | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| Temperatur | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
22. Bei welchen Typen von Enzymhemmungen verringert eine Erhöhung der Substratkonzentration die Stärke der Hemmung?
- | | | | | |
|---|-----------|--------------------------|-----------------|--------------------------|
| kompetitive Hemmung durch einen Hemmstoff | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| allosterische Hemmung durch einen Hemmstoff | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| Hemmung durch Veränderung des pH-Wertes | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| Hemmung durch Metallionen | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
23. Die Wahrscheinlichkeit, dass Enzym und Substrat aufeinander treffen, kann gesteigert werden durch eine Erhöhung der...
- | | | | | |
|-----------------------|-----------|--------------------------|-----------------|--------------------------|
| Substratkonzentration | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| Produktkonzentration | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| Enzymkonzentration | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| Temperatur | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
24. Typischerweise gilt für Enzyme, dass diese...
- | | | | | |
|--|-----------|--------------------------|-----------------|--------------------------|
| jeweils nur ein bestimmtes Substrat umsetzen | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| jeweils nur bei einer bestimmten Reaktion wirken | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| unempfindlich gegenüber großer Hitze sind | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| unempfindlich gegenüber großer Kälte sind | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
25. Im menschlichen Organismus sind Enzyme verantwortlich für ...
- | | | | | |
|---|-----------|--------------------------|-----------------|--------------------------|
| die Spaltung größerer Moleküle zu kleineren Molekülen | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| die Beschleunigung von Stoffwechselreaktionen | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| die Speicherung von Erbinformationen | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| den Transport von Stoffen durch den Körper | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
26. Welche Bindungen sind entscheidend für die Ausbildung der Primärstruktur eines Enzyms?
- | | | | | |
|--|-----------|--------------------------|-----------------|--------------------------|
| Amidbindungen (auch Peptidbindungen genannt) | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| Wasserstoffbrückenbindungen | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| Disulfidbrückenbindungen | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |
| Ionenbindungen | Trifft zu | <input type="checkbox"/> | Trifft nicht zu | <input type="checkbox"/> |

14.3. Lernmaterialien

14.3.1. Lernmaterialien der Interventionsgruppe-I-S-EI-Erk

Auswertung eines Laborexperimentes

In einem Laborexperiment wurde der Einfluss unterschiedlicher Konzentrationen von Enzym- und Substratmolekülen auf eine enzymatische Reaktion untersucht. Die Reaktion ist bekannt:

Ein Substratmolekül wird enzymatisch vollständig zu zwei Produktmolekülen gespalten.

Durchführung des Laborexperimentes:

In dem Experiment wurden drei Versuche durchgeführt (siehe Tabelle 1): In Versuch A wurde eine Enzymkonzentration (EK) und eine Substratkonzentration (SK) von jeweils 6 mmol/L verwendet. In Versuch $EK_{0,5}$ wurde die enzymatische Reaktion mit halber Enzymkonzentration durchgeführt. Der Versuch $SK_{0,5}$ wurde mit halber Substratkonzentration durchgeführt.

Tabelle 1 Übersicht über die drei Versuche (A, $EK_{0,5}$ und $SK_{0,5}$)

Versuche	Enzymkonzentration (EK) [mmol/L]	Substratkonzentration (SK) [mmol/L]
Versuch A	6	6
Versuch $EK_{0,5}$	3	6
Versuch $SK_{0,5}$	6	3

In allen drei Versuchen wurde über 20 Minuten jeweils die Zunahme der Produktkonzentration im Verlauf der Zeit gemessen. Die gemessene Zunahme der Produktkonzentration wurde in das auf der rechten Seite abgebildete Diagramm (Abbildung 1) eingetragen.

Die Produktkonzentration gibt an, wie viele Produktmoleküle zu jedem Zeitpunkt in den jeweiligen Versuchsgefäßen (Reagenzgläsern) vorliegen. Die Zeit gibt an, wie viele Minuten seit Beginn der Reaktion vergangen sind.

Vorbereitungsaufgaben:

1. Teilen Sie das rechts dargestellte Diagramm in Hinblick auf die Veränderung der Produktkonzentration in drei Zeitabschnitte ein.
2. Formulieren Sie zu jedem Zeitabschnitt eine Wieso/Warum-Frage. Formulieren Sie z. B. so: „Wieso steigt die Produktkonzentration (PK) in Zeitabschnitt 1...?“
3. Formulieren Sie zusätzlich mindestens 3 Fragen zum Vergleich der drei Versuchsansätze. Schreiben Sie die Fragen an die Graphen. Formulieren Sie z. B. so: „Wieso steigt die Produktkonzentration (PK) in Versuch A schneller an als ...?“

Das Stellen von Fragen an die Zeitabschnitte und an die Graphen soll Ihr Gehirn zum Nachdenken über das Diagramm anregen.

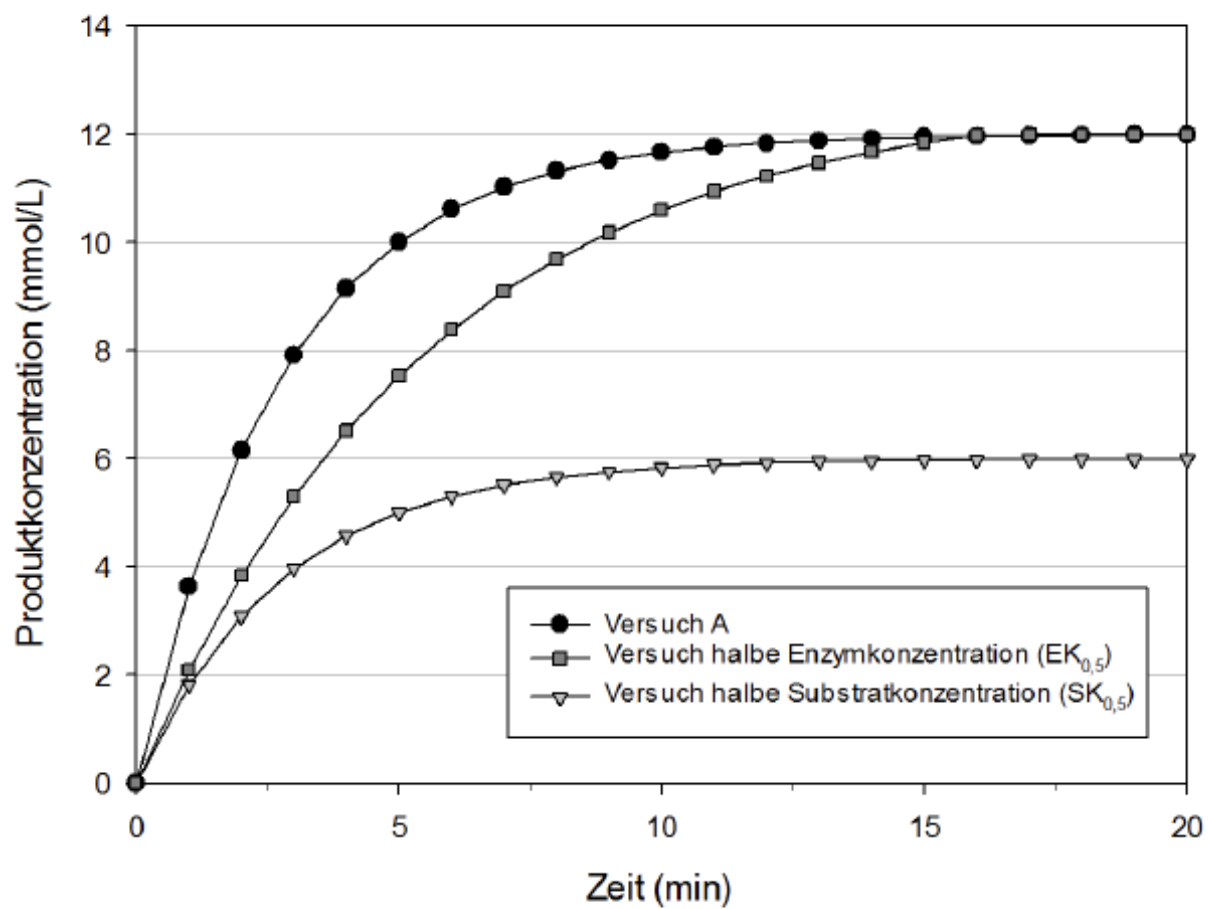


Abbildung 1: Veränderung der Produktkonzentration in drei Versuchen (A, EK_{0,5} und SK_{0,5}).

Bitte umblättern!

Aufgabe:
Schauen Sie jetzt nochmal zurück auf die von Ihnen gestellten Fragen und überprüfen Sie, ob Sie alle Fragen beantwortet haben. Ergänzen Sie Ihre Erklärung gegebenenfalls.

14.3.2. Lernmaterialien der Kontrollgruppe-K-Erk

Auswertung eines Laborexperimentes

In einem Laborexperiment wurde der Einfluss unterschiedlicher Konzentrationen von Enzym- und Substratmolekülen auf eine enzymatische Reaktion untersucht. Die Reaktion ist bekannt:

Ein Substratmolekül wird enzymatisch vollständig zu zwei Produktmolekülen gespalten.

Durchführung des Laborexperimentes:

In dem Experiment wurden drei Versuche durchgeführt (siehe Tabelle 1): In Versuch A wurde eine Enzymkonzentration (EK) und eine Substratkonzentration (SK) von jeweils 6 mmol/L verwendet. In Versuch $EK_{0,5}$ wurde die enzymatische Reaktion mit halber Enzymkonzentration durchgeführt. Der Versuch $SK_{0,5}$ wurde mit halber Substratkonzentration durchgeführt.

Tabelle 1 Übersicht über die drei Versuche (A, $EK_{0,5}$ und $SK_{0,5}$)

Versuche	Enzymkonzentration (EK) [mmol/L]	Substratkonzentration (SK) [mmol/L]
Versuch A	6	6
Versuch $EK_{0,5}$	3	6
Versuch $SK_{0,5}$	6	3

In allen drei Versuchen wurde über 20 Minuten jeweils die Zunahme der Produktkonzentration im Verlauf der Zeit gemessen. Die gemessene Zunahme der Produktkonzentration wurde in das unten abgebildete Diagramm (Abbildung 1) eingetragen.

Die Produktkonzentration gibt an, wie viele Produktmoleküle zu jedem Zeitpunkt in den jeweiligen Versuchsgefäßen (Reagenzglasern) vorliegen. Die Zeit gibt an, wie viele Minuten seit Beginn der Reaktion vergangen sind.

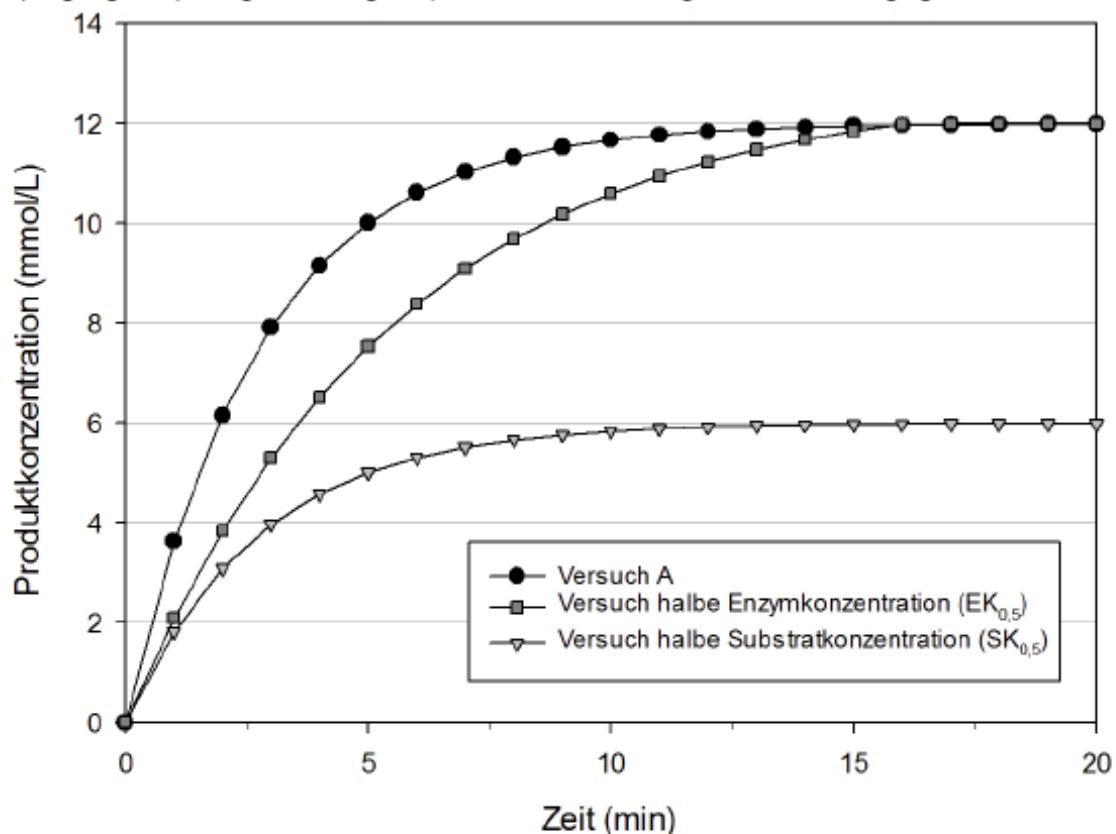


Abbildung 1: Veränderung der Produktkonzentration in drei Versuchen (A, $EK_{0,5}$ und $SK_{0,5}$).

Aufgabe:
Fällt Ihnen noch etwas ein, das Sie bei Ihrer Erklärung bisher vergessen haben? Ergänzen Sie Ihre Erklärung.

14.3.3. Lernmaterialien der Interventionsgruppe I-KA-S-EI-Erk

Auswertung eines Laborexperiments

In einem Laborexperiment wurde der Einfluss unterschiedlicher Konzentrationen von Enzym- und Substratmolekülen auf eine enzymatische Reaktion untersucht. Die Reaktion ist bekannt:

Ein Substratmolekül wird enzymatisch vollständig zu zwei Produktmolekülen gespalten.

Aufgabe 1: Skizzieren Sie in dem freien Feld den Ablauf der beschriebenen enzymatischen Reaktion und beschriften Sie Ihre Skizze. Nutzen Sie dafür die folgenden Symbole:



Substratmolekül



Enzymmolekül



Produktmolekül



Abbildung 1: Skizze der enzymatischen Spaltung eines Substratmoleküls zu zwei Produktmolekülen

Bitte umblättern!

Durchführung des Laborexperimentes – Teil 1:

In dem Experiment wurden drei Versuche durchgeführt (siehe Tabelle 1): In Versuch A wurde eine Enzymkonzentration (EK) und eine Substratkonzentration (SK) von jeweils 6 mmol/L verwendet. In Versuch EK_{0,5} wurde die enzymatische Reaktion mit halber Enzymkonzentration durchgeführt. Der Versuch SK_{0,5} wurde mit halber Substratkonzentration durchgeführt.

Tabelle 1: Übersicht über die drei Versuche (A, EK_{0,5} und SK_{0,5})

Versuche	Enzymkonzentration (EK) [mmol/L]	Substratkonzentration (SK) [mmol/L]
Versuch A	6	6
Versuch EK _{0,5}	3	6
Versuch SK _{0,5}	6	3

Aufgabe 2: Skizzieren Sie mit Hilfe von Tabelle 1 und dem Reagenzglas zu Versuch A in den beiden leeren Reagenzgläsern die Anzahl von Enzym- und Substratmolekülen für die Versuche EK_{0,5} und SK_{0,5}.

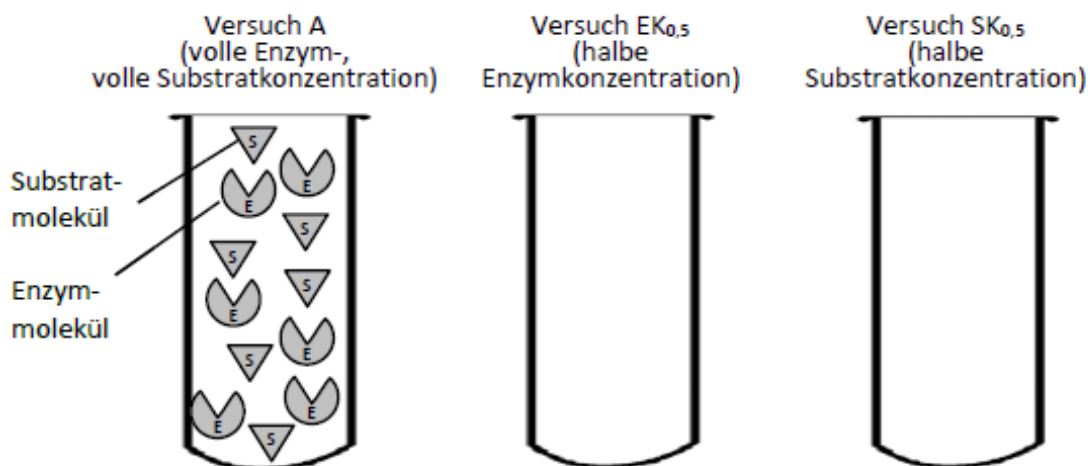


Abbildung 2: Skizze der Anzahl von Enzym- und Substratmolekülen in den Reagenzgläsern der drei Versuche zu Beginn der Reaktion

Aufgabe 3: Vergleichen Sie Wahrscheinlichkeit des Aufeinandertreffens von Enzym- und Substratmolekülen in den drei Versuchen miteinander. Tragen Sie die folgenden Begriffe in die 6 Zellen von Tabelle 2 ein.

- hohe Wahrscheinlichkeit (Aussage nur 1 x nutzen)
- mittlere Wahrscheinlichkeit (Aussage nur 2 x nutzen)
- geringe Wahrscheinlichkeit (Aussage nur 3 x nutzen)

Tabelle 2: Übersicht über die Wahrscheinlichkeit des Aufeinandertreffens von Enzym- und Substratmolekülen in den drei Versuchen

	Versuch A	Versuch EK _{0,5}	Versuch SK _{0,5}
zu Beginn der Reaktion			
am Ende der Reaktion			

Aufgaben:

4. Streichen Sie im Text (Durchführung des Laborexperimentes – Teil 2) mit Hilfe der Achsen des Diagramms (Abbildung 3) jeweils bei den unterstrichenen Alternativen die nicht zutreffende Alternative durch. (Beispiel: trifft zu / ~~trifft nicht zu~~)
5. Skizzieren Sie in Abbildung 3 in Form von drei Graphen, die Messergebnisse, die Sie in Hinblick auf die Zunahme der Produktkonzentration in den drei Versuchen erwarten. Beschriften Sie die drei Graphen mit Versuch A, $E_{K_{0,5}}$ und $SK_{0,5}$.

Durchführung des Laborexperimentes – Teil 2:

In allen drei Versuchen wurde über 20 Minuten jeweils die Zunahme der Produktkonzentration / Zeit im Verlauf der Produktkonzentration / Zeit gemessen. Die gemessene Zunahme der Produktkonzentration / Substratkonzentration wird in das unten abgebildete Diagramm (Abbildung 3) eingetragen.

Die Produktkonzentration gibt an, wie viele Produktmoleküle / Substratmoleküle zu jedem Zeitpunkt in den jeweiligen Versuchsgefäßen (Reagenzglasern) vorliegen. Die Zeit gibt an, wie viele Minuten seit Beginn der Reaktion vergangen sind.

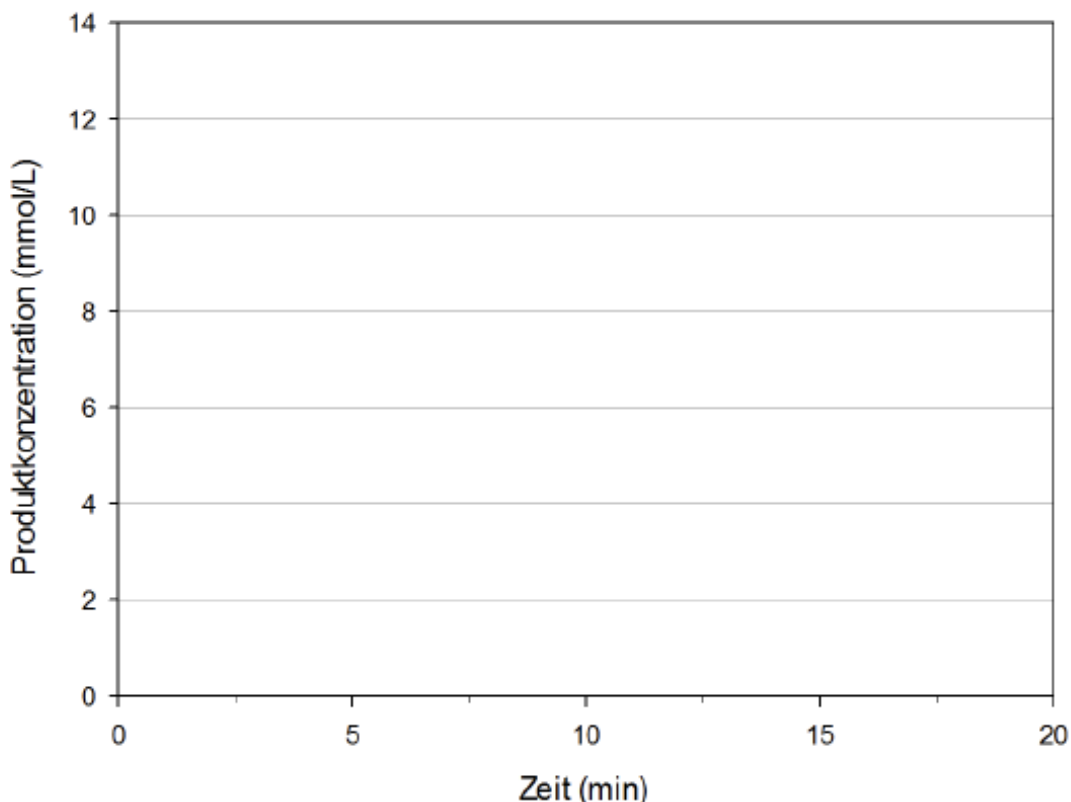


Abbildung 3: Veränderung der Produktkonzentration in drei Versuchen (A, $E_{K_{0,5}}$ und $SK_{0,5}$).

ACHTUNG:

Die Lösung zu Aufgabe 5 finden Sie auf der nächsten Seite. Bitte blättern Sie daher erst um, wenn Sie die drei Graphen gezeichnet haben.

Aufgaben:

- Teilen Sie das unten dargestellte Diagramm (Abbildung 4) in Hinblick auf die Veränderung der Produktkonzentration in drei Zeitabschnitte ein.
- Formulieren Sie zu jedem Zeitabschnitt eine Wieso/Warum-Frage. Formulieren Sie z. B. so: „Wieso steigt die Produktkonzentration (PK) in Zeitabschnitt 1...?“
- Formulieren Sie zusätzlich mindestens 3 Fragen zum Vergleich der drei Versuchsansätze. Schreiben Sie die Fragen an die Graphen. Formulieren Sie z. B. so: „Wieso steigt die Produktkonzentration (PK) in Versuch A schneller an als ...?“

Das Stellen von Fragen an die Zeitabschnitte und an die Graphen soll Ihr Gehirn zum Nachdenken über das Diagramm anregen.

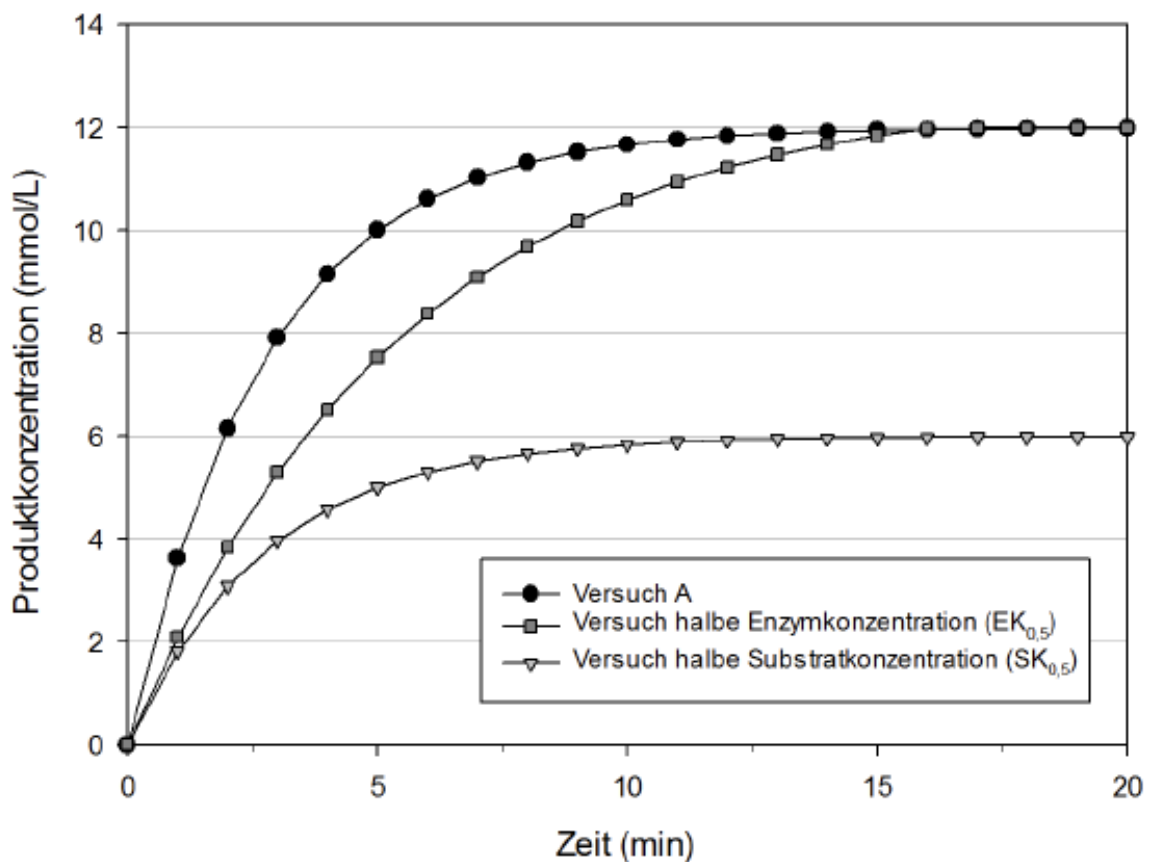


Abbildung 4: Veränderung der Produktkonzentration in drei Versuchen (A, EK_{0,5} und SK_{0,5}).

Aufgabe:
Schauen Sie jetzt nochmal zurück auf Ihre Lösungen zu den Aufgaben 2 und 3 (Skizze der Anzahl von Teilchen in den Reagenzgläsern, Tabelle mit Wahrscheinlichkeit des Aufeinandertreffens) und überlegen Sie, ob Sie Ihre Erklärung des Diagramms noch ergänzen können.

14.3.4. Lernmaterialien der Kontrollgruppe K-Erk-Be-nErk

Auswertung eines Laborexperimentes

In einem Laborexperiment wurde der Einfluss unterschiedlicher Konzentrationen von Enzym- und Substratmolekülen auf eine enzymatische Reaktion untersucht. Die Reaktion ist bekannt:

Ein Substratmolekül wird enzymatisch vollständig zu zwei Produktmolekülen gespalten.

Durchführung des Laborexperimentes:

In dem Experiment wurden drei Versuche durchgeführt (siehe Tabelle 1): In Versuch A wurde eine Enzymkonzentration (EK) und eine Substratkonzentration (SK) von jeweils 6 mmol/L verwendet. In Versuch $EK_{0,5}$ wurde die enzymatische Reaktion mit halber Enzymkonzentration durchgeführt. Der Versuch $SK_{0,5}$ wurde mit halber Substratkonzentration durchgeführt.

Tabelle 1 Übersicht über die drei Versuche (A, $EK_{0,5}$ und $SK_{0,5}$)

Versuche	Enzymkonzentration (EK) [mmol/L]	Substratkonzentration (SK) [mmol/L]
Versuch A	6	6
Versuch $EK_{0,5}$	3	6
Versuch $SK_{0,5}$	6	3

In allen drei Versuchen wurde über 20 Minuten jeweils die Zunahme der Produktkonzentration im Verlauf der Zeit gemessen. Die gemessene Zunahme der Produktkonzentration wurde in das unten abgebildete Diagramm (Abbildung 1) eingetragen.

Die Produktkonzentration gibt an, wie viele Produktmoleküle zu jedem Zeitpunkt in den jeweiligen Versuchsgläsern vorliegen. Die Zeit gibt an, wie viele Minuten seit Beginn der Reaktion vergangen sind.

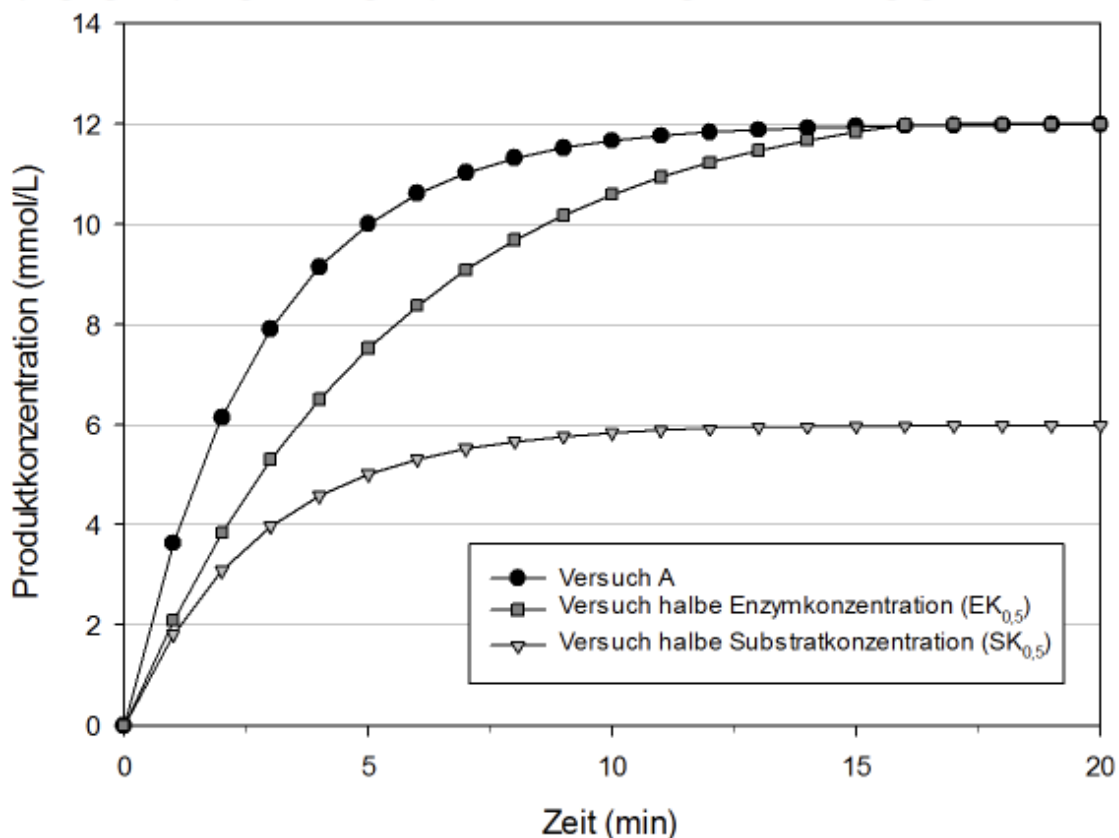


Abbildung 1: Veränderung der Produktkonzentration in drei Versuchen (A, $EK_{0,5}$ und $SK_{0,5}$).

Aufgabe 3:
Fällt Ihnen jetzt noch etwas ein, das Sie bei Ihrer Erklärung vergessen haben? Ergänzen Sie Ihre Erklärung an dieser Stelle.

14.3.5. Lernmaterialien der Kontrollgruppe-K-Be-Erk

Auswertung eines Laborexperimentes

In einem Laborexperiment wurde der Einfluss unterschiedlicher Konzentrationen von Enzym- und Substratmolekülen auf eine enzymatische Reaktion untersucht. Die Reaktion ist bekannt:

Ein Substratmolekül wird enzymatisch vollständig zu zwei Produktmolekülen gespalten.

Durchführung des Laborexperimentes:

In dem Experiment wurden drei Versuche durchgeführt (siehe Tabelle 1): In Versuch A wurde eine Enzymkonzentration (EK) und eine Substratkonzentration (SK) von jeweils 6 mmol/L verwendet. In Versuch $EK_{0,5}$ wurde die enzymatische Reaktion mit halber Enzymkonzentration durchgeführt. Der Versuch $SK_{0,5}$ wurde mit halber Substratkonzentration durchgeführt.

Tabelle 1 Übersicht über die drei Versuche (A, $EK_{0,5}$ und $SK_{0,5}$)

Versuche	Enzymkonzentration (EK) [mmol/L]	Substratkonzentration (SK) [mmol/L]
Versuch A	6	6
Versuch $EK_{0,5}$	3	6
Versuch $SK_{0,5}$	6	3

In allen drei Versuchen wurde über 20 Minuten jeweils die Zunahme der Produktkonzentration im Verlauf der Zeit gemessen. Die gemessene Zunahme der Produktkonzentration wurde in das unten abgebildete Diagramm (Abbildung 1) eingetragen.

Die Produktkonzentration gibt an, wie viele Produktmoleküle zu jedem Zeitpunkt in den jeweiligen Versuchsgefäßen (Reagenzglasern) vorliegen. Die Zeit gibt an, wie viele Minuten seit Beginn der Reaktion vergangen sind.

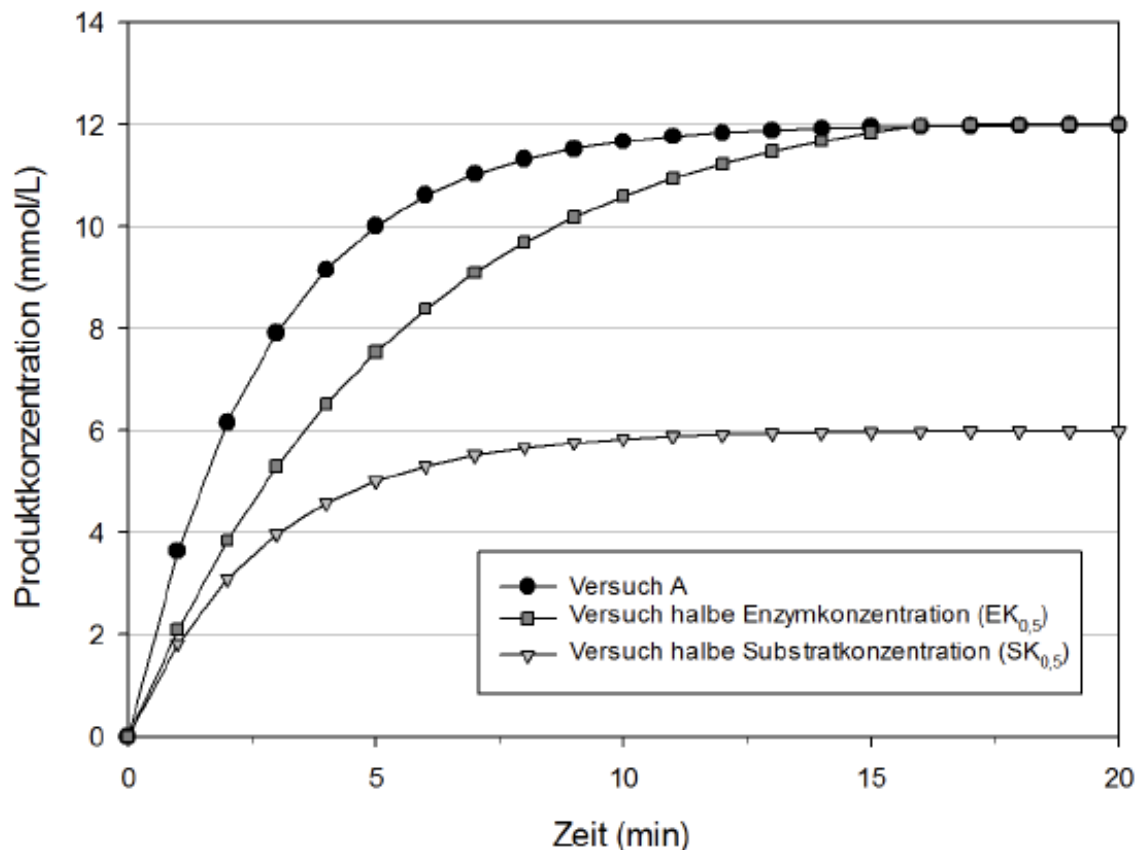


Abbildung 1: Veränderung der Produktkonzentration in drei Versuchen (A, $EK_{0,5}$ und $SK_{0,5}$).

Überlegen Sie nochmal, ob Sie bei Ihrer Beschreibung etwas vergessen haben. Ergänzen Sie Ihre Beschreibung ggf. an dieser Stelle.

Überlegen Sie nochmal, ob Sie bei Ihrer Erklärung etwas vergessen haben. Ergänzen Sie Ihre Erklärung ggf. an dieser Stelle.

14.4. Selbsteinschätzung

Sie sind nun am Ende der Untersuchung angelangt. Bitte beantworten Sie abschließend die folgenden Fragen, indem Sie die entsprechenden Antworten ankreuzen.

	sehr erfolgreich							überhaupt nicht erfolgreich
		1	2	3	4	5	6	7
1. Wie erfolgreich waren Sie Ihrer Meinung nach beim Erklären des Diagramms?								

	sehr wenig							sehr viel
		1	2	3	4	5	6	7
2. Wie viel geistige Denk-Anstrengung mussten Sie aufwenden, um das Diagramm zu erklären?								

	sehr leicht							sehr schwer
		1	2	3	4	5	6	7
3. Wie leicht oder schwer finden Sie das Thema Enzymatik zum derzeitigen Zeitpunkt?								
4. Wie leicht oder schwer ist es Ihnen gefallen, das Diagramm zu verstehen?								
5. Wie leicht oder schwer ist es Ihnen gefallen, das Diagramm schriftlich zu erklären?								
6. Wie leicht oder schwer ist es Ihnen gefallen, die Informationen in dem Diagramm, mit dem zu verknüpfen, was Sie bereits über das Thema Enzymatik wussten?								

	sehr wenig							sehr stark
		1	2	3	4	5	6	7
7. Wie stark haben Sie sich beim Erklären der Graphen konzentriert?								
8. Wie stark haben Sie sich beim Lesen des Diagramms konzentriert?								
9. Wie stark haben Sie sich angestrengt, um den Verlauf der Graphen zu verstehen?								
10. Was denken Sie, wie stark sich Ihre Klassenkameraden angestrengt haben, um das Diagramm zu verstehen?								
11. Wie stark haben Sie sich beim Bearbeiten der Vorbereitungsaufgaben konzentriert?								

	sehr wenig / leicht / verständlich							sehr stark / schwer / unverständlich
		1	2	3	4	5	6	7
12. Wie sehr mussten Sie sich anstrengen, um sich durch die Materialien zu navigieren?								
13. Wie leicht oder schwer fanden Sie es, mit den Materialien zu arbeiten?								
14. Wie leicht oder schwer fanden Sie es, alle Informationen zusammenzutragen, die Sie für das Erklären des Diagramms brauchten?								
15. Wie verständlich fanden Sie die hier gestellten Arbeitsaufträge?								