

Mit Lehm auf dem Weg zu den kleinsten Teilchen

– DISSERTATION –

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Pädagogik

vorgelegt von

Dipl.-Biologin Katharina Wurm

eingereicht bei der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität Siegen
Siegen 2017

gedruckt auf alterungsbeständigem holz- und säurefreiem Papier

Erstgutachter:	Prof. Dr. Martin Gröger
Zweitgutachter:	Prof. Dr. Hans-Peter Ziemek
Datum der Disputation:	27.11.2017
Prüfer:	Prof. Dr. Martin Gröger Prof. Dr. Hans-Peter Ziemek Prof. Dr. Ralph Dreher Prof. Dr. Oliver Schwarz

Kurzfassung

Chemie und Natur - das hat in den Augen vieler Menschen nicht zwangsläufig etwas miteinander zu tun. Dabei bietet insbesondere das Lernen an und in der Natur zahlreiche Lernanlässe - auch für das „Laborfach“ Chemie. In diesem Sinne wird in der vorliegenden Arbeit untersucht, inwiefern mit Hilfe des Lerngegenstandes „Lehm“ eine Anbahnung chemischer Konzepte möglich ist. Der Fokus wird dabei zunächst auf das chemiebezogene Lernen im Sachunterricht der Grundschule gelegt, da gerade in diesem der Bezug zur Lebenswelt besonders bedeutsam ist.

Als methodischer Rahmen dient das Dortmunder Modell fachdidaktischer Entwicklungsforschung, durch welches eine praxisnahe Konzeption von Lerngegenständen angestrebt wird. Aufgrund der geringen Forschungslage hinsichtlich des Potenzials von Lehm für chemiebezogenes Lernen ist die Untersuchung explorativ angelegt und es werden qualitative Forschungsmethoden eingesetzt. Zunächst erfolgt eine fachliche Analyse zum Inhaltsfeld, wobei der Fokus auf die Eigenschaften des Lehms und beobachtbare Stoffumwandlungen gelegt wird. Eine anschließende didaktische Vorstrukturierung beinhaltet zum einen einen Überblick über bereits existierende Ansätze, zum anderen wird unter Bezug auf den Perspektivrahmen Sachunterricht und die Basiskonzepte für den Chemieunterricht eine inhaltliche Fokussierung vorgenommen.

In der anschließenden Untersuchung werden im Rahmen von Freiland-AGs die Vorstellungen von Grundschulkindern zu Lehm-bezogenen Phänomenen erhoben und analysiert. Im Zentrum der Untersuchung stehen dabei problemzentrierte Interviews sowie *teaching experiments* (Vermittlungsexperimente).

Die Analyse der Interviewdaten deutet darauf hin, dass insbesondere die vertiefende Auseinandersetzung mit der plastischen Verformbarkeit des Lehms ein hohes Potenzial für das chemiebezogene Lernen aufweist. Aufbauend auf den Vorstellungen der Kinder scheint hier eine Anbahnung des Struktur-Eigenschaftskonzeptes gut möglich zu sein. Zugleich werden durch die Untersuchung mögliche Lernhürden aufgedeckt. Ein weiterer Ertrag der Arbeit ist schließlich eine auf den gewonnen Erkenntnissen basierende Neu-Strukturierung des Lerngegenstandes im Sinne eines stufenweisen Aufbaus eines Struktur-Eigenschaftskonzeptes, wobei für jede Stufe mögliche Lernaktivitäten aufgezeigt werden.

Abstract

Chemistry and nature - in the view of many people this is not necessarily connected. And yet, especially learning in nature offers many chances to learn science - also for chemistry. In this context, the presented work analyses to what extent the topic *loam* can support the learning of basic chemical concepts. The focus is on chemical learning in primary school, because direct contact to the real environment is particularly important for learning at this age.

As methodological framework the "Dortmunder Modell fachdidaktischer Entwicklungsforschung" is chosen which was developed to design new learning environments in step with actual practice. Since there is only little research concerning the potential of loam for chemical learning, an explorative study following a qualitative research design is presented.

At first an overview of the technical basics of the topic is given. The focus lies on the properties of loam and observable chemical reactions. Subsequently former approaches are described in an educational analysis. Furthermore a first structuring with regard to content is described taking the *Perspektivrahmen Sachunterricht* and *Basiskonzepte für den Chemieunterricht* into account. Afterwards, a study dealing with primary school children's conceptions of the properties of loam is presented. The focus of the investigation lies on the analysis of problem-centered interviews and teaching experiments.

The results suggest that, in particular, dealing with the plasticity of loam offers a high potential for chemical learning. Based on children's conceptions an initiation of the basic concept *structure-property-relations* seems to be possible. Furthermore potential problems concerning learning with loam are revealed. A further accomplishment of this work is a new conception of the learning topic loam based on children's ideas and containing a stepwise development of the structure-property-concept. For each level activities to support learning are presented.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	x
1. Einleitung	1
2. Forschungsrahmen und theoretische Grundlagen	4
2.1. Entwicklungsforschung nach dem Dortmunder Modell	5
2.2. Eigene Forschung in Anlehnung an das Dortmunder Modell zur fachdidaktischen Entwicklungsforschung	7
2.3. Die Lernendenperspektive	8
2.3.1. Zur Bedeutung und zum Begriff der Lernendenperspektive	9
2.3.2. <i>Conceptual Change</i>	10
2.3.3. Vorstellungen in Bezug auf Chemie	12
2.3.4. Vorstellungen in Bezug auf die Geowissenschaften	15
3. Fachliche Grundlagen	18
3.1. Zusammensetzung des Lehms	20
3.1.1. Aufbau der Tonminerale	22
3.2. Eigenschaften des Lehms	24
3.2.1. Kationenaustauschvermögen	25
3.2.2. Plastizität, Quellen und Schwinden	25
3.2.3. Wasserkapazität, Wasseraufnahmevermögen	29
3.2.4. Lehmbrand	30
4. Lehm als Lerngegenstand	33
4.1. Lehm – ein Alltagsgegenstand	33
4.2. Ansätze zum naturwissenschaftliches Lernen anhand von Lehm	35
4.3. Überlegungen zum naturwissenschaftlichen Lernen anhand von Lehm	40
4.3.1. Basiskonzepte	40
4.3.2. Bezug von Lehm zu den Basiskonzepten	43
5. Erhebung der Lernendenperspektiven zum Lerngegenstand Lehm	47
5.1. Das Freilandlabor FLEX	47

Inhaltsverzeichnis

5.2.	Methodisches Vorgehen bei der Datenerhebung	48
5.2.1.	Überblick über den Forschungsprozess	49
5.2.2.	Problemzentrierte Interviews als Erhebungsinstrument	50
5.2.3.	<i>Teaching Experiments</i>	52
5.3.	Erste Erhebung im Freilandlabor FLEX	53
5.3.1.	Inhalt und Ablauf des Kurses	54
5.3.2.	Datenaufbereitung und -analyse	61
5.3.3.	Ergebnisse aus der ersten Erhebung (1. Analysestufe)	67
5.3.4.	Reflexion des ersten Kurses und Konsequenzen für die folgende Erhebung	75
5.4.	Zweite Erhebung im FLEX	77
5.4.1.	Inhaltliche Überarbeitungen und Struktur des Kurses	77
5.4.2.	Methodische Überarbeitungen	79
5.4.3.	Interviews und <i>teaching experiments</i> während des zweiten Kurses	82
5.4.4.	Datenaufbereitung- und analyse	87
6.	Ergebnisse	89
6.1.	Ergebnisse der kategorienbasierten Auswertung	89
6.2.	Effekte der methodischen Überarbeitungen und Auswertung der concept maps	95
6.2.1.	Einsatz von Arbeitsblättern	95
6.2.2.	<i>Concept map</i> und Verwendung des Teilchenbegriffs	95
6.3.	Ergebnisse der Feinanalyse	105
6.3.1.	Die Ausbaufähigkeit intuitiver Konzepte	105
6.3.2.	Die Phänomenabhängigkeit der Deutung	111
6.3.3.	Der Beitrag des teaching experiments zur Konzepterweiterung/-änderung	113
6.3.4.	Die Bedeutung der Gefügebene	117
6.3.5.	Auftretende Schwierigkeiten und Fehlvorstellungen	121
7.	Diskussion	127
7.1.	Diskussion der Ergebnisse zu intuitiven Konzepten	129
7.2.	Interpretation der Ergebnisse in Hinblick auf das Struktur-Eigenschaftskonzept	131
7.2.1.	Das Struktur-Eigenschaftskonzept	132
7.2.2.	Ebenen des Struktur-Eigenschaftskonzeptes	133
7.2.3.	Struktur-Eigenschaftsbeziehungen bezogen auf die Formbarkeit von Lehm	137
7.2.4.	Schlussfolgerungen zum Struktur-Eigenschaftskonzept	141
7.3.	Neustrukturierung des Lerngegenstandes	142
8.	Zusammenfassung und Ausblick	151
	Literaturverzeichnis	155
	Anhang	

- A. Transkriptionssystem und Codierleitfaden
- B. Arbeitsblätter (Kurs 2, Beispiele)
- C. Ergänzende Ergebnisdarstellungen
- D. Kategoriensystem *concept map*

Abbildungsverzeichnis

2.1. Dortmunder Modell fachdidaktischer Entwicklungsforschung	6
3.1. Korngrößendiagramm des Feinbodens	21
3.2. Struktur der Tonminerale	23
3.3. Kaolinit- und Halloysitminerale	23
3.4. Aufbau eines Dreischichttonminerals.	24
3.5. Ein- und zweifach geladene Kationen an der Tonmineraloberfläche.	28
3.6. Kaolinit und Mullit	31
5.1. Bodenprofil im Freilandlabor FLEX	48
5.2. Übersicht über die Untersuchung	49
5.3. Struktur des ersten Kurses	55
5.4. Elektronenmikroskopische Aufnahmen von Quarz und Tonmineral	57
5.5. Strukturierende Inhaltsanalyse nach Kuckartz	62
5.6. Übersicht über die Analyseschritte des Phänomens Formbarkeit	64
5.7. Ausschnitt aus der erstellten <i>summary</i>	66
5.8. Kategoriensystem zum Phänomen Formbarkeit	68
5.9. Verteilung der Äußerungen in den inhaltlichen Kategorien zur Formbarkeit	72
6.1. Vergleich der Hauptkategorien des ersten und zweiten Kurses	90
6.2. Verteilung der Äußerungen in den inhaltlichen Kategorien zur Formbarkeit (Kurs2)	92
6.3. Vergleich der Änderungen der anteiligen Äußerungen im letzten Interview von Kurs 1 und 2	94
7.1. Struktur-Eigenschaftsbeziehungen anhand des Kontextes „Brot“	134
7.2. Struktur des Struktur-Eigenschaftskonzeptes nach Parchmann et al.	136
7.3. Struktur-Eigenschaftsbeziehungen anhand der Formbarkeit von Lehm	138
7.4. Wechselwirkungen und emergierende Eigenschaften anhand der Formbarkeit von Lehm	139
7.5. Strukturen und Wechselwirkungen auf unterschiedlichen Ebenen	140
7.6. Aktivitäten zur Erarbeitung des Struktur-Eigenschafts-Konzeptes anhand der Form- barkeit von Lehm	144
7.7. Elektronenmikroskopische Aufnahmen einer Lehmprobe	148

Tabellenverzeichnis

2.1. Vorstellungen unterschiedlicher Komplexitätsebenen nach Gropengießer	10
4.1. <i>Curriculum for Clay Science</i> (Auszug aus Rule und Guggenheim (2007))	36
4.1. <i>Curriculum for Clay Science</i> (Auszug aus Rule und Guggenheim (2007))	37
5.1. Interviewleitfaden der ersten Erhebung	60
5.2. Anzahl der Gruppen innerhalb einer Kategorie	74
5.3. Interviewleitfaden der zweiten Erhebung	84
6.1. Kategorien zum Begriff Ton	96
6.2. Kategorien zum Begriff Steine	98
6.3. Kategorien zum Begriff Teilchen	100
6.4. Kategorien zum Begriff Sand	102
6.5. Kategorien zum Begriff Boden	104

1. Einleitung

Es ist unbestritten, dass den Naturwissenschaften in unserer heutigen Gesellschaft eine große Bedeutung zukommt. Gleichzeitig scheint es, werden diese für die Menschen zunehmend ungreifbarer, vermutlich auch, da sich die *Naturwissenschaften* immer weniger mit dem befassen, was viele Menschen unter „Natur“ verstehen. Insbesondere „die Chemie“ scheint „der Natur“ häufig eher konträr gegenüberzustehen, im Sinne einer „schlechten Chemie“ gegenüber der „guten Natur“ (vgl. Krischer et al., 2016). Dass dies auch für die Schule gilt, wird beispielsweise im Jugendreport *Natur* gezeigt: ein Großteil der Jugendlichen gibt an, im Chemieunterricht nichts über die Natur zu lernen (Brämer, 2010). Selbst bezogen auf den Sachunterricht der Grundschule wird nur von gut der Hälfte der Kinder behauptet, viel über die Natur zu erfahren (Brämer, 2010, 5). Der Physikdidaktiker Martin Wagenschein hat diese Problematik schon sehr früh auf den Punkt gebracht und formuliert:

Freilich, unsere Naturwissenschaft, wie sie in den Schulen vorkommt, vorgezeigt wird, hat in diesen Schulen keine Heimat, denn sie hat keine Natur. Sie kann keine Naturwissenschaft werden, weil sie in Betonklötzen stattfindet, in Labors mit Belehrungsapparaten und Büchern mit fettgedruckten Sätzen. Also eine Wissenschaft, in der von der Natur überhaupt nichts zu merken ist. [...] (Wagenschein, 1981, 169f)

Um diesem zu begegnen, sollen in der vorliegenden Arbeit Phänomene in den Blick genommen werden, die bei der Beschäftigung des natürlichen Rohstoffs Lehm unmittelbar beobachtet werden können. Dabei wird der Frage nachgegangen, ob und in welcher Weise es möglich ist, mit diesem Ansatz mit Schülerinnen und Schülern im Grundschulalter einen im Wagenscheinschen Sinne genetischen und bruchlosen Weg zu einer späteren fachchemischen Deutung zu bereiten, also anschlussfähiges Wissen aufzubauen.

Lehm stellt eine in Deutschland weit verbreitete Bodenart dar. Er kann also vielerorts von Kindern in der Natur entdeckt, gewonnen und einfach verarbeitet werden. Die beim Werken mit Lehm beobachtbaren Phänomene sind für Kinder unmittelbar einsichtig und mit allen Sinnen erfahrbar.

Als Ort für die Untersuchung wurde das Freilandlabor FLEX der AG Didaktik der Chemie ausgewählt, da es als naturnaher Lernort mit eigenem Lehmvorkommen ideale Möglichkeiten für eine „beginnende Naturbetrachtung“ bietet. Hier können die Kinder den Lehm zunächst im Boden entdecken und ausgraben. Der vor Ort ausgegrabene Lehm wird dann zum kreativen Gestalten und Werken genutzt. In diesem Zuge lernen die Kinder im Tun die Eigenschaften und

1. Einleitung

damit verbunden die Verwendung von Lehm kennen. Damit sind gute Voraussetzungen für handlungsorientierte, auf Erfahrungen aufbauende Lernanlässe, wie sie in besonderem Maße für den Sachunterricht der Grundschule gefordert werden, gegeben.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es zu untersuchen, ob bzw. in welchem Maße die Auseinandersetzung mit Lehm sich darüber hinausgehend dazu eignet, erste grundlegende chemische Konzepte anzubahnen. In Anlehnung an das Dortmunder Modell fachdidaktischer Entwicklungsforschung (vgl. Kapitel 2.1; (Prediger und Link, 2012)) erfolgt zunächst eine Analyse des Gegenstandes aus fachlicher Perspektive, um den Gegenstand konstituierende Konzepte aufzudecken (Kapitel 3). In diesem Zuge werden verschiedene Fachgebiete beleuchtet, die sich mit Lehm auseinandersetzen und deren unterschiedliche Zugänge werden näher erläutert. Darüber hinaus werden die Eigenschaften des Werkstoffs und die Stoffumwandlung beim Brennen im Sinne der Schwerpunktsetzung auf chemiebezogenes Lernen ausführlicher beschrieben.

Nach der fachlichen Klärung wird unter Berücksichtigung chemischer Basiskonzepte und des Perspektivrahmens Sachunterricht eine Auswahl jener Phänomene getroffen, die für chemiebezogenes Lernen im Grundschulalter geeignet erscheinen und im FLEX umgesetzt werden können (Kapitel 4). Konkret werden die Phänomene *Formbarkeit*, *Quellen und Schwinden*, *Wasserspeichervermögen* sowie *Lehmbrand* näher betrachtet. Zusätzlich wird die mögliche Zusammensetzung des Lehms aufgegriffen.

Um die Vorstellungen der Kinder zu den einzelnen Phänomenen bei der Rekonstruktion des Gegenstandes berücksichtigen zu können, werden qualitative problemzentrierte Interviews zu unterschiedlichen Phänomenen in Kleingruppen durchgeführt (Kapitel 5). Die Untersuchung der gegenstandsbezogenen Lernendenperspektiven erscheint insbesondere vor dem Hintergrund der kaum vorhandenen Forschungsgrundlagen hierzu als notwendiger erster Schritt. Die Erhebung der Interviewdaten erfolgt im Freilandlabor FLEX im Rahmen von AGs in zwei aufeinanderfolgenden Jahren. Dabei werden bewusst viele Phänomene in die Befragung einbezogen, da die Perspektive der Kinder als zentral für die Auswahl der Themen erachtet wird. Nur so ist eine auf die Lernenden abgestimmte Rekonstruktion des Gegenstandes möglich. Leitend für die qualitative Forschungsarbeit sind dabei folgende Fragestellungen:

1. Welche Vorstellungen haben die Kinder zu einzelnen Phänomenen des Lehms? Entwickeln sie Erklärungen zu ihren Beobachtungen und wie stellen sich diese dar?
2. Sind die Erklärungsmuster der Kinder kongruent zu den fachlichen Grundlagen? Welche Widersprüche tauchen gegebenenfalls auf?
3. Welche Entwicklung kann bezüglich der Vorstellungen im Verlauf des Kurses beobachtet werden?

Die so gewonnenen Daten werden vor dem Hintergrund der Frage nach der Fruchtbarkeit der Phänomene für chemiebezogenes Lernen einer ersten Sichtung unterzogen. Da eine vollständige Analyse der erhobenen Daten den Rahmen dieser Arbeit übersteigt, wird eine Fokussierung auf

1. Einleitung

die Eigenschaft „Formbarkeit“ vorgenommen, welche sich hinsichtlich der Äußerungen der Teilnehmenden als besonders ergiebiges Phänomen darstellt. Die zu diesem Phänomen vorliegenden Daten werden daher einer qualitativen Inhaltsanalyse unterzogen. Zunächst erfolgt eine kategorienbasierte Auswertung, im Anschluss werden einzelne auffällige Aspekte fallbezogen untersucht (Kapitel 6).

Auf diese Weise werden Lernmöglichkeiten, aber auch Lernhürden aufgedeckt, welche schließlich in Kapitel 7 unter Bezugnahme auf weitere Forschungsarbeiten (insbesondere Meijer, 2011; Meijer et al., 2013b) diskutiert werden. Im Vordergrund steht dabei die Fokussierung sogenannter *Mesoebenen* bei der Erarbeitung eines ersten Teilchenkonzeptes. Diese erste gegenstandsbezogene Lehr-Lerntheorie stellt im Sinne des Dortmunder Modells die Grundlage für eine erneute Spezifizierung und Strukturierung des Lerngegenstandes dar. Ertrag dieser Arbeit ist schließlich eine von der Perspektive der Kinder ausgehende und auf theoretische Konzeptionen gestützte Strukturierung des Themas „Formbarkeit von Lehm“ und darauf aufbauend eine erstes Konzept themenbezogener, aufeinander aufbauender Lernaktivitäten zur Erarbeitung des Struktur-Eigenschafts-Konzeptes.

2. Forschungsrahmen und theoretische Grundlagen

Anhand der Entwicklung der Ausrichtung des Sachunterrichtes lässt sich erkennen, dass theoretisch fundierte Konzeptionen in der Praxis nicht zwangsläufig zum intendierten Ziel führen. So wurde in den 70er Jahren – auch als Antwort auf den Sputnik-Schock – eine verstärkt naturwissenschaftliche Ausrichtung des Sachunterrichts gefordert. Keine zehn Jahre später wurden die eingeführten Inhalte wieder zurückgewiesen – unter anderem aufgrund der Kritik, die Lebenswelt der Kinder und deren Denkweisen werde zu wenig berücksichtigt. Dies ist nur ein Beispiel für die häufig beklagte Diskrepanz zwischen theoretischer Konzeption und praktischer Umsetzung (vgl. Fischer et al., 2005).

Um diesem Problem zu begegnen, wurden verschiedene Ansätze entwickelt, welche den Anspruch erheben, die theoretische Forschung mit der praktischen Umsetzung enger zu vernetzen, um so den Nutzen von Forschungsprodukten für die Praxis zu erhöhen. Im englischsprachigen Raum wird hier von „*Design Research*“ gesprochen, wobei der Begriff verschiedene ähnliche Konzepte wie „*Design Studies*“, „*Design Science*“, „*Developmental Science*“ oder „*Design-based-Research*“ subsumiert (Plomp, 2013).¹ Auch im deutschsprachigen Raum existieren verschiedene Ansätze. Als Beispiele seien das Modell der didaktischen Rekonstruktion (Kattmann et al., 1997) sowie die fachdidaktische Entwicklungsforschung nach dem Dortmunder Modell (Prediger et al., 2012) genannt (vgl. auch Wilhelm und Hopf, 2014). Während ersteres jedoch nicht auf die oben beschriebenen Ansätze bezogen wird und die Ursprünge vielmehr in einer „Kompromißposition“ aus Klafkis didaktischer Analyse und dem Strukturmomentemodell nach Heimann gesehen werden (Kattmann et al., 1997, 8), werden bei dem Dortmunder Modell der fachdidaktischen Entwicklungsforschung die Ansätze zum *Design Research* als Ausgangspunkt genommen, um ein eigenes Modell zu entwickeln (Prediger und Link, 2012). Hierbei werden insbesondere die Prozess- und Gegenstandsorientierung sowie die iterative Vorgehensweise im Forschungs- und Entwicklungsprozess hervorgehoben (Hußmann et al., 2013).

Der Vergleich der Ansätze im Bereich des *Design Research* macht deutlich, dass die Gemeinsamkeiten trotz unterschiedlicher Schwerpunktsetzungen überwiegen. Gemeinsam ist allen Ansätzen die Verzahnung von theoretischen Überlegungen zu einem konkreten Lerngegenstand mit empirischen Studien über die Sichtweisen von Lernenden zu dem Lerngegenstand, über die Wirksamkeit konzipierter Lernumgebungen oder über Lernhürden- und -verläufe. Dabei wird iterativ vorge-

¹Diese haben teilweise unterschiedliche Schwerpunktsetzungen; für eine ausführliche Diskussion sei auf Link (2012) verwiesen.

gangen, d.h. die Ergebnisse der Schritte werden stets aufeinander bezogen und bauen aufeinander auf.

Entwicklungsforschung wird vom konkreten Lerngegenstand aus gedacht – daher ergeben sich aufgrund der je nach Fach unterschiedlichen Herangehensweisen und des unterschiedlichen Wissensstandes zum untersuchten Gegenstand unterschiedliche Schwerpunkte. Es können daher nur relativ allgemein gehaltene Forschungsmodelle formuliert werden, sollen sie für mehrere Lerngegenstände passend sein, was sich in den beschriebenen Ansätzen widerspiegelt.

Bei allen Ansätzen werden zudem fast ausschließlich auf qualitative Forschungsmethoden angewendet. Die Gründe hierfür liegen in der Komplexität der Erhebungssituation und der des Forschungsgegenstandes an sich.

2.1. Entwicklungsforschung nach dem Dortmunder Modell

Das methodische Vorgehen in der vorliegenden Arbeit ist angelehnt an die fachdidaktische Entwicklungsforschung nach dem Dortmunder Modell (Prediger und Link, 2012; Prediger et al., 2012). Dieses Vorgehen wurde gewählt, da der Ansatz den untersuchten Gegenstand klar in den Mittelpunkt stellt (Hußmann et al., 2013). Im Gegensatz zum oben beschriebenen *Design-Research*-Ansatz kommt es weniger darauf an, ein bestimmtes Lernarrangement im Unterricht zu untersuchen, vielmehr geht es darum, „Aussagen über Potentiale und Grenzen innovativer Ansätze zu rekonstruieren“ (Prediger, 2011, 7). Die Grundzüge des Modells sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Die zyklische Darstellung spiegelt den prozessualen Charakter wider: Entwicklung und Forschung werden stetig vertieft und verfeinert. Auch wenn damit eine klare Abfolge der Schritte nahegelegt wird, so betonen Prediger und Link (2012) zugleich das iterative Vorgehen in diesem Prozess.

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte in Anlehnung an Prediger et al. (2012) kurz erläutert, bevor diese im Anschluss auf den Lerngegenstand Lehm bezogen und Implikationen für den eigenen Forschungsprozess abgeleitet werden. Der Zyklus setzt sich aus den vier in Abbildung 2.1 dargestellten Faktoren zusammen.

Der Aspekt „Lerngegenstände spezifizieren und strukturieren“ impliziert die genaue Untersuchung des Lerngegenstandes selbst: Die Bezüge zu übergeordneten Bildungsinhalten sollen hergestellt und gegenstandsspezifische Lernziele konkretisiert werden, wobei bereits vorhandene Forschungsergebnisse beispielsweise zu Lernendenperspektiven berücksichtigt werden müssen. Eng verknüpft mit der Strukturierung ist die Entwicklung eines ersten Designs einer Lernumgebung, dessen Ausgestaltung stark von dem bereits vorhandenen gegenstandsbezogenen fachdidaktischen Wissen abhängig ist. Beispielsweise müssen mögliche Lernhürden zunächst bekannt sein, bevor sie in der Entwicklung Berücksichtigung finden können. Im Anschluss werden sogenannte Design-Experimente durchgeführt; unter diesen versteht man die „exemplarische Erprobung des Lehr-Lernarrangements mit Lernenden, um zu untersuchen, welche Lernprozesse tatsächlich initiiert

2. Forschungsrahmen und theoretische Grundlagen

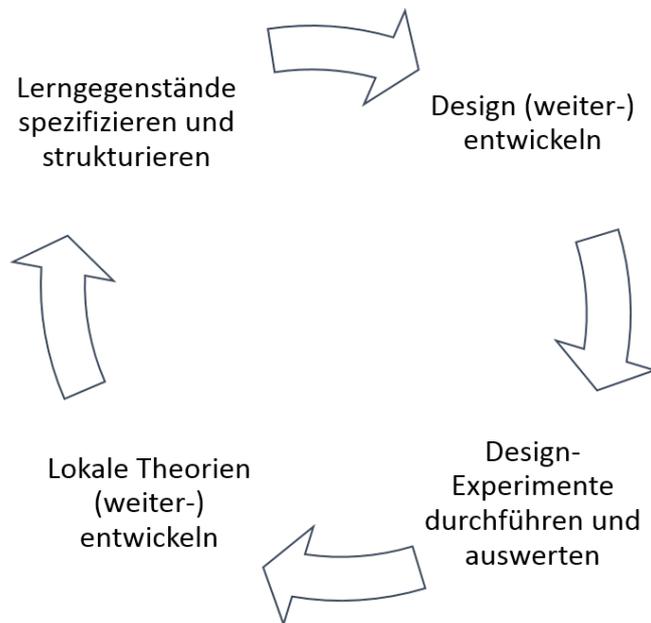


Abbildung 2.1.: **Dortmunder Modell fachdidaktischer Entwicklungsforschung** (nach Prediger et al., 2012).

werden, und inwieweit diese mit den zuvor angenommenen Lernpfaden übereinstimmen“ (Prediger et al., 2012, 455). Im vorliegenden Modell werden Design-Experimente als „diagnostische Lehr-Lernsituationen“ aufgefasst (Prediger und Link, 2012, 32). In der Literatur sind Design-Experimente jedoch hinsichtlich Ausgestaltung und Datenerhebung nicht einheitlich definiert. So werden sie teilweise mit den hier als übergeordnet aufgefassten Begriffen wie *Design-Research* gleichgesetzt bzw. synonym verwendet (z.B. Collins et al., 2004; The Design-Based Research Collective, 2003). Dies kommt auch in Confreys (2006) Artikel „*The evolution of design studies as methodology*“ zum Ausdruck, in welchem sie zudem einen Bezug zu „*teaching experiments*“ herstellt - ein weiterer Begriff, der im Zuge der Diskussionen um Design Research häufig auftaucht. Während *teaching experiments* in Beziehung zu dem klinischen Interview von Piaget sowie den Arbeiten von Vygotsky gesehen werden und ihre Ursprünge in der Sowjetischen Forschung haben (Kantowski, 1978; Steffe und Thompson, 2000), werden Design-Experimente zumeist auf die Arbeiten von Collins (1992) sowie von Brown (1992) zu Beginn der 1990er Jahre zurückgeführt (Cobb et al., 2003; Schoenfeld, 2006). Zentrale Punkte beider Konzepte sind:

- Fokussierung des Lernprozesses: Hier besteht der hauptsächliche Unterschied zum klinischen Interview, welches eher einen IST-Zustand erfasst.
- Systematische Überprüfung neuer Lehr-Lernumgebungen: Dabei kann der Fokus konkret auf der Erprobung neu gestalteter Umgebungen oder – allgemeiner – auf einer Unterstützung der Entwicklung innovativer Lerninhalte liegen. Zugleich impliziert dies eine wiederholte Überarbeitung der Intervention und eine zunehmende Ausdifferenzierung einer gegenstandsbezogenen Lehr-Lern-Theorie im Laufe des Forschungsprozesses.

- Direkte Verknüpfung von Forschung und Lehre: Dabei werden die Untersuchungen entweder in der komplexen Unterrichtssituation in Kooperation mit Lehrern durchgeführt oder sie finden in interviewwähnlichen „Laborsituationen“ mit nur wenigen Lernenden statt.

Aufgrund der Tatsache, dass der Ausdruck *teaching experiment* zumeist enger gefasst wird und durch den Wortteil „teaching“ die Nähe zur Praxis, zu dem Fokus auf Lernprozesse (vgl. auch Kelly, 2004), betont wird, wird im Folgenden abweichend von Prediger et al. (2012) diese Bezeichnung verwendet (vgl. auch Kapitel 5.2.3 dieser Arbeit).

Die Resultate der *teaching-experiments* tragen zur Entwicklung bzw. Weiterentwicklung einer gegenstandsbezogenen, lokalen Lehr-Lerntheorie bei (vgl. Abbildung 2.1), welche unter anderem Aussagen über Lernprozesse, Lernhürden oder neue Erkenntnisse über die Lernvoraussetzungen enthält. Sie bildet wiederum die Grundlage für einen erneuten Entwicklungszyklus und die Spezifizierung des Lerngegenstandes.

Das hier vorgestellte Vorgehen erscheint gerade in Hinblick auf die Rekonstruktion von Lerngegenständen im Sachunterricht der Grundschule vielversprechend, da hier das „Spannungsfeld“ zwischen fachlicher und kindlicher Perspektive häufig besonders groß ist. Im *Perspektivrahmen Sachunterricht*, der „als ein den didaktischen und methodischen Herausforderungen des Sachunterrichts angemessenes Kerncurriculum“ (Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU), 2002, 2) angesehen werden kann, wird betont, dass das „gleichwertige und wechselseitige Berücksichtigen des Spannungsfeldes aus den Erfahrungen der Kinder und den (inhaltlichen und methodischen) Angeboten der Fachwissenschaften [...] konstitutiv für den Sachunterricht“ (Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU), 2013, 10) ist. Daher ist der stete Einbezug der Lernendenperspektive - wie im Dortmunder Modell gefordert - als zentral anzusehen. Der von der Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU) herausgegebene *Perspektivrahmen Sachunterricht* wird auch in Kapitel 4 bei der didaktischen Analyse des Lerngegenstandes eine Rolle spielen, da dieser als rahmengebend für die Inhalte des Sachunterrichts angesehen werden kann. Er ist untergliedert in fünf Perspektiven: die sozialwissenschaftliche, die geographische, die naturwissenschaftliche, die technische sowie die historische Perspektive. Neben perspektivenbezogenen und perspektivenvernetzenden Themenbereichen, werden in der 2013 erschienenen zweiten Ausgabe jeweils auch perspektivenbezogene und perspektivenübergreifende Denk- Arbeits- und Handlungsweisen aufgezeigt.

2.2. Eigene Forschung in Anlehnung an das Dortmunder Modell zur fachdidaktischen Entwicklungsforschung

Das in den Fachdidaktiken der Technischen Universität Dortmund erarbeitete Modell bietet einen Forschungsrahmen, welcher je nach Lerngegenstand und vorliegendem Wissen unterschiedlich ausgestaltet werden muss. Als rahmengebende Schritte werden Ausgangslage, Zielsetzungen

und Produkte angesehen, wobei insbesondere die Zielsetzungen im Laufe des Forschungsprozesses noch ausdifferenziert werden oder sich sogar ändern können (Hußmann et al., 2013). Hinsichtlich der Ausgangslage des in dieser Arbeit analysierten Lerngegenstandes Lehm lässt sich bislang auf nur wenige Forschungsarbeiten zurückgreifen (vgl. Kapitel 4). Daraus resultiert die hier verfolgte Zielsetzung: Es wird nicht der Anspruch erhoben, ausgearbeitete Lernumgebungen in einzelnen *teaching experiments* zu evaluieren; vielmehr rückt die Erhebung der Lernausgangslagen der Kinder und die Frage nach dem Potential des Lerngegenstandes für chemiebezogenes Lernen in der Grundschule in den Vordergrund. Es gilt unter Berücksichtigung der Lernendenperspektiven zu explizieren, welche der Phänomene des Lehms sich als besonders geeignet erweisen und den Lerngegenstand dahingehend näher zu spezifizieren. Als Produkt wird schließlich die auf Basis der Schüleraussagen empirisch gestützte Eingrenzung des Gegenstandes und die vertiefende Analyse der gewählten Phänomene angesehen. Daraus ergeben sich Konsequenzen für den Forschungsprozess:

- Die zunächst umfassende Betrachtung des Lerngegenstandes muss unter Berücksichtigung der Schülerperspektive eingeschränkt werden. Dazu wird zunächst ein fachlicher Blick auf den Gegenstand geworfen und dahingehende Überlegungen zu möglichen Lernanlässen aus chemischer Sicht angestellt. Dabei werden auch bereits existierende Ansätze einbezogen. Weiterhin werden im folgenden Schritt Lernendenäußerungen zum Gegenstand erfasst. Die Erhebungen erfolgen im Grenzbereich von problemzentriertem Interview und *teaching experiment*; d.h., beide Methoden werden eingesetzt und kombiniert. Ersteres dient stärker der Erhebung der Vorstellungen (der Lernendenausgangslage), letzteres fokussiert eher auf die Frage „Was kann gelernt werden“ und auf die Identifikation von Lernhürden.
- Bei den *teaching experiments* geht es nicht darum, ausgearbeitete Arbeitsaufträge etc. zu erproben, vielmehr soll aufgedeckt werden, welche Phänomene oder Experimente ein bedeutendes Lernpotential bergen. Daher werden die *teaching-experiments* in Kleingruppen durchgeführt. Dieses Vorgehen bietet die Möglichkeit, die Vorstellungen und den Lernprozess detaillierter zu untersuchen als dies in größeren Gruppen möglich wäre.
- Ziel ist eine erste Strukturierung des Lerngegenstandes Lehm mit Hypothesen zu Lernprozessen und Lernhürden sowie die Ableitung resultierender Implikationen für weitere Forschungsprojekte. Weiterhin sollen erste Möglichkeiten für die Gestaltung von Lehr-/Lernumgebungen zum Thema Lehm aufgezeigt werden.

Da die Erfassung der Lernendenperspektive als zentral für die vorliegende Arbeit angesehen werden kann, stellt diese den Schwerpunkt des folgenden Kapitels dar.

2.3. Die Lernendenperspektive

Ein wesentlicher Punkt im oben beschriebenen Forschungsmodell ist eine stete Berücksichtigung der Lernendenperspektive von der ersten Strukturierung des Gegenstandes bis zur Optimierung

spezifischer Designs. Da für den Lerngegenstand Lehm bislang so gut wie keine Untersuchungen vorliegen, ist ein zentrales Anliegen der Arbeit, erste Erkenntnisse über die Perspektive der Kinder zu gewinnen. Im Folgenden wird nach einem kurzen allgemeinen Überblick und begrifflicher Präzisierung konkret auf Befunde zu Vorstellungen im Bereich der Chemie sowie der Geographie eingegangen, da diese möglicherweise auch bei den chemischen Betrachtungen von Lehm eine Rolle spielen.

2.3.1. Zur Bedeutung und zum Begriff der Lernendenperspektive

Bislang wurde – in Übereinstimmung mit Prediger et al. (2012) – der Begriff „Lernendenperspektive“ verwendet. In der Literatur existieren zahlreiche Begriffe, die in diesem Sinne genutzt werden und sich in der Schülervorstellungsforschung etabliert haben. Die Vorstellungen von Schüler_innen zu naturwissenschaftlichen Themen haben sich seit Mitte der 70er Jahre zu einem Schwerpunkt der fachdidaktischen Forschung entwickelt (Duit, 1992a). Unumstritten ist, dass die aus den vorunterrichtlichen Erfahrungen der Kinder erwachsenen Vorstellungen das Lernen maßgeblich beeinflussen und – im Sinne einer konstruktivistischen Auffassung von Lernen – in Lehr-Lernsituationen stets zu berücksichtigen sind.

Alltagsvorstellungen, Präkonzepte, Vorwissen, Fehlvorstellungen, alternative Vorstellungen/*alternative frameworks* oder naive Theorien sind nur einige der Begriffe, die im Zusammenhang mit den Perspektiven von Lernenden auftauchen. Die verwendeten Begriffe sind unterschiedlich akzentuiert: so wird beispielsweise durch den Begriff „Präkonzept“ die Abweichung von den nachunterrichtlichen Konzepten betont, während durch „Alltagsvorstellungen“ eher auf die Herkunft der Vorstellungen rekurriert wird. Der Begriff „Fehlvorstellung“ oder „*misconception*“ stellt wiederum die Abweichung zur fachwissenschaftlich angemessenen Sichtweise in den Vordergrund.² Gropengießer sieht Vorstellungen als „subjektive gedankliche Prozesse“, welche er mit aufsteigender Komplexität in Begriffe, Konzepte, Denkfiguren und Theorien unterteilt (Gropengießer, 2003, 13). Dabei differenziert er zwischen dem sprachlichen und dem referentiellen Bereich, auf den sich die entsprechenden gedanklichen Konstrukte beziehen (vgl. Tabelle 2.1). Begriffe bilden dabei die unterste Ebene, referieren auf eine Sache, ein Objekt oder ein Zeichen und werden über Worte zum Ausdruck gebracht. In Konzepten werden Begriffe zueinander in Beziehung gesetzt, um einen Sachverhalt wiederzugeben. Sprachlich ausgedrückt werden Konzepte durch Behauptungen, Sätze oder Aussagen (Gropengießer, 1997, 29f). Die nächsthöhere Komplexitätsebene sind Denkfiguren, welche zusammenhängende Konzepte darstellen und als Grundsatz formuliert werden können. Theorien sind wiederum verknüpfte Konzepte und Denkfiguren. Geäußert werden sie durch Aussagengefüge oder Darlegungen. Differenziert werden wissenschaftliche und persönliche Theorien (subjektive Theorien), wobei letztere selbstverständlich auch wissenschaftlicher Natur sein können (ebd.). Inwiefern aber Schülervorstellungen als Theorie-ähnlich angesehen

²Die Verwendung des Begriffes „Fehlvorstellung“ wird häufig kritisch gesehen, da die Vorstellungen damit als negativ erachtet werden. Damit gelte es diese durch fachwissenschaftlich angemessene zu ersetzen. Duit (1992a) betont, dass eher der Gültigkeitsbereich von alltäglichen, aber auch von naturwissenschaftlichen Vorstellungen mit den Lernenden reflektiert werden sollte (s.u.).

Tabelle 2.1.: Vorstellungen unterschiedlicher Komplexitätsebenen mit entsprechenden referentiellen und sprachlichen Bezügen (Gropengießer, 1997, Gropengießer, 2009).

referentieller Bereich	gedanklicher Bereich	sprachlicher Bereich
Wirklichkeitsbereich	Theorie	Aussagengefüge, Darlegung
Wirklichkeitsaspekt	Denkfigur	Grundsatz
Sachverhalt	Konzept	Behauptung, Satz, Aussage
Ding, Objekt, Ereignis	Begriff	Terminus (Fach-)Wort, Ausdruck

werden können, wird kontrovers diskutiert. Während Vertreter des Kohärenzansatzes Vorstellungen als naive, in sich kohärente, Theorien auffassen, wird beim Fragmentierungsansatz von kaum oder nicht verknüpften Wissens-elementen ausgegangen (Kleickmann et al., 2011). Untersuchungen weisen darauf hin, dass dies populationsabhängig ist und eine allgemeingültige Aussage kaum getroffen werden kann.

Nicht zuletzt wird auch zwischen fest verankerten Vorstellungen (*deep-structured*) und so genannten *ad-hoc*-Vorstellungen (oder *current constructions*) unterschieden (Niedderer und Schecker, 1992, Duit, 2011). *Ad-hoc*-Vorstellungen treten beispielsweise bei der Konfrontation mit zuvor unbekanntem Phänomenen auf, beruhen aber letztendlich auch auf grundsätzlichen, tief verankerten Überzeugungen (vgl. Niedderer und Schecker, 1992). Außerdem können sie auch aus Verlegenheit in Befragungssituationen formuliert werden (vgl. Möller, 1999).

Zu berücksichtigen ist, dass sich Schülervorstellungen nicht im eigentlichen Sinne „erheben“ lassen. Sie sind nach Murmann (2004) „zwangsläufig das Ergebnis einer Interpretation von erhobenen Äußerungen und Handlungen. Als solche reflektieren sie nicht nur die Phänomendeutung der Lernenden, sondern immer auch deren Rekonstruktion bzw. verstehende Interpretation seitens der Forschenden und damit deren Verstehensrahmen“ (S. 5).

2.3.2. *Conceptual Change*

Das Wissen um die Bedeutung der vorhandenen Vorstellungen für das Lernen führt zu der Frage nach deren Veränderbarkeit durch Unterricht. Theoretische Überlegungen hierzu werden zumeist unter dem Begriff *conceptual change* diskutiert.

Allgemein wird zwischen einem kontinuierlichen und einem diskontinuierlichen Weg der Vorstellungsänderung unterschieden (Duit, 1995). Der kontinuierliche, bruchlose Weg, kann erfolgen, wenn die existierenden Vorstellungen als ausbaufähig angesehen werden können, so dass das vorhandene Wissen erweitert und genutzt werden kann. Hier sind lediglich geringfügige Umstrukturierungen der Schülervorstellungen erforderlich. Der diskontinuierliche Weg beinhaltet hingegen eine Revision der vorhandenen Vorstellungen und ist daher immer dann vonnöten, wenn die Vorstellungen den fachlichen Konzepten gegenüberstehen (vgl. ebd.). Die ersten Theorien zum *conceptual change* nach Posner und Strike (Posner et al., 1982) beziehen sich auf einen radikalen Konzeptwandel und somit auf den diskontinuierlichen Weg. Die Autoren formulieren vier

2. Forschungsrahmen und theoretische Grundlagen

aufeinander aufbauende Bedingungen für einen Konzeptwechsel (Strike und Posner, 1992):

1. *Unzufriedenheit*: Die Lernenden müssen mit ihren bisherigen Vorstellungen unzufrieden sein, indem ihnen beispielsweise deren begrenztes Erklärungspotential bewusst wird.
2. *Verständlichkeit*: Die neue Vorstellung muss für die Lernenden verständlich sein.
3. *Plausibilität*: Plausibel ist die neue Vorstellung dann, wenn sie verständlich ist und sich zugleich bei der Problemlösung als geeignet erweist.
4. *Fruchtbarkeit*: Die Fruchtbarkeit der neuen Vorstellung manifestiert sich in der Übertragbarkeit auf weitere Bereiche, das heißt sie sollte sich in verschiedenen Kontexten als nützlich erweisen.

Um einen Konzeptwechsel bei den Lernenden anzuregen, wird zumeist ein „kognitiver Konflikt“ angestrebt, welcher zu einer „Unzufriedenheit“ führen soll, welche als erste Stufe die Grundlage für einen Konzeptwechsel darstellt. Dazu kann beispielsweise ein Experiment eingesetzt werden, dessen Ergebnis den Vermutungen der Lernenden entgegensteht. Doch auch wenn dieses Vorgehen aus fachlicher Sicht die ursprünglichen Vorstellungen widerlegt und die wissenschaftlichen demonstriert, so ist dies nicht zwangsläufig auch für die Schüler_innen eindeutig. Insbesondere von jüngeren Schüler_innen wird der Konflikt häufig nicht als solcher erkannt und anstatt die eigenen Konzepte zu überdenken, wird vielmehr das Ergebnis an die vorhandenen Vorstellungen angepasst. So beobachten Lernende bei Experimenten das, was ihrer Vorstellung entspricht oder sie führen die abweichenden Ergebnisse auf andere äußere Umstände zurück (Duit, 1989). Damit ein kognitiver Konflikt wirksam werden kann, bedarf es zum einen dem Wunsch nach interner Konsistenz und zum anderen metakognitiven Fähigkeiten wie Selbstreflexion (Wodzinski, 2011b). Auch eine emotionale Bereitschaft, vertraute Konzepte aufzugeben, muss vorhanden sein (Möller, 1999).

Heute wird zudem davon ausgegangen, dass eine vollständige Revision der ursprünglichen Vorstellungen selten erfolgt und tief verankerte Vorstellungen schwierig zu verändern sind. Vielmehr kommt es häufig zunächst zur Ausbildung von Hybridvorstellungen, bei welchen ursprüngliche und wissenschaftliche Vorstellung miteinander kombiniert werden (Jung, 1993). Es ist also eher von einer schrittweisen Annäherung auszugehen (Krüger, 2007). Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, nicht unbedingt das Ziel zu verfolgen, die vorhandenen Vorstellungen, welche sich im Alltag häufig als fruchtbar erwiesen haben, zu ersetzen, sondern den Lernenden vielmehr aufzuzeigen, dass in bestimmten Situationen die fachwissenschaftliche Erklärungsweise gewinnbringender ist (Duit, 1995).

Nicht zuletzt wurde die rein kognitive Ausrichtung des ursprünglichen *conceptual change*- Ansatzes kritisiert, da affektive Faktoren wie Motivation ebenfalls eine Rolle spielen (vgl. Ewerhardy, 2010).

Im Gegensatz zu vielen etablierten Inhaltsbereichen der naturwissenschaftlichen Fächer liegen in Bezug auf den Lerngegenstand Lehm bislang kaum Untersuchungen zu Lernendenperspektiven

vor. Da in Hinblick auf das Lernen chemischer Inhalte anhand von Lehm, Untersuchungen zu Schülervorstellungen zu allgemein-chemischen Grundlagen sowie zu geowissenschaftlichen Themengebieten bedeutsam sein können, werden diese im folgenden Kapitel vertiefend behandelt.

2.3.3. Vorstellungen in Bezug auf Chemie

In der chemiedidaktischen Forschung existieren bereits zahlreiche Publikationen zu den Vorstellungen von Schüler_innen. Nachstehend werden häufig dokumentierte Schülervorstellungen vorgestellt. Da die Einzelbefunde bereits in vielen Übersichtsartikeln und wissenschaftlichen Arbeiten zusammengefasst wurden, wird bei der Zusammenstellung zum Teil auf diese zurückgegriffen. Berücksichtigt werden dabei jene Forschungsergebnisse, welche Vorstellungen zu grundlegenden Prinzipien der Chemie offenbaren und/oder sich auf Kinder im Grundschulalter beziehen.

1 Stoff- und Teilchenvorstellungen

1.1 Materialkonzept

1.1.1 Material/Gegenstand:

Material und Gegenstand werden insbesondere von jüngeren Kindern häufig nicht getrennt (Krnell et al., 1998, Schmidt, 2010). Wenn ein Holzflugzeug zerlegt wird, bestehen die einzelnen Teile für viele fünfjährige Kinder beispielsweise nicht mehr aus Holz (Strunk, 1999, 86). Siebenjährige vertreten diese Ansicht noch, wenn das Material zermahlen wird (ebd.). Allgemein fällt die Differenzierung bei pulvrigen Substanzen besonders schwer, die aus Sicht der Lernenden nicht aus dem gleichen Material wie der nicht-pulverisierte Feststoff bestehen (Krnell et al., 1998). Ein Grund für diese Fehleinschätzung liegt wohl auch in der mangelnden Differenzierung zwischen intensiven und extensiven Eigenschaften (Schmidt, 2010).

1.1.2 Stoff/Erscheinung:

Die Differenzierung zwischen Stoffen und nicht-stofflichen Erscheinungen, wie beispielsweise Schatten, bereitet einigen Kindern ebenfalls Probleme (Strunk, 1999, 88f). Zudem wird Luft auch von Jugendlichen häufig nicht als Substanz begriffen (Barke, 2006, 47).

1.2 Zusammenhang von Stoff- und Teilchenebene

1.2.1 Übertragung der Eigenschaften der Makro- auf die Mikrowelt:

Eigenschaften von Stoffen werden häufig auf die entsprechenden Teilchen übertragen. Beispielsweise werden Schwefelatome als gelb angesehen oder die Auffassung vertreten, die Teilchen selber dehnten sich - wie der Stoff - bei Wärmezufuhr aus (Duit, 1992b). Teilchen werden somit häufig als kleinste Stoffportion beschrieben (Barke, 2006, 75f).

2. Forschungsrahmen und theoretische Grundlagen

1.2.2 Emergenz von Eigenschaften:

Eigenschaften werden nicht als emergente Eigenschaften verstanden, die durch Wechselwirkungen der Teilchen zustandekommen (Talanquer, 2009).

1.2.3 Kontinuumsvorstellungen; Mischung von Kontinuums- und Diskontinuumsebene:

Die Teilchenstruktur der Materie wird häufig nicht konsequent angewendet. Während Gasen bspw. noch eine Teilchenstruktur zugebilligt wird, „verschwindet“ diese beim Übergang in die flüssige Phase (Duit, 1992b). Es wird zudem von nicht-vorgebildeten Teilchen ausgegangen: Stoffe zerfallen beim Lösen mehr oder weniger willkürlich in einzelne Bestandteile (Duit.1992b; Schmidt.2010, 54). Diese Vorstellung wird auch als „kontinuierliche Körnigkeit“ bezeichnet. Es wird zudem häufig eine Inkonsistenz in den Erklärungen beobachtet: Zwischen Teilchen- und Kontinuumskonzept wird gewechselt, ohne dass dies für die Befragten einen Widerspruch darstellt (Pfundt, 1981).

1.3 Teilchenvorstellungen

1.3.1 „Horror vacui“:

Ähnlich wie bei der Kontinuumsvorstellung wird nicht akzeptiert, dass zwischen den Teilchen „nichts“ sein kann – vielmehr befindet sich zwischen den Luftteilchen Luft, zwischen den Wasserteilchen Wasser usw. (Barke et al., 2015; Duit, 1992b).

1.3.2 Teilchen kommen zur Ruhe:

Auch hier werden die Eigenschaften der Makrowelt – bei der jede Bewegung aufgrund der Reibung irgendwann zum Erliegen kommt - auf die submikroskopische Welt übertragen (Duit, 1992b).

2 Chemische Reaktion

2.1 Stoffumwandlung als Änderung von Eigenschaften:

Nach dieser Vorstellung ändern sich bei einer chemischen Reaktion zwar die Eigenschaften, nicht aber der Stoff an sich. Beispielsweise wird Kupfer beim Erhitzen schwarz; es handelt sich aber immer noch um Kupfer (Duit, 1992b).

2.2 Stoffumwandlung als Mischen und Entmischen:

Bei der Stoffumwandlung handelt es sich um eine Mischung bzw. – insbesondere wenn Gase entweichen – um eine Entmischung (Duit, 1992b).

2.3 Verbrennung:

Bei Verbrennungsreaktionen existiert die Vorstellung der Vernichtung. Der Stoff ist nach der Reaktion „nicht mehr da“ (Barke, 2006). Spägle zeigt demgegenüber bei der Verbrennung einer Kerze, dass ein Masseerhalt bereits von Schulanfängern postuliert wird, auch wenn der Gasphase keine Beachtung geschenkt wird (Spägle, 2008, 203).

3 Weitere

3.1 Aggregatzustände

3.1.1 Prototypen:

Metalle und Holz werden als typische Feststoffe angesehen; Wasser hingegen stellt den Prototyp einer Flüssigkeit dar (Barker, 2000). So müssen Flüssigkeiten nach Ansicht vieler Lernenden Wasser enthalten oder werden nach ihrer Ähnlichkeit zu Wasser beurteilt (Stavy und Stachel, 1985, 413).

3.1.2 Klassifizierung:

Ein Feststoff muss aus Sicht vieler Kinder (5-12-jährige) hart und starr sein (Barker, 2000). Insbesondere Puder und pulverförmigen Stoffe werden häufig nicht als Feststoff deklariert (Krnell et al., 1998). Sogar von den 12-Jährigen wählten 60 % für pulverförmige Stoffe eine weitere Kategorie zwischen fest und flüssig (ebd.). Stoffe werden zudem als Feststoff schwerer eingeschätzt als in flüssiger Form (Spägle, 2008; Krnell et al., 1998).

Flüssigkeiten können eher eindeutig als solche identifiziert werden als Feststoffe. Flüssigkeiten zeichnen sich aus der Sicht von 12-jährigen dadurch aus, dass sie „nass“ sind und fließen können (Krnell et al., 1998). Probleme bei der Einordnung entstehen daher häufig bei viskosen Flüssigkeiten (ebd.).

Gase werden häufig als gefährlich und brennbar angesehen; erst ab einem Alter von 12 Jahren wird Luft auch als Gas bezeichnet (ebd.). Auch wird Gasen auch von Jugendlichen häufig keine Masse zugesprochen (Barke, 2006, 47).

3.2 Lösen:

Lösen wird von Schüler_innen der siebten Jahrgangsstufe als Reaktion zwischen zwei Stoffen oder als Schmelzen des Soluten aufgefasst (Grüss-Niehaus, 2010). Der Lösungsvorgang wird als irreversibel angesehen (Spägle, 2008).

Beim Lösen von Stoffen können Eigenschaften (Farbe, Geschmack) an das Lösungsmittel „abgegeben“ werden (Schmidt und Parchmann, 2011), (Grüss-Niehaus und Schanze, 2009).

Viele Probleme entstehen auch durch die Verwendung von Alltagssprache im wissenschaftlichen Kontext. Beispielsweise wird im Alltag bei Lösungsvorgängen von „auflösen“ gesprochen, wodurch das „Verschwinden“ des Soluten in den Vordergrund gerückt wird (vgl. Steffensky et al., 2005). Ähnlich kann dies auch für Verbrennungsprozesse gelten. Im Unterricht kann es durch die unreflektierte Verwendung von Alltags-/Fachsprache zur Ausbildung sogenannter „hausgemachter Fehlvorstellungen“ kommen (Barke, 2006). Barke (2006) führt als Beispiel die Aussage „Wasser ist zusammengesetzt aus Wasserstoff und Sauerstoff“ an, die zu Fehlvorstellungen führt, wenn Atom-, Ion- und Molekülbegriff noch nicht bekannt sind (ebd., S. 26).

2.3.4. Vorstellungen in Bezug auf die Geowissenschaften

Die zuvor dargestellten Befunde aus der Schülervorstellungsforschung der Chemiedidaktik sind zumeist relativ gut abgesichert. Demgegenüber sind Schülervorstellungen in der Geographiedidaktik bzw. anderen Bereichen der Geowissenschaften im deutschsprachigen Raum erst deutlich später in den Blickpunkt der Forschung gerückt und somit bisher weniger häufig untersucht worden (Reinfried, 2010). International liegen hier zwar deutlich mehr Publikationen vor; dennoch ist die Anzahl verglichen mit anderen (naturwissenschaftlichen) Fachbereichen gering. Einen Überblick über die Veröffentlichungen geben Reinfried und Schuler in der „Ludwigsburg-Luzerner Bibliographie zur Alltagsvorstellungsforschung in den Geowissenschaften“ (Reinfried und Schuler, 2011). Sie stellen fest, dass ein großer Teil der Untersuchungen der Oberkategorie „Astronomie“ zugeordnet werden kann, was vermutlich auf die Überschneidung mit physikalischen Inhalten und damit verbunden auf die vielzähligen Publikationen zu Schülervorstellungen in der Physikdidaktik zurückzuführen ist (Reinfried und Schuler, 2009). Im Themenbereich der Lithosphäre wurden bislang insbesondere Vorstellungen zu Gesteinen und Rohstoffen sowie zur Tektonik erhoben. Ein erhebliches Forschungsdefizit sehen die Autoren unter anderem bei allen die Pedosphäre betreffenden Themen (z. B. Boden, Bodenentstehung und –degradation) sowie Verwitterung und Erosion. Insbesondere die zu diesem Bereich zählenden Themen sind jedoch im Hinblick auf den Lerngegenstand Lehm von Bedeutung und sollen daher im Folgenden dargestellt werden, wobei bei der Recherche auf die oben genannte Bibliothek zurückgegriffen wurde.

Russel et al. erhoben (in England) unter anderem die Vorstellungen von Kindern zwischen fünf und elf Jahren in Bezug auf Boden (n=58) (Russell et al., 1993). Auf die Frage, was Boden sei, werden von jüngeren Kindern zumeist alternative Namen genannt (insbesondere „Matsch“), während ältere häufiger den Ursprung, die Eigenschaften oder die Zusammensetzung zur Beschreibung hinzuziehen (ebd., S. 24).³ Auch die Funktion des Bodens als Pflanzenwachstumsgrundlage wird häufig erwähnt. Weiterhin nimmt der Anteil der Kinder, die Boden als ein Gemisch auffassen, bei den älteren Kindern zu – jüngere neigen eher dazu, Boden als homogen zu betrachten bzw. auf alternative Namen zurückzugreifen. Dennoch wird die Zusammensetzung des Bodens auch bei den Älteren von über der Hälfte der Befragten nicht aufgegriffen (ebd. S. 26). Bezüglich des Bodens als dynamisches System wurde erhoben, ob und wenn ja welche Änderungen die Kinder postulieren. Hier werden besonders häufig Veränderungen im Wassergehalt (nass/trocken) genannt. Auch die Härte sowie Farbe und Bewuchs werden häufiger angeführt. Die meisten Kinder haben keine Idee, wie der Boden entstanden sein könnte. Nur 19 % können hier eine Antwort geben, wobei die meisten anorganisches Material als Ursprung ansehen (ebd. S. 30f).

Während einer Intervention, bei der die Schüler_innen den Boden genauer untersuchen (Stereomikroskop, Siebe etc.), Zeichnungen anfertigten und Aufgaben bearbeiteten, stellt sich erneut heraus, dass Kinder den Boden als homogene braune Substanz ansehen, wobei sichtbare organi-

³Die Zusammensetzung wird beispielsweise von den jüngsten Kindern (bis 7 Jahre) überhaupt nicht aufgegriffen, bei den 7-9-jährigen sind es 6 %, bei den 9-11-jährigen 24 %. Die Eigenschaften werden von 10 % der jüngsten und von 14 % der ältesten Kinder aufgegriffen.

2. Forschungsrahmen und theoretische Grundlagen

sche Substanzen, Steine und sogar Ton als Zusatz und nicht als Bestandteil des Bodens aufgefasst werden. Für diese „Zusätze“ kann die Herkunft zumeist benannt werden, wohingegen der „richtige“ Boden einfach da ist und kein Ursprung angegeben werden kann (ebd. S. 78f).

Happs kommt in einer neuseeländischen Studie aus dem Jahr 1982 mit 11-17-jährigen (n=40) zu ähnlichen Ergebnissen (Happs, 1981). Viele der Teilnehmer verwenden die Begriffe „Dreck“ und „Boden“ synonym. Weiterhin erfolgt eine Definition häufig über die Bedeutung des Bodens für das Wachstum von Pflanzen. Hinsichtlich möglicher Veränderungen des Bodens beschreibt Happs, dass viele Schüler Umwandlungen von Boden zu Ton oder von Ton zu Boden postulieren (ebd., 23ff). Ton wird demnach nicht als Bestandteil, sondern als Ursprung bzw. Umwandlungsprodukt gesehen. Die Vorstellungen von Lehramtsanwärtern des Grundschullehramts zu Ton waren Gegenstand einer Untersuchung mit 87 Teilnehmern in den USA (Rule, 2007). Neben einer allgemeinen Definition des Tonbegriffes wurden die Teilnehmer nach der Herkunft des Tons und Produkten, welche aus Ton hergestellt werden, befragt. Die meistgenannten Definitionen (dennoch in weniger als der Hälfte der Fälle) beziehen sich auf eine „*unspecified moldable substance*“ oder eine „*natural substance from the earth*“ (ebd., 314). Rule betont, dass dennoch viele der Befragten sich des natürlichen Ursprungs nicht bewusst sind. Ton wird nur von fünf der 87 Probanden als Verwitterungsprodukt angesehen; nach der Herkunft des Tons befragt, wird alternativ unter anderem eine Entstehung aus Wasser-Partikel-Gemischen durch Druck und/oder Hitze wie bei metamorphen Gesteinen oder durch Aufsaugen von Feuchtigkeit und Nährstoffen durch Sonneneinstrahlung postuliert (Herkunft organischen Ursprungs). Rule betrachtet die ebenfalls häufig anzutreffende Vorstellung von Ton als zerkleinertes Gestein grundsätzlich als problematisch, da es im Zuge der Verwitterung zur Tonmineralneubildung kommt und somit die chemische Zusammensetzung der Tonminerale von der des Ausgangsgesteins abweicht (ebd. S. 316 ff).

Für den deutschsprachigen Raum weist Drieling auf die Schwierigkeiten von Zehntklässlern mit dem deutschen Begriff „Boden“ hin, welcher von Schülern zumeist mit einer Fläche assoziiert und seltener als Schicht begriffen wird (Drieling, 2008; Drieling, 2015 (n=10)). Sie konstatiert, dass die Vorstellungen der Schüler zur „Erde“ dem fachwissenschaftlichen Konzept des Bodens zumindest eher entsprechen, während der Begriff „Erde“ wiederum von fachwissenschaftlicher Seite aus nicht exakt definiert ist. Während einige Schüler den Boden als homogene Masse auffassen, kann sie bei anderen eine Vorstellung von Schichten innerhalb des Bodens nachweisen.

Weiterhin zeigt Drieling, dass Schülervorstellungen zu einigen Begriffen wie Bodenversauerung oder Bodenverdichtung durchaus anknüpfbar sind und damit als lernförderlich eingestuft werden können, während beispielsweise der Begriff Bodenerosion als lernhinderlich klassifiziert wird und aus ihrer Sicht vereinfacht werden sollte (z.B. durch den Begriff „Bodenverlagerung“) (Drieling, 2015, 228).

Insgesamt weisen viele der zitierten Studien darauf hin, dass - im deutschen wie englischen Sprachraum - Probleme durch die Verwendung alltagssprachlicher Begriffe im fachwissenschaftlichen Kontext entstehen bzw. durch die unzureichende Verwendung exakter Begriffe. Dieses

2. Forschungsrahmen und theoretische Grundlagen

Problem wird in geowissenschaftlichen Untersuchungen häufig konstatiert – insbesondere auch bei Begriffen wie Stein, Gestein, Kies etc. (Drieling, 2015, Dove, 1998, 193, Russell et al., 1993, 40). In Bezug auf den Begriff Boden sieht Drieling (Drieling, 2015, 227) die Ursache nicht zuletzt in den Fachwissenschaften, da hier Autoren unterschiedliche Aspekte in den Vordergrund rücken, anstatt sich auf eine einheitliche Definition zu beziehen. Sie betont, dass neben der Einführung von Fachbegriffen zugleich deren Wortverwendungsspielraum in unterschiedlichen Kontexten thematisiert werden sollte, da sie davon ausgeht, dass im Alltag beispielsweise weiterhin der Begriff Erde verwendet wird (ebd.).

3. Fachliche Grundlagen

Lehm: Das westgermanische Wort mitteldeutsch-mittelniederdeutsch lēm(e), mittelhochdeutsch leime, althochdeutsch leimo, niederländisch leem, englisch loam gehört zu der unter Leim behandelten Wortgruppe. Die heutige Form Lehm stammt aus dem Mitteldeutsch-Mittelniederdeutschen und hat sich im 18. Jahrhundert gegenüber oberdeutsch Leim(en) durchgesetzt. – Außergermanisch entspricht zum Beispiel lateinisch limus »Bodenschlamm, Kot, Schmutz«. Im Germanischen bezog sich das Wort wahrscheinlich zunächst auf den zum Bewerfen und Verschmieren verwendeten Baustoff, dann auf die Erdart und den klebrigen Schmutz. (*aus: Auszug aus Munzinger Online/Duden - Das Herkunftswörterbuch; 5., neu bearbeitete Auflage, Bibliographisches Institut GmbH, Mannheim, 2014. (abgerufen am 26.6.2015)*)

Wie bereits die Wortherkunft anzeigt, hat sich der Begriff aus der Verwendung des Lehms als Baumaterial entwickelt. Der Dachverband Lehm e. V. beschreibt Lehm aus bautechnischer Sicht als „natürliches Gemisch aus bindekräftigen Tonmineralen und schluffigen, sandigen bis steinigen Bestandteilen, die das Mineralgerüst bilden“ (Dachverband Lehm e. V., 2009, vgl.). Diese Definition fokussiert demnach auf die Zusammensetzung des Lehms (Tonminerale, schluffige, sandige, steinige Bestandteile (s.u.)) und die Funktion der Bestandteile (Bindung durch Tonminerale). Zur Prüfung der Lehme auf ihre Eignung als Baustoff wird aber weniger eine Analyse der Zusammensetzung durchgeführt, vielmehr zielen die Prüfverfahren darauf ab, die Eigenschaften des Stoffgemisches zu charakterisieren. Nach den Lehmbauregeln des Dachverbandes Lehm werden hierfür zunächst einfache Handprüfverfahren durchgeführt, welche gegebenenfalls durch weitere Labortests abgesichert oder ergänzt werden können (Dachverband Lehm e. V., 2009, 6ff). Ein Beispiel für ein einfaches Prüfverfahren vor Ort stellt die Kugelformprobe mit erdfeuchtem Lehm zur Bestimmung der Bindekraft dar. Dabei wird das Verhalten einer erdfeuchten Bodenprobe beim Formen und Trocknen einer Kugel von etwa 5 cm Durchmesser beobachtet, um die Bindekraft der Probe abzuschätzen (Dachverband Lehm e. V., 2009, 7). Baulehm sollte bei der Verarbeitung weder an den Händen kleben (was auf einen zu hohen Tonanteil hindeuten würde), noch sollte er nach dem Trocknen auseinanderfallen (was wiederum einen zu geringen Tonanteil anzeigen würde). Labortests umfassen beispielsweise eine Bestimmung der Plastizitätszahl (s. Kapitel 3.2.2) oder die Analyse der Korngrößenzusammensetzung mittels kombinierter Sieb- und Schlämmanalyse. Schroeder (2013) betont, dass nur allein aus der Korngrößenverteilung die Eignung als Baulehm nicht hinreichend geklärt werden kann, da die Art der Tonminerale unberücksichtigt bleibt. Daher werden im Lehmabbau Verarbeitungskenngrößen wie Wassergehalt,

3. Fachliche Grundlagen

Plastizitätsindex und Bindekraft zur Prüfung hinzugezogen. Demgegenüber ist es auch möglich, durch Verfahren wie die Differentialthermoanalyse (DTA) Erkenntnisse über die Struktur der vorhandenen Tonminerale zu erlangen. Nach den Lehm-Regeln sind diese aber standardmäßig zur Prüfung nicht vorgesehen – die meisten Testverfahren zielen auf die Charakterisierung der Eigenschaften.

Schroeder (2013) nennt als Grund für die geringe Standardisierung von Verarbeitungsverfahren etc. auch die Vernachlässigung des Lehmbaus im Bauingenieurwesen und in der Forschung. Lange Zeit konzentrierte sich die Forschung fast ausschließlich auf „moderne“ Baustoffen wie Zement und Beton; erst seitdem bei Baumaterialien auch der Nachhaltigkeitsaspekt verstärkt berücksichtigt wird, erfährt der Lehm eine Renaissance. Dennoch, so betont Schröder, wird „Bauen mit Lehm zu einem Teil immer auch eine Nicht-Ingenieurbauweise bleiben, denn Lehm ist im Gegensatz zu Beton und Stahl kein künstlich erzeugter, sondern ein von der Natur ‚hergestellter‘, nicht-standardisierter Baustoff“ (Schroeder, 2013, 34).

Der Lehm zeichnet sich durch Bezüge zu vielen weiteren Wissenschaftsgebieten aus. Schröder (ebd., S. 33) nennt als eng verknüpfte Wissenschaftsgebiete unter anderem die Chemie, die Geologie sowie die Bodenkunde. Die Sicht dieser Disziplinen auf Lehm soll ebenfalls kurz dargestellt werden:

In Standardlehrbüchern der Chemie wird Lehm als Ton bezeichnet, welcher „stark durch Eisenoxid und Sand verunreinigt ist“ (Riedel, 1999, 545, Holleman et al., 1995, 1061). Im Vordergrund steht aus Sicht der Autoren also die „Verunreinigung“. Die uneinheitliche Zusammensetzung, welche Lehm als Naturstoff mit sich bringt (und welche aus Lehm-Sicht die hervorragende Eignung als Baustoff bedingt), ist hier vielmehr unerwünscht, da sie einer eindeutigen Charakterisierung wie sie bei Reinstoffen erfolgen kann, entgegensteht. Hier zeigt sich das Verständnis der Chemie als Wissenschaft, deren Ziel es unter anderem ist, Stoffe, ihren Aufbau und ihre Eigenschaften zu beschreiben. Daher gilt es ein Stoffgemisch zunächst zu trennen und die einzelnen Stoffe zu charakterisieren. Die Betrachtung der Mengenverhältnisse der Reinstoffe sowie deren Eigenschaften und Wechselwirkungen untereinander lassen anschließend Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Gemisches zu. Stärker als dies (bislang) im Lehm-Bauwesen der Fall ist, kommt der Charakterisierung der Zusammensetzung und der Struktur des Stoffes eine herausragende Bedeutung zu. Eng verknüpft ist somit die Mineralogie, die sich in diesem Zusammenhang mit der Struktur und dem Aufbau von Tonmineralen befasst.} In den Geowissenschaften werden bezogen auf Lehm unterschiedliche Aspekte betont. Während in der Geologie Lehm häufig als Verwitterungsprodukt charakterisiert und dessen Genese in den Mittelpunkt gerückt wird, steht in der Bodenkunde die Bodenart Lehm und damit die anteilige Zusammensetzung aus Sand, Schluff und Ton im Vordergrund. Die Kenntnis der Bestandteile ist wiederum notwendig, um Aussagen über die Eigenschaften der Böden, wie Wasserspeicherkapazität, Erosionsanfälligkeit oder Durchlüftung, treffen zu können.

Die Beschreibungen aus unterschiedlichen Disziplinen zeigen, dass bezogen auf die Definition des Begriffes Lehm verschiedene Aspekte im Vordergrund stehen. Der Begriff ist somit, aufgrund der

Berührungspunkte zu verschiedenen Disziplinen einerseits und der uneinheitlichen Zusammensetzung des Lehms andererseits, nicht ganz eindeutig definiert. Dennoch zeigt sich bei Sichtung der Literatur, dass die Beschreibung der Bestandteile des Lehms im Allgemeinen und der Aufbau der Tonminerale im Besonderen zumeist eine bedeutende Rolle einnehmen. Schließlich lassen sich nur so die vielfältigen Eigenschaften erklären und gegebenenfalls gezielt beeinflussen.

Im Folgenden sollen daher sowohl der Aufbau des Stoffes als auch dessen Eigenschaften detaillierter dargestellt werden. Bei der Darstellung wird auf Literatur aus verschiedenen Bereichen zurückgegriffen: Minke (2004), Schroeder (2013) (Lehmbau), Mitchell und Soga (2005) (Geotechnik), Scheffer et al. (2010) (Bodenkunde), Henning und Knöfel (2002) (Baustoffchemie), Lagaly und Köster (1993) und Bergaya et al. (2006) (Tonmineralogie).

In allen genannten Werken wird die Beschreibung der chemischen Grundlagen als essentiell angesehen, wobei stets die unterschiedlichen Perspektiven mit einfließen. Zur weiteren Klärung wird in einigen Fällen auf Primärliteratur oder weiterführende Artikel aus Fachzeitschriften zurückgegriffen.

3.1. Zusammensetzung des Lehms

Lehm ist ein Stoffgemisch aus den Bodenarten Ton, Schluff und Sand; zudem kann er Beimengungen von Kies, Schotter oder Steinen enthalten. Letztgenannte werden zum Grobboden gezählt, während Ton, Schluff und Sand dem Feinboden angehören. Je nachdem zu welchem Anteil die jeweiligen Bodenarten vorliegen, werden die Gemische unterschiedlich bezeichnet. So wird beispielsweise zwischen sandigen, schluffigen oder tonigen Lehmen differenziert (vgl. Abbildung 3.1).

Unterschieden werden die einzelnen Bodenarten durch die Korngröße. Demnach zählen zum Feinboden alle Bestandteile mit einem Äquivalentdurchmesser < 2 mm.⁴ Als Sand werden Bestandteile von $63 \mu\text{m}$ (Feinsand) bis 2 mm (Grobsand) bezeichnet; Bestandteile in einem Größenbereich von 2 - $63 \mu\text{m}$ fallen unter den Begriff Schluff und solche kleiner $2 \mu\text{m}$ werden der Tonfraktion zugerechnet. Der Grobboden wird in Kies (2 - 63 mm), Steine (63 - 200 mm) und Blöcke (> 200 mm) unterteilt (Scheffer et al., 2010, 172).

Über die mineralische Zusammensetzung sagen die Begriffe hingegen zunächst nichts aus. Bei den nicht-bindigen Böden wie Kies oder Sand sind die Eigenschaften von der Korngröße und -form sowie deren Oberflächenstruktur und weniger von der chemischen Zusammensetzung abhängig (Mitchell und Soga, 2005, 48). Als Hauptbestandteil vieler Sande kann aber Quarz angesehen werden. Quarz besteht aus Siliciumionen, welche tetraedrisch von Sauerstoffionen umgeben sind. Die einzelnen Tetraeder sind über die Ecken untereinander verknüpft und bilden eine Helix-Struktur aus. Aufgrund dieser Struktur ist Quarz sehr stabil und weist eine große Härte auf. Daher ist er sehr resistent gegenüber Verwitterung und in Böden häufig vorzufinden. Demgegenüber sind

⁴Der Äquivalentdurchmesser bezeichnet bei Trennung der Bestandteile durch Siebung (s.u.) den Durchmesser der Löcher bzw. den Maschenabstand der Siebe; bei Trennung durch Sedimentation beschreibt er den doppelten Radius einer Kugel, die bei der Sedimentation genauso schnell sinken würde wie das jeweilige Primärteilchen (Scheffer et al., 2010, 172f).

3. Fachliche Grundlagen

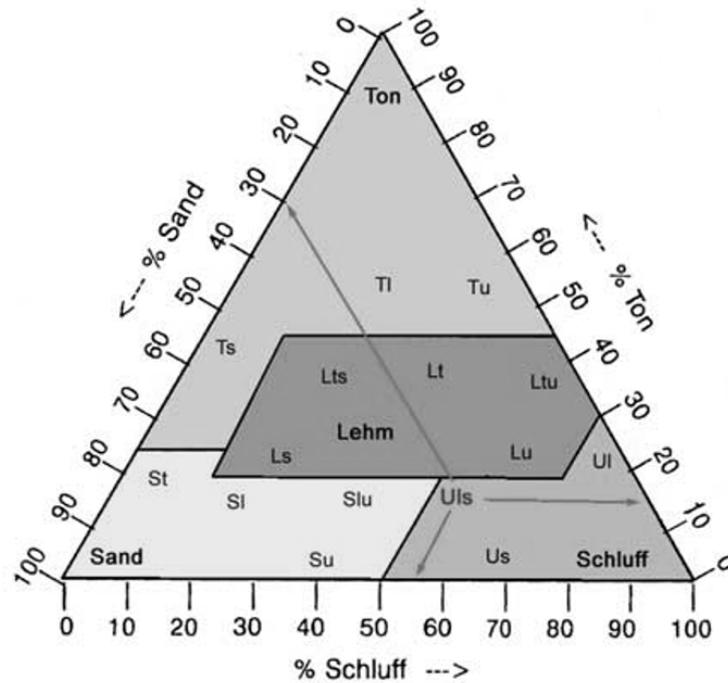


Abbildung 3.1.: **Korngröëndiagramm des Feinbodens.** T: Ton, L: Lehm, S: Sand, U: Schluff. Das Beispiel Uls steht für lehmig, sandigen Schluff mit etwa 30 % Sand, 15 % Ton, 55 % Schluff (verändert nach Enßlin et al. (2000)).

beispielsweise bei Feldspäten – welche ebenfalls hauptsächlich aus SiO_4 -Tetraedern bestehen – die Siliciumionen teilweise durch Aluminiumionen ersetzt. Daraus resultiert ein negativer Ladungsüberschuss. In das Kristallgitter eingelagerte Kationen (K^+ , Na^+ , Ca^{2+}) gleichen diesen Überschuss aus. Das größere Aluminiumatom führt ebenso wie die eingelagerten Kationen zu einer Störung der Kristallstruktur und damit verbunden zu einer verminderten Härte (Scheffer et al., 2010, 43; Mitchell und Soga, 2005, 48). Daher sind diese Minerale deutlich anfälliger gegenüber Verwitterung als Quarz und somit seltener in den grobkörnigeren Bodenanteilen vertreten. Ein Produkt der Verwitterungsprozesse von Feldspäten sind die Tonminerale. Beispielsweise kann Kalifeldspat durch saure Hydrolyse zum Tonmineral Kaolinit umgewandelt werden ($2\text{KAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{CO}_2 + 11\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 2\text{K}^+ + 2\text{HCO}_3^- + 4\text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) (Scheffer et al., 2010, 40). Während „Sand“ ausschließlich über die Korngröße charakterisiert ist, impliziert der Begriff „Ton“ zweierlei: Zum einen werden mit Ton Bestandteile kleiner $2\ \mu\text{m}$ bezeichnet (also ebenfalls eine Korngrößenbeschreibung); zum anderen legt insbesondere die Verwendung des Begriffes „Tonmineral“ eine bestimmte Struktur der Teilchen zugrunde (vgl. Mitchell und Soga, 2005, 35). Guggenheim und Martin (1995), welche die Begriffe „clay“ sowie „clay mineral“ aus Sicht der *Clay Mineral Society* (CMS) bzw. der *International Association For The Studys Of Clay* (AIPEA) definieren, werfen ein, dass die Bestandteile des Tons nicht über eine bestimmte Korngröße definiert werden können und beschränken sich darauf, diesen als feinkörnig zu beschreiben (S. 255). Der Begriff „Tonmineral“ wird zum einen über die Struktur (Schichtsilikat), zum anderen

auch über die Eigenschaft, dem Ton Plastizität zu verleihen und zur Aushärtung beim Brandt beizutragen, definiert (ebd., S.256). Da der Begriff „Mineral“ keine Korngröße impliziert, sei diese auch für Tonminerale nicht relevant. Die Autoren weisen aber auch darauf hin, dass in anderen Disziplinen abweichende Definitionen gelten. So wird, wie bereits beschrieben, in der Bodenkunde und der Geologie der Begriff Ton für Partikel $< 2 \mu\text{m}$ verwendet (s. auch Scheffer et al., 2010, 14); in der Kolloidchemie wird die Grenze für Ton bei $1 \mu\text{m}$ gesetzt, wohingegen Sedimentologen die Grenze bei $4 \mu\text{m}$ ziehen (ebd.). Eine Abgrenzung der beiden Begriffe Ton und Tonmineral findet dabei häufig nicht statt.

Da die feinen Bestandteile der Tonfraktion und insbesondere die Tonminerale für die Eigenschaften des Lehms von besonderer Bedeutung sind, wird deren Struktur im folgenden Kapitel 3.1.1 ausführlicher betrachtet.

Neben den silikatischen Hauptbestandteilen kann Lehm weitere Beimengungen enthalten. Häufig enthalten Lehme Kalk oder organische Bestandteile. Die Art der Beimengungen hängt mit der Entstehung der Lehme zusammen. So sind kalkhaltige Lehme häufig Geschiebelehme, welche aus Ablagerungen der Eiszeiten entstanden, während organische Bestandteile häufig bei Auelehmen (entstanden auf Ablagerungen im Bereich der Flussauen) auftreten (Schroeder, 2013, 46, Minke, 2004, 28). Diese Beimengungen sind auch für die Färbung des Lehms verantwortlich: kalkreiche Lehme sind häufig hell/weißlich, während organische Bestandteile zu einer bräunlichen bis schwarzen Färbung führen (Minke, 2004, 29).⁵ Darüber hinaus treten in der Tonfraktion häufig Eisenoxide auf, die zu gelblichen bis rötlichen Färbungen führen (Minke, 2004, 28, Köster und Schwertmann, 1993).

3.1.1. Aufbau der Tonminerale

Tonminerale sind Schichtsilikate. Eine Schicht besteht dabei aus SiO_4 -Tetraedern, wobei die einzelnen Tetraeder über die Sauerstoffatome zu Sechsringen verknüpft sind. Die freien Sauerstoffatome an den Spitzen der Tetraeder weisen dabei in eine Richtung (Abbildung 3.2 a). Diese Sauerstoffatome gehören jedoch gleichzeitig zu einer sich anschließenden Aluminium- (oder Magnesium-) Oktaederschicht (Abbildung 3.2 b). Alle nicht an den tetraedrischen Bindungen beteiligten Sauerstoffatome der Oktaederschicht liegen als Hydroxidionen vor.

Zweischichttonminerale (oder 1:1-Minerale) bestehen aus einer Tetraederschicht und einer Oktaederschicht. Die Hydroxygruppen der Oktaederschicht können wiederum über Wasserstoffbrücken mit einer weiteren Tetraederschicht in Wechselwirkung treten – es ergeben sich Schichtpaketstöße (Abbildung 3.2 c). Der Abstand zwischen den Schichtpaketen beträgt dabei $7 - 7,3 \text{ \AA}$ (Jasmund und Lagaly, 1993, 4). Ein Tonmineral-Kristallblättchen, wie beispielsweise in Abbildung 3.3 erkennbar, besteht wiederum aus mehreren Schichtpaketstößen.

Es wird zwischen dioktaedrischen und trioktaedrischen Mineralen unterschieden. In dioktaedrischen Mineralen sind ein Drittel aller Oktaederlücken unbesetzt, da dreifach positiv geladene

⁵Für den Lehmabau sind Lehme mit hohem Kalk- oder Humusanteil wenig geeignet (Minke, 2004).

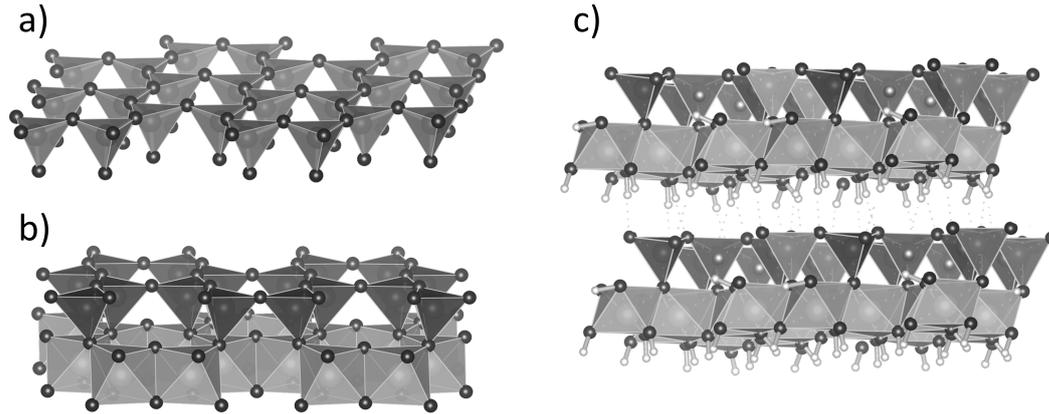


Abbildung 3.2.: **Struktur der Tonminerale.** Tetraederschicht(a), Tetraeder- und Oktaederschicht (b); Schichtpaketstoß inkl. Wasserstoffbrückenbindungen (c)

Aluminium-Ionen vorliegen. Bei einer Besetzung mit Magnesium-Ionen (nur zweifach positiv geladen) sind hingegen alle Lücken besetzt – hier wird von trioktaedrischen Mineralen gesprochen. Beispiele bei den Zweischichttonmineralen sind die dioktaedrischen Kaolinite ($\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$) (Abbildung 3.2 a) und die trioktaedrischen Serpentinminerale ($\text{Mg}_3[\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$). Zu den Kaolinmineralen zählt auch Halloysit, bei dem eine Wasserschicht eingelagert ist, woraus ein Schichtabstand von 10 \AA resultiert. Die Bindung zwischen den Schichtpaketen über Wasserstoffbrücken kann daher nicht ausgebildet werden. Dadurch können die zwischen den Tetraeder- und Oktaederschichten vorhandenen Spannungen (bedingt durch eine leichte Versetzung der Tetraeder gegenüber den Oktaedern) wirksam werden, was in einer abweichenden röllchenförmigen Struktur des Minerals resultiert (Abbildung 3.3).

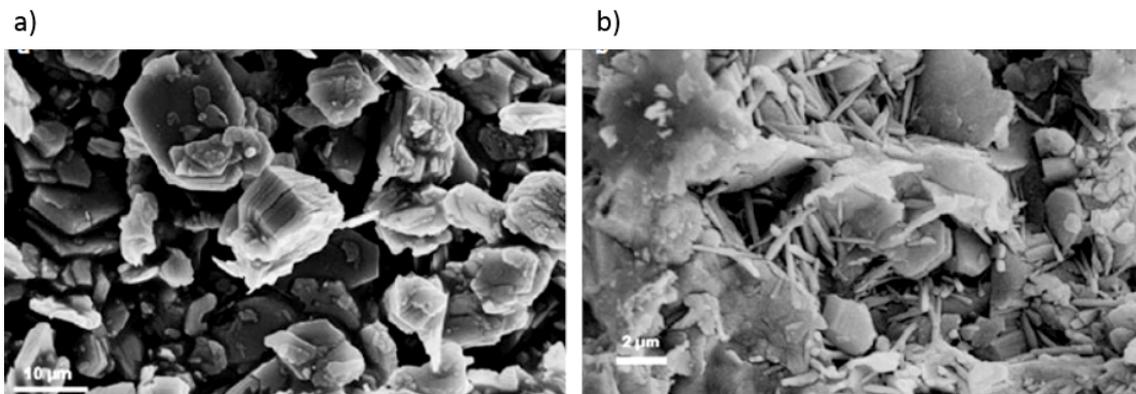


Abbildung 3.3.: **Kaolinit- und Halloysitminerale.** Plättchenförmige Kaolinitminerale (a), sowie Kaolinit und röllchenförmiger Halloysit (b) (aus: (Scheffer et al., 2010, 16)

Dreischichttonminerale (oder 2:1 Tonminerale) haben eine zusätzliche Tetraederschicht an die Oktaederschicht angelagert (vgl. Abbildung 3.4). Dies bedeutet zunächst, dass Hydroxygruppen zumeist lediglich an den Kanten der Oktaederschichten anzutreffen sind (Brigatti et al., 2006,

23) und sich daher keine Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Schichtpaketen ausbilden können. Bei ungeladenen Dreischichtmineralen wie Talk oder Pyrophyllit werden die einzelnen Schichtpakete daher lediglich über van-der-Waals-Kräfte zusammengehalten (ebd., 38). Häufig ist bei den 2:1- Mineralen allerdings eine Schichtladung vorzufinden, welche auf Substitution der Zentralatome zurückzuführen ist. Dabei werden bei den dioktaedrischen Mineralen dreiwertige Ionen durch zweiwertige ersetzt – bei den trioktaedrischen zweiwertige durch einwertige. Eine Konsequenz dieses isomorphen Ersatzes ist ein negativer Ladungsüberschuss, welcher die Schichtladung des Tonminerals bestimmt. Des Weiteren kommen Schichtladungen dadurch zustande, dass nicht alle Oktaederplätze besetzt sein müssen und in den Tetraederschichten ebenfalls Substitutionen auftreten (beispielsweise werden vierfach positiv geladene Siliciumionen durch dreifach positiv geladene Aluminiumionen ersetzt) (Brigatti et al., 2006, 25). Zudem führt die aufgrund der höheren Elektronegativitätsdifferenz stärkere Polarisierung der Al-O- bzw. Mg-O- Bindung zu einer größeren negativen Ladung am Sauerstoff-Atom (Schoonheydt und Johnston, 2006). Der negative Ladungsüberschuss wird durch die Einlagerung von Kationen in die Zwischenschichten der Schichtpaketstöße kompensiert (Abbildung 3.4). Im Falle der Minerale mit Schichtladung erfolgt die Bindung zwischen den Teilchen daher über ionischen Wechselwirkungen. Zu den geladenen Dreischichtmineralen zählen unter anderem Smectite, Vermiculite und Illite. Ebenso können in Abhängigkeit des pH-Wertes die Hydroxygruppen deprotoniert vorliegen und somit zur Ladung beitragen.

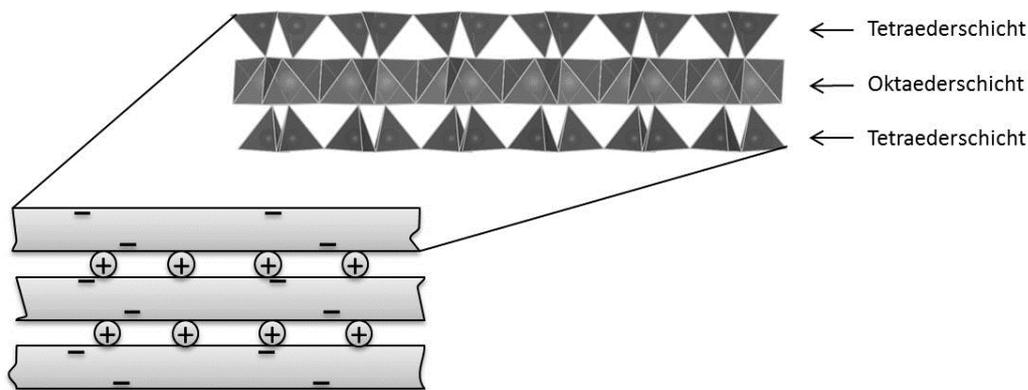


Abbildung 3.4.: **Schematischer Aufbau eines Dreischichttonminerals** (aus: Janssen et al. (2014, 39))

3.2. Eigenschaften des Lehms

Im Folgenden werden die Eigenschaften von Lehm und Lehmböden näher beschrieben und mit dem zuvor beschriebenen strukturellen Aufbau verknüpft. Zunächst soll dabei auf das Kationenaustauschvermögen von Lehmböden, die Plastizität sowie das Quellen und Schwinden eingegangen werden, bevor im Anschluss die Stoffumwandlungen beim Brennen des Lehms näher betrachtet werden.

3.2.1. Kationenaustauschvermögen

Das Ionenaustauschvermögen von Lehmböden ist insbesondere von Art und Menge der Tonminerale abhängig, da in erster Linie die in den Zwischenschichten eingelagerten Kationen gegen andere verfügbare Kationen ausgetauscht werden können. Man spricht hier auch von der Kationenaustauschkapazität eines Bodens, welche sich aus der Anzahl und Wertigkeit der gebundenen Kationen bezogen auf eine gegebene Masse ergibt (Scheffer et al., 2010, 141f, Mitchell und Soga, 2005, 55). Die Kationenaustauschkapazität ist für die Nährstoffverfügbarkeit für die Pflanzen und damit für die Bodenfruchtbarkeit von Bedeutung.

Der Austausch erfolgt nach bestimmten Prinzipien. Generell verdrängen höherwertige Kationen niederwertigere, da die Bindung aufgrund der höheren Ladung stärker ist (z. B. $\text{Na}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Al}^{3+} < \text{Th}^{4+}$) (Scheffer et al., 2010, 141f). Weiterhin werden kleinere Ionen durch größere verdrängt (z. B. $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Rb}^+ < \text{Cs}^+$). Grund hierfür ist, dass die größere Hydrathülle der kleineren Ionen die Annäherung an die negativ geladenen Oberflächen erschwert (ebd.). Dabei hängt der tatsächlich stattfindende Austausch immer auch von der jeweiligen Ionenkonzentration im Boden ab. Aufgrund der teilweise auftretenden Bindung von Kationen an die äußeren Oberflächen von 1:1-Mineralen besitzen diese ebenfalls häufig ein gewisses Ionenaustauschvermögen, auch wenn dieses im Vergleich zu Dreischichtmineralen wie Montmorillonit sehr gering ist.

Zudem besitzen Tonminerale im sauren Bereich ein geringes Anionenaustauschvermögen (Jasmond und Lagaly, 1993, 90). Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Sauren die Hydroxygruppen protoniert vorliegen und somit eine positive Ladung aufweisen, an welche Anionen gebunden werden.

3.2.2. Plastizität, Quellen und Schwinden

Die plastische Verformbarkeit ist sowohl für Lehmböden als auch für die Nutzung des Lehms von Bedeutung. So gibt die Plastizität eines Bodens Hinweise auf die Gefügestabilität und damit auf dessen Empfindlichkeit gegenüber äußeren Kräften wie starker Wasserzufuhr (Scheffer et al., 2010, 212); zudem macht diese Eigenschaft den Lehm als Bau- und Werkstoff interessant. Unter Plastizität wird die Eigenschaft eines Stoffes verstanden, sich bei äußerer Krafteinwirkung ohne Risse zu deformieren und diese Deformation nach Entfernen der Kräfte beizubehalten (vgl. Moore, 1967, 52). Bezogen auf keramische Massen wie Lehm und Ton wird in diesem Zusammenhang auch häufig von Bildsamkeit gesprochen.

Lehm ist mit Wasser plastisch verformbar. Eine prominente Art, die Plastizität eines (Lehm-) Bodens zu bestimmen, ist die Atterberg-Methode (nach dem schwedischen Forscher Albert Atterberg (1846-1916)), die auf den Übergängen zwischen den Konsistenzbereichen beruht (Minke, 2004)(Andrade et al., 2011). Hierbei werden die Fließgrenze sowie die Ausrollgrenze der Probe ermittelt. Die Fließgrenze stellt den Wassergehalt (ausgedrückt in Prozent des Trockengewichts) dar, bei welcher der Lehm zu fließen beginnt. Zur Messung der Fließgrenze wird eine spezielle

Apparatur verwendet (Minke, 2004, 41f). Die Ausrollgrenze bemisst den Wassergehalt, bei welchem eine Probe beim Ausrollen einer 3 mm dicken Walze zerreißt. Die Differenz beider Werte ergibt die Plastizitätszahl, welche als Maß für die Bildsamkeit der Probe steht: je höher der Wert, desto plastischer ist die Masse. So weisen stark sandige Lehme eine Plastizitätszahl kleiner 5 % auf, während stark tonige Lehme Werte von 15-95 % annehmen können (Minke, 2004, 43). Für die Plastizität bedarf es zum einen der Eigenschaft der Gleitfähigkeit, d. h. die einzelnen Tonpartikel dürfen beim Verschieben gegeneinander nicht den Kontakt verlieren. Zum anderen muss die neue Position wieder durch stabile Bindungen fixiert werden; dies erfordert die Eigenschaft der Haftfähigkeit (Adhäsion). Als ursächlich für die Haftfähigkeit kann die Zusammensetzung des Lehms im Allgemeinen und die Struktur der Tonminerale im Besonderen angesehen werden; für die Gleitfähigkeit ist das Wasser bzw. dessen Wechselwirkung mit den entsprechenden Bestandteilen ausschlaggebend. Im Folgenden sollen die für diese Eigenschaften relevanten strukturellen Besonderheiten des Lehms bzw. der Tonminerale näher betrachtet werden.

Korngröße und Oberfläche der Bestandteile

Wie beschrieben hängt die Formbarkeit des Lehms davon ab, wie „fett“ der Lehm ist – also wie hoch der Anteil von Tonmineralen ist. Je fetter der Lehm, desto besser lässt er sich formen. Der Ton dient dabei als Bindemittel, welches die größeren Sandkörner zusammenhält.

Tonminerale zeichnen sich auch durch ihre geringe Korngröße aus. Eine direkte Folge der geringen Partikelgröße stellt die größere äußere Oberfläche einer bestimmten Menge Ton gegenüber beispielsweise einer identischen Menge Sand dar. Je größer die Oberfläche, desto mehr Wechselwirkungen können zwischen den einzelnen Teilchen sowie zwischen den Teilchen und dem Wasser auftreten (Salmang et al., 2007, 584, Schroeder, 2013, 88). Ein Zusammenhang zwischen Korngröße und Plastizität wurde in der Forschung bereits früh konstatiert (Rominger, 1954, Salmang, 1927, Whittaker, 1939). Während man diese Beziehung in Untersuchungen bezogen auf isolierte, reine und insbesondere nicht quellfähige Tonminerale relativ eindeutig zeigen konnte (Whittaker, 1939, White, 1949), weisen beispielsweise Farrar und Coleman (1967) darauf hin, dass - bezogen auf natürliche Tone mit verschiedenen Tonmineralen - die externe Oberfläche kaum, die gesamte spezifische Oberfläche jedoch stark mit der Plastizität korreliert. Bei der gesamten spezifischen Oberfläche werden neben den äußeren Oberflächen auch jene der Zwischenschichten berücksichtigt. Diese können bei den Dreischichtmineralen die äußeren Oberflächen um ein Vielfaches übersteigen. Besonders ausgeprägt plastische Tonminerale wie Montmorillonit weisen daher nicht nur eine sehr geringe Korngröße auf, sondern besitzen zugleich eine große innere Oberfläche, an welche Wassermoleküle angelagert werden können. Während Kaolinit eine externe Oberfläche von 10-20 m²/g aufweist, beträgt die des Montmorillonits 50-120 m²/g. Unter Berücksichtigung der inneren Oberflächen ergeben sich für Montmorillonit sogar Werte von 700-800 m²/g (Mitchell und Soga, 2005, 67). Die spezifische Oberfläche, resultierend aus Korngröße und Schichtstruktur, hat also starke Auswirkungen auf die Plastizität.

Teilchenform

Neben der Korngröße ist auch die Form der einzelnen Bestandteile von Bedeutung. Wilson beschreibt bereits 1936, dass plättchenförmige Minerale eine weit höhere Plastizität aufweisen als solche mit abweichender Struktur (Wilson, 1936). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die plättchenartige Struktur ein aneinander Vorbeigleiten der Minerale ermöglicht und zudem zu größeren Kontaktflächen zwischen den Mineralen führt, was wiederum die Haftfähigkeit erhöht. (Salmang et al., 2007, 585). Demgegenüber weisen kuglige oder winklige Sandkörner nur wenige Berührungspunkte untereinander auf; zwischen den einzelnen Partikeln befinden sich daher Grobporen.

Dass Korngröße und -form kein hinreichendes Kriterium für plastische Verformbarkeit darstellen, wird deutlich, betrachtet man die Plastizität von fein gemahlene Quarzkörnern oder Halloysit – einem zu den Kaolinmineralen zählenden röllchenförmigen Tonmineral (Köster und Schwertmann, 1993, 34f; vgl. Abbildung 3.3 b). Beispielsweise beschreibt Wilson (1936) fein gemahlene Quarz trotz der so erreichten geringen Teilchengröße (max. 2,5 µm) als nicht plastisch. Gleiches gilt für Halloysit (White, 1949, Bain, 1971). Wie diese Beobachtungen zeigen, sind weitere Faktoren notwendig, um eine ausgeprägte Plastizität zu erzielen, welche in erster Linie auf Wechselwirkungen zwischen den Tonmineralen und dem Wasser beruhen.

Struktur der Teilchen und Wechselwirkungen

Oberfläche und Form der Teilchen sind in erster Linie daher von Bedeutung, weil sie die Anzahl der möglichen Wechselwirkungen zwischen den Tonmineralen und dem Wasser beeinflussen, welche für die Plastizität in erster Linie verantwortlich sind.

Die Adsorption von Wasser an die Tonmineraloberflächen kann über Wasserstoffbrückenbindungen durch die Hydratation adsorbierter Kationen oder Dipol-Dipol-Wechselwirkungen erfolgen. Bei Zweischichttonmineralen wie Kaolinit kann Wasser nur an die äußeren Schichten angelagert werden, da die Plättchen untereinander relativ fest über Wasserstoffbrücken verbunden sind (s.o.). Wasser lagert sich um die einzelnen Schichtpaketstöße und erlaubt so eine Verschiebung der Teilchen gegeneinander. Bei den Dreischichttonmineralen kann Wasser auch in die Zwischenschichten eingelagert werden – die Plastizität ist daher deutlich größer, da auch die Schichtpakete gegeneinander verschoben werden können. Die Bindung erfolgt dabei primär über die Hydratation der eingelagerten Kationen. Bei einer Einlagerung von bis zu vier Wasserschichten (was einem Schichtabstand von etwa 20 Å entspricht), bleiben die Schichten miteinander verbunden, können aber gegeneinander verschoben werden. Erfolgt eine weitere Aufweitung, geht der Zusammenhalt verloren und es bilden sich kolloidale Dispersionen (Lagaly, 1993, 107ff).

Ob der Ton bei einem bestimmten Wassergehalt formbar ist oder die Fließgrenze überschritten wird, ist nicht nur von der Menge des Wassers, sondern ebenso von der Art der austauschbaren Kationen abhängig. Im Allgemeinen führt bei quellfähigen Tonmineralen eine höhere Valenzzahl der Kationen zu einer Abnahme der Fließgrenze; während sie bei nicht quellfähigen Tonmineralen in einer Steigerung resultiert (Mitchell und Soga, 2005, 99). Kaolinit verhält sich beispielsweise im Falle der Anwesenheit von Ca^{2+} -Ionen plastisch, während bei identischer Wassermenge

3. Fachliche Grundlagen

und Na^+ -Ionen ein Gießschlicker vorliegt und die Plastizität verlorenght (Lagaly, 1993, 130, Müller-Vonmoss und Kohler, 1993, 316). Der Grund hierfür liegt in der Anordnung der einzelnen Kaolinit-Teilchen in Abhängigkeit der vorliegenden Ionen. Natrium-Ionen liegen in diffusen Ionenschichten um die Tonminerale vor, da aus sterischen Gründen nicht jede Negativladung durch ein einwertiges Kation kompensiert werden kann (Salmang et al., 2007, 571). Diese positiv geladenen Ionenschichten führen zu einer Abstoßung der einzelnen Teilchen – die Plastizität ist gering. Bei zweiwertigen Calciumionen bildet sich dagegen keine diffuse Ionenschicht und die Anziehungskräfte überwiegen (vgl. Abbildung 3.5). Anders verhält es sich bei dem Dreischicht-

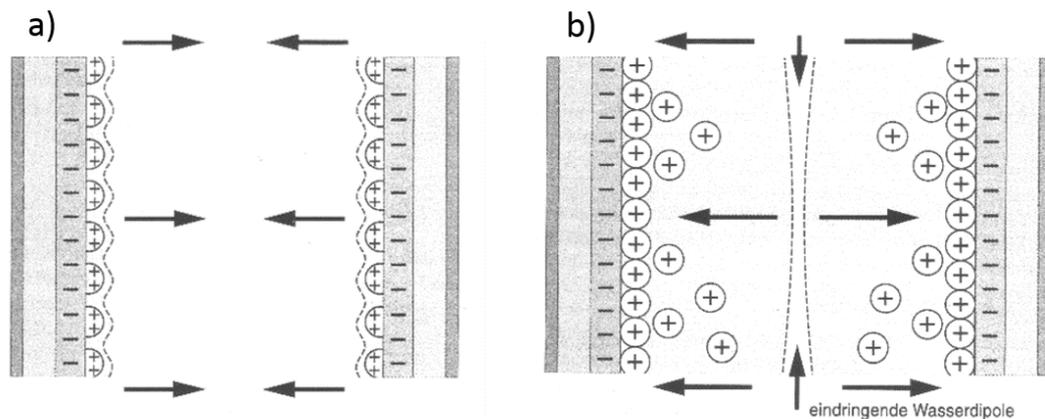


Abbildung 3.5.: **Ein- und zweifach geladene Kationen an der Tonmineraloberfläche.** Zweifach geladenen Ionen (a) binden anders als einfach geladene (b) fest an die Tonmineraloberfläche und bilden keine diffusen Ionenschichten. Die diffusen Schichten führen zur Anziehung von Wassermolekülen und stoßen sich gegenseitig ab. (aus: Bochter, 1995b) ⁶

mineral Montmorillonit, bei welchem die Zwischenschichten für das Verhalten bedeutsam sind: Bei der Anwesenheit von Calcium-Ionen ist der Schichtabstand durch die enge Bindung geringer, wohingegen im Fall von gebundenen Natrium-Ionen größere Mengen Wasser eingelagert werden können und eine starke Quellung erfolgt. Als Konsequenz lassen sich die Silikatschichten in der Na^+ -Form leicht gegeneinander verschieben und die Plastizität ist höher (Müller-Vonmoss und Kohler, 1993, 316f).

Der hier gezeigte Überblick über die Faktoren, welche die plastische Verformbarkeit des Lehms bedingen, verdeutlicht, dass es sich um ein relativ komplexes Phänomen handelt. Die Zusammensetzung des Lehms im Allgemeinen und die Struktur der Tonminerale im Besonderen sowie die Wechselwirkungen der Bestandteile mit dem Wasser sind von großer Bedeutung.

⁶Bochter (Bochter, 1995b, Bochter, 1995a) verdeutlicht mit den Abbildungen die flockende Wirkung zweiwertiger und die dispergierende Wirkung einwertiger Ionen, um somit Tonmobilisierung und -immobilisierung zu erklären.

Quellen und Schwinden

Die Eigenschaft des Schrumpfens von Lehm kann bei fetten Lehmböden nach einer längeren Trockenperiode an Rissen in Böden beobachtet werden. Dieser Prozess ist reversibel - bei Wasserzugabe quillt Lehm wieder auf. Die Wechsel zwischen trockener und gequollener Zustandsform wirken sich auf das Bodengefüge, d. h. die Anordnung der Bodenpartikel, aus (Scheffer et al., 2010, 189).

Beispielsweise ist die Kenntnis des Trockenschwindmaßes für den Lehmabbau essentiell (Minke, 2004, 39ff). Beim Lehm hängt dieses – ähnlich wie bei der Formbarkeit – von der Art und der Menge der vorhandenen Tonminerale ab. So ergeben sich beispielsweise für magere Lehme Schwindmaße von 1-2,5 %, bei sehr fetten Lehmen liegen die Werte bei 4-10 % (Bender, 2011, 17). Bei tonigen Lehmen spielt die Art der Tonminerale eine wichtige Rolle. Grundlage der Quellung stellen die Schichtstruktur der Minerale und die zum Ladungsausgleich eingelagerten Kationen dar (Müller-Vonmoos und Kohler, 1993, 326). So besitzen die dreischichtigen Smekтите ein deutlich höheres Quellungsvermögen als die zweischichtigen Kaolinite. Auch hier ist der Grund in der Teilchengröße und der spezifischen Oberfläche zu suchen – die Dreischichttonminerale haben die Möglichkeit, Wasser zusätzlich in die Zwischenschichten einzulagern (s. o.). Hier lassen sich zwei Prozesse beschreiben. Zunächst werden die eingelagerten Kationen hydratisiert und es kommt zur intrakristallinen Quellung; treibende Kraft ist hierbei die freiwerdende Hydratationsenthalpie. Weiterhin ist die Ionenkonzentration an der äußeren Oberfläche gegenüber dem umgebenden Wasser aufgrund der diffusen Ionenschichten (s. o.) erhöht, was zu einer zusätzlichen osmotischen Quellung führt.

Wie die hier angeführten Grundlagen der Quell- und Schwindprozesse zeigen, sind die relevanten Faktoren weitestgehend mit jenen der Plastizität identisch. Daher besitzen Tonminerale mit hoher Plastizität im Allgemeinen auch ein höheres Quellungs-/ Schwindpotential (Wagner, 2006, 366).

3.2.3. Wasserkapazität, Wasseraufnahmevermögen

Die Wasserkapazität bezeichnet die Eigenschaft eines Bodens, Wasser aufzunehmen und gegen die Schwerkraft zu halten. Die maximale Wasserkapazität am natürlichen Standort wird auch als Feldkapazität bezeichnet. Mit dem Begriff Wasseraufnahmevermögen (oder Wasserbindevermögen) wird jene Wassermenge bezeichnet, die eine getrocknete Bodenprobe bezogen auf ihre Trockenmasse aufnehmen kann (Hiltmann und Stribny, 1998, 102). Für das Pflanzenwachstum ist die Fähigkeit zur Wasseraufnahme und -speicherung des Bodens essentiell, da so eine Wasserversorgung auch über eine gewissen Trockenperiode sicherstellt wird.

Die Wasserkapazität in Böden ist von der Porenverteilung sowie der Oberfläche der Bodenteilchen abhängig (Blume, 2004, 18, 37f).⁷

Differenziert wird zwischen Feinporen ($\varnothing < 0,2 \mu\text{m}$), Mittelporen ($\varnothing 0,2-10 \mu\text{m}$) und Grobporen ($\varnothing > 10 \mu\text{m}$) (Scheffer et al., 2010, 181). Die größeren Grobporen sind (in Abhängigkeit von der

⁷Das Porenvolumen wird sogar aus der Wasserbindung abgeleitet (Blume, 2004, 18).

Wassersättigung) zumeist wasserfrei (Sickerwasser), alle anderen können zur Wasserspeicherung beitragen. Die Menge und Verteilung der Poren hängt mit der Korngrößenverteilung im Boden und der Kornform zusammen. Ein sandiger Boden weist einen hohen Grobporenanteil auf, während tonige Böden mit einem hohen Feinporenanteil einhergehen (ebd.). Auch ein hoher Humusanteil bewirkt in der Regel einen größeren Fein- und Mittelporenanteil. In Tonböden ist damit auch das Gesamtporenvolumen zumeist größer als in grobkörnigen Böden, wobei dieses auch entscheidend von der Struktur und Anordnung der Teilchen abhängt. Allerdings geht die hohe Wasserkapazität der Tonböden nicht unbedingt mit einer großen Menge pflanzenverfügbaren Wassers einher, da das Adsorptionswasser zu fest gebunden ist, um von den Pflanzen aufgenommen zu werden (Scheffer et al., 2010, 181). Das die Teilchen umgebende Adsorptionswasser wird vom Kapillarwasser abgegrenzt, welches den Porenraum ausfüllt. Lehm Böden weisen aufgrund der gemischten Korngrößenverteilung in der Regel eine größere Lagerungsdichte auf und damit zum Teil sogar ein geringeres Porenvolumen als dies in Sandböden der Fall ist (Scheffer et al., 2010, 180). Dennoch ist die Wasserkapazität deutlich höher, da die im Sand befindlichen Grobporen nicht in der Lage sind, Wasser zu halten.

3.2.4. Lehmbrand

Lehm erfährt beim Brennen – dem Erhitzen auf über 1000 °C – eine Stoffumwandlung. Die entstehenden Produkte fallen unter den Begriff *Keramik*, wobei dieser relativ weit gefasst ist. Er umschreibt nach Haase und Nützenadel alle Werkstoffe, „die dadurch zustande kommen, daß ein Pulver geformt und die Form durch Einwirkung hoher Temperaturen verfestigt wird.“ (Haase und Nützenadel, 1968 zitiert nach Salmang et al., 2007, 2). Eine ausführliche Betrachtung von Rohstoffen, welche zu keramischen Werkstoffen verarbeitet werden, findet sich bei Salmang et al. (2007). Innerhalb der Silikatkeramik werden die Werkstoffe weiter nach Farbe und Wasseraufnahmefähigkeit des Scherbens unterschieden (ebd., S. 691ff).⁸ So ist Lehm zu den grobkeramischen Erzeugnissen zu zählen, da der Scherben mit bloßem Auge als inhomogenes Gefüge zu erkennen ist.

Der Brennprozess

Die chemischen Prozesse, die während des Brennvorgangs ablaufen, sind aufgrund der großen Anzahl verschiedener Verbindungen im Ausgangsstoff sehr komplex. Lehm enthält je nach Zusammensetzung unterschiedliche Mengen an Magerungsmitteln, Flussmitteln und Tonmineralen. Während erstere im Brennprozess kaum eine Rolle spielen, beeinflussen die Flussmittel und die Tonminerale die Brennvorgänge maßgeblich. Flussmittel wie beispielsweise Feldspäte aber auch Eisenoxide sorgen für die Ausbildung einer Schmelzphase und erlauben ein Brennen bei geringeren Temperaturen (Salmang et al., 2007, 646). Wichtige Erkenntnisse über die genauen Reaktionen beim Brennen wurden durch die Differentialthermoanalytik (DTA), die Elektronen-

⁸Alle gebrannten (und noch nicht glasierten) keramischen Werkstoffe werden als Scherben bezeichnet; vor dem Brand wird von Grünkörper oder Grünling gesprochen.

3. Fachliche Grundlagen

mikroskopie und die Röntgenbeugung gewonnen (Salmang et al., 2007, 645). Bislang am besten untersucht sind die im Folgenden aufgezeigten Vorgänge beim Brand von Kaolinit:

Während des Trocknungsprozesses wird zunächst das freie (Poren-)Wasser abgegeben; im Anschluss wird bei 200–450 °C auch das adsorbierte Wasser freigesetzt (Henning und Knöfel, 2002, 124). Bei ca. 500 °C werden beim Kaolinit zunächst die Hydroxygruppen abgespalten und als Wasser freigesetzt. Das Produkt wird als Metakaolinit bezeichnet.



Bei Erhitzen auf über 1000 °C bildet sich schließlich Mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), wobei Kieselsäure freigesetzt wird. Wie Abbildung 3.6 zeigt, handelt es sich bei Mullit um nadelförmige Kristalle.⁹ Die Mullit-Kristalle liegen im gebrannten Scherben eingebettet in einer Glasphase vor, wobei der Anteil der Glasphase im Porzellan höher ist als in grobkeramischen Produkten wie Ziegeln (Henning und Knöfel, 2002, 124). Der Anteil der Schmelzphase (welche nach Auskristallisation der Glasphase entspricht) bedingt zudem auch das Schrumpfungsverhalten beim Brennen.

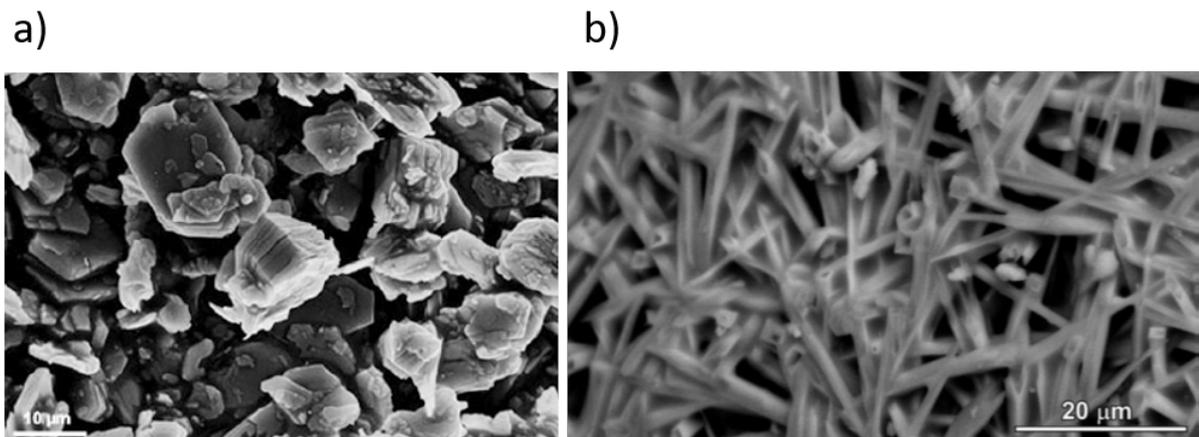


Abbildung 3.6.: **Kaolinit und Mullit.** Elektronenmikroskopische Aufnahmen von Kaolinit (a) und dem Produkt nach Sinterung, Mullit (b). Während Kaolinit die für Tonminerale typische plättchenförmige Struktur aufweist, bildet Mullit nadelförmige Kristalle. (a: aus Scheffer et al., 2010, 16; b: aus Bernardo et al., 2014)

Brennbedingungen und Brennfarbe

Entscheidend für das Resultat des Brennvorgangs ist neben der Zusammensetzung des Grünkörpers, der Brenntemperatur und Brennzeit auch die Brennatmosfera. Gerade bei natürlichen Lehmen ist es wichtig, den Brand zunächst unter oxidierenden Bedingungen durchzuführen, um organische Bestandteile zu entfernen. Im weiteren Verlauf beeinflusst die Atmosphäre in erster Linie die Brennfarbe des Produktes. Verantwortlich für die Ausbildung der Farbe sind insbesondere verschiedene Eisenoxide (Salmang et al., 2007, 663f). Eisen liegt häufig als Hämatit

⁹Nadelförmig ist der Mullit nur, wenn es sich um Sekundärmullit handelt, welcher sich aus dem Primärmullit bei Anwesenheit einer Schmelzphase bildet (vgl. Schüller 1993, S. 298f)

3. Fachliche Grundlagen

(Fe_2O_3) vor. Während des Brandes kann sich dieses in der Schmelzphase fein verteilen, was in einer Rotfärbung der Produkte resultiert. Weiterhin kann Hämatit aber auch erst während des Brandes aus anderen Eisenverbindungen wie Goethit $\alpha\text{-FeO(OH)}$ entstehen (Stepkowska und Jefferis, 1992). In Abhängigkeit von der Temperatur wird Hämatit aber auch zu dreiwertigen Eisenverbindungen reduziert. Wird in reduzierender Atmosphäre gebrannt, kommt es durch Reduktion des Eisens zur Bildung von FeO oder Fe_3O_4 . Die Schwarzfärbung dieser Verbindungen führt dementsprechend auch zu dunklen Keramikprodukten. Auch Gelbfärbungen treten auf; diese sind insbesondere auf das Vorhandensein von Calciumoxiden zurückzuführen.

4. Lehm als Lerngegenstand

Nachdem im vorherigen Kapitel die fachliche Sicht auf den Stoff Lehm im Mittelpunkt stand, soll im Folgenden der Frage nach der Eignung von Lehm als Unterrichtsgegenstand für den Sachunterricht unter besonderer Berücksichtigung der chemischen Perspektive nachgegangen werden. Zunächst werden dazu Berührungspunkte mit der Bodenart im Alltag und Gründe, die dafür sprechen sich mit dieser auseinanderzusetzen, aufgezeigt. Mit dem Fokus auf naturwissenschaftliches Lernen werden anschließend bereits existierende Ansätze beschrieben und so eine Einschätzung des Forschungsstandes vorgenommen. Schließlich werden unter Bezugnahme auf die Basiskonzepte des Faches Chemie und den Perspektivrahmen Sachunterricht Möglichkeiten für chemisches Lernen aufgezeigt.

4.1. Lehm – ein Alltagsgegenstand

Auch heute wohnt nach Minke (2004) noch rund ein Drittel der Weltbevölkerung in Lehmhäusern. Dies weist auf die große Bedeutung der Bodenart als Baustoff hin. Insbesondere in Entwicklungsländern und an Orten, wo die klimatischen Bedingungen es erlauben, wird Lehm als günstiger Baustoff häufig verwendet. Doch auch hierzulande zeugen beispielsweise Fachwerkbauten, neben einigen reinen Lehmbauten (vgl. Güntzel, 1988), von der historischen Bedeutung des Lehms im Bauwesen. Heutzutage erlebt Lehm durch ein gesteigertes Interesse an nachhaltigen Baustoffen und durch das Wissen um seine positiven Einflüsse auf das Raumklima eine Renaissance als Baumaterial (Minke, 2004).

Diese herausragende Bedeutung als Baustoff in vielen Gebieten weltweit deutet zugleich auf eine weiträumige Verbreitung der Bodenart hin. Gerade in Deutschland beinhalten die meisten Böden einen gewissen Lehmanteil. Zurückzuführen ist dies auf Löss-Ablagerungen während des Pleistozäns, die mit den ursprünglichen Sedimentgesteinen zu Böden mit gemischter Korngrößenverteilung wie eben dem Lehmboden führten (Düwel et al., 2007, 35). Aufgrund dieser weitflächigen Verbreitung kann Lehm als für viele Kinder in Deutschland bekannt angesehen werden. Zum Beispiel kommen sie beim Spiel draußen mit Lehm in Kontakt.

Neben den bei vielen Grundschulkindern bereits vorhandenen bzw. leicht herstellbaren spielerischen Kontakten mit Lehm bietet dieser als Unterrichtsgegenstand zahlreiche weitere Anknüpfungspunkte. Insbesondere für den Sachunterricht, in welchem verschiedene Perspektiven berücksichtigt werden sollen (vgl. 2.3), können vielfältige Lernanlässe geschaffen werden. So kann mit Bezug zur historischen und geographischen Perspektive an vielen Orten die Bedeutung des Lehms

4. Lehm als Lerngegenstand

in der Vergangenheit thematisiert werden. Beispielsweise zeugen viele Straßennamen von Abbau oder Nutzung des Lehms früher (z.B. Lehmholstraße, Am Lehmberg, Ziegeleistraße). Über die Nutzung als Baustoff, z.B. das Konstruieren von Lehmbauten oder das Herstellen sowie Brennen von Ziegeln, wird auch die technische Perspektive berührt. Die Nutzung von Lehm lässt sich in diesem Zuge im Sinne einer Bildung für nachhaltige Entwicklung unter ökologischer, sozialer und ökonomischer Perspektive bewerten. Zugleich können beim Gestalten und Formen mit Lehm auch kreative und künstlerische Fähigkeiten im Mittelpunkt des Lernens stehen. Die vielfältigen Bezüge zur naturwissenschaftlichen Perspektive werden weiter unten ausführlicher dargestellt.

Klaus Otte 2010 hebt in einem Artikel die religiöse Bedeutung des Lehms hervor: als Schöpfungsmaterial schaffe er Harmonie zwischen „göttlicher Schöpfung und Menschendasein, zwischen Natur und des Menschen Konstrukt und Produkt“ (ebd., S. 9). Gerade diese von Otte aufgezeigte Brücke zwischen Natur auf der einen und Kultur sowie Religion auf der anderen Seite lässt Lehm als Lerngegenstand besonders vielseitig und ergiebig werden und kann helfen, dem häufig empfundenen Kontrast von Mensch und Natur entgegenzuwirken. Der Stellenwert von Lehm in ökologischen Systemen wird im Rahmen der Betrachtung von Lehm als Bodenart offensichtlich. 2015 wurde von den Vereinten Nationen zum internationalen Jahr des Bodens erklärt. In dem in diesem Zusammenhang vorgelegten Bericht zum Zustand der weltweiten Bodenressourcen beklagen die Autoren den geringen Stellenwert des Bodenschutzes und führen dies unter anderem auf das geringe Bewusstsein für diese wichtige Ressource innerhalb der Bevölkerung und unter Politikern zurück (ITPS und FAO, 2015). Die Ursache hierfür sehen die Autoren auch darin, dass in unserer urbanisierten Gesellschaft kaum mehr ein direkter Kontakt zum Boden gegeben ist. Dabei handelt es sich um eine durch immer weiter fortschreitende Flächenversiegelung, Bodenerosion sowie Bodenverschmutzung hochgradig bedrohte und zugleich für das Leben auf der Erde unersetzliche Ressource (ebd.). Die Beschäftigung mit Lehm im Unterricht kann hier einen wertvollen Beitrag im Sinne des Bodenschutzes leisten, indem durch direkten Körperkontakt ein unmittelbarer Bezug zum Boden aufgebaut und in einem weiteren Schritt die Bedeutung der Ressource herausgestellt wird.

Die hier aufgezeigten vielfältigen Bereiche und Themenfelder, welche durch Lehm berührt werden, deuten bereits auf ein hohes Bildungspotenzial in verschiedenen Disziplinen hin. Bislang existieren in erster Linie Projekte, die auf die Förderung kreativer, sozialer und/oder motorischer Fähigkeiten abzielen.¹⁰ Im Fokus dieser Arbeit steht hingegen die nähere Betrachtung der Möglichkeiten für chemisches Lernen anhand des Inhaltsfeldes Lehm. Bereits existierende Ansätze, die sich auf die Förderung naturwissenschaftlicher Kompetenzen beziehen, sollen daher im Folgenden näher betrachtet werden.

¹⁰Beispiele finden sich unter <http://www.buntekuh-hamburg.de> oder <http://lehmbau.weebly.com/-kinderwerkstatt.html>. Siehe auch (Duchert, 2015).

4.2. Ansätze zum naturwissenschaftliches Lernen anhand von Lehm

Eine umfangreiche Ausarbeitung, in der dezidiert Lehm als Lerngegenstand in den Blick genommen wird, konnte in der Literatur nicht gefunden werden. Relativ umfassend haben sich jedoch Audrey Rule und Stephen Guggenheim mit dem naturwissenschaftlichen Lernen anhand von Ton beschäftigt. Unter dem Titel *Curriculum for Clay Science* veröffentlichten sie Vorschläge, wie anhand von Aktivitäten mit Ton in den USA geforderte Bildungsstandards für naturwissenschaftliches Lernen für unterschiedliche Jahrgangsstufen umgesetzt werden können (Rule und Guggenheim, 2007). Dazu zeigen sie die Bezüge zu den *Benchmarks for Science Literacy* sowie den *National Science Education Standards*¹¹ auf und schlagen jeweils unterschiedliche Aktivitäten vor, um dort aufgeführte zentrale Konzepte anhand des Tons zu erarbeiten. Außerdem gehen sie der Frage nach, was bereits über die Schwierigkeiten mit diesen zentralen Konzepten seitens der Lernenden bekannt ist (s. Tabelle 4.1). Für sehr junge Kinder (vom Kindergarten bis zur zweiten Klasse; also etwa vier- bis siebenjährige) betonen sie die Bedeutung direkter Erfahrungen und gehen von der Untersuchung verschiedener Böden aus, um beispielsweise anhand von Vergleichen von Sand und Ton die besonderen Eigenschaften des feuchten Tons hervorzuheben (ebd. S. 261). Weiterhin schlagen sie vor, über Haushaltsartikel wie Keramikgeschirr oder Katzenstreu Produkte sowie den Nutzen von Ton kennenzulernen. Auch das Werken mit Ton wird als eine Aktivität genannt.

Für Schüler_innen der Primarstufe sehen die Autoren die Möglichkeit über die Nutzung elektronenmikroskopischer Aufnahmen die kristalline Struktur der Tonminerale zu verdeutlichen. Trockener wie gebrannter Ton werden hinsichtlich ihrer Eigenschaften miteinander verglichen. Eine Auseinandersetzung mit dem Boden und dem Verhalten unterschiedlicher Bodenarten in Wasser schließt sich an. Darüber hinaus sollen die Schüler_innen anhand der Geschichte der Keramik die Entwicklung wissenschaftlicher Ideen und Erfindungen nachvollziehen (ebd., S.262).

In der weiterführenden Schule stellen Rule und Guggenheim geologische Untersuchungen, wie die von Gestein sowie bodenkundliche Betrachtungen in den Vordergrund. Zudem könnten nun der Aufbau und die Eigenschaften von Tonmineralen und deren Bedeutung für die industrielle Nutzung von Ton thematisiert werden. Schließlich wird am Ende der Schullaufbahn (in der *High School*) die Kristallstruktur der Tonminerale aufgegriffen, um so das Zustandekommen der besonderen Eigenschaften wie das Ionenaustauschvermögen erklären zu können (ebd., S. 262). Mit Verweis auf ihr umfassendes Buch *Teaching Clay Science* (Rule und Guggenheim, 2002) zeigen sie verschiedene Experimente auf, mit deren Hilfe das chemische Verhalten von Ton untersucht werden kann; unter anderem werden die Adsorption des Farbstoffes Methylen-Blau oder das unterschiedliche Sedimentationsverhalten bei Zugabe verschiedener Salze genannt.

¹¹Die *Benchmarks for Science Literacy* sowie die *National Science Education Standards* sind Richtlinien für das Lernen in den Naturwissenschaften bezogen auf verschiedene Jahrgangsstufen – ähnlich den in Deutschland üblichen Bildungsstandards. Beide Projekte weisen inhaltlich eine starke Ähnlichkeit auf (Bybee, 2006).

4. Lehm als Lerngegenstand

Tabelle 4.1.: *Curriculum for Clay Science* (Auszug aus Rule und Guggenheim (2007))

	Standard from Benchmarks for Science Literacy	Standard from National Science	Clay Concept and Suggested Activity
Early childhood	<p>Change is something that happens to many things. [PreK-2; 4. The Physical Setting, C. Processes that shape the Earth]</p> <p>Things can be done to materials to change some of their properties, but not all materials respond the same way to what is done to them. [PreK-2; 4. The Physical Setting, D. The Structure of Matter]</p>	<p>Materials can exist in different states - solid, liquid, and gas.</p> <p>Some common materials, such as water, can be changed from one state to another by heating or cooling. [K-4; Physical Science Content Standard B, Properties of objects and materials]</p>	<p>Clay changes when it is wet. Wet clay can be pressed, rolled, and molded into intricate shapes. When clay dries, it is brittle. <i>Activity: Experiment with rolling, pressing, molding, impressing damp clay. Emphasize descriptive vocabulary.</i></p> <p>Activity: Compare wet/damp sand to wet/damp clay. Compare wet clay to dry clay. Emphasize descriptive vocabulary.</p>
Elementary students	<p>Materials may be composed of parts that are too small to be seen without magnification. [3-5; 4. The Physical Setting, D. The Structure of Matter]</p>	<p>Tools help scientists make better observations, measurements, and equipment for investigations. They help scientists see, measure, and do things that they could not otherwise see, measure, and do. [K-4; Science and Technology Content Standard E, Understanding about Science and Technology]</p>	<p>Clay particles are too small to be seen without a microscope.</p> <p>Activity: Examine scanning electron microscope (SEM) photographs of clays and other substances (salt crystals, computer chips) or life forms (dust mites, insects).</p>
Middle school students	<p>Heating and cooling cause changes in the properties of materials. [3-5; 4. The Physical Setting, D. The Structure of Matter]</p> <p>Naturally occurring materials such as wood, clay, cotton, and animal skins may be processed or combined with other materials to change their properties. [3-5; 8. The Designed World B. Materials and Manufacturing]</p>	<p>Substances react chemically in characteristic ways with other substances to form new substances (compounds) with different characteristic properties. [5-8; Physical Science, Content Standard B, Properties and Changes of Properties in Matter]</p>	<p>Clay can be baked (fired) at a very high temperature in a special oven (kiln) and permanently changed into a harder material (ceramic). Dishes, flowerpots, toilets, tiles, sewer pipes are often ceramic.</p> <p>Activity: Compare natural clay or greenware with a variety of ceramic items. Describe physical properties when wet, dry, and fired.</p>

Tabelle 4.1.: *Curriculum for Clay Science* (Auszug aus Rule und Guggenheim (2007))

High school students	Atoms often join with one another in various combinations in distinct molecules or in repeating three-dimensional patterns. An enormous variety of biological, chemical, and physical phenomena can be explained by changes in the arrangement and motion of atoms and molecules [in crystals]. [9-12, 4. The Physical Setting D. The Structure of Matter]	The physical properties of compounds reflect the nature of the interactions among its molecules. These interactions are determined by the structure of the molecule, including the constituent atoms and the distances and angles between them. [9-12; Physical Science Content Standard B, Structure and Properties of Matter]	The physical properties of clays are a reflection of their chemical composition and crystal structures. Some clays disperse easily in water and absorb cations. Changes in the chemistry of the water can affect the flocculation of clays. Activity: Investigate dispersion, absorption, and cation exchange of swelling clay
----------------------	--	---	--

Rule und Guggenheim stellen somit umfassende Aktivitäten vor, wie mit Bezug zum Ton ein Lernen in den Naturwissenschaften gelingen kann. Praktisch erprobt wurde das Curriculum bislang jedoch kaum; die Autoren verweisen auf zwei Studien, in welchen einzelne Aktivitäten bezogen auf die siebte Klassenstufe (Dubey und Rule, 2007) bzw. die Vorschule (House, 2007) evaluiert wurden. House (2007) untersuchte, inwiefern das (wissenschaftliche) Vokabular von einundzwanzig vier- und fünfjährigen Kindern durch Unterricht, in welchem die Eigenschaften von Ton im Vordergrund stehen, gefördert werden kann. Ton wird dabei zur Förderung des Wortschatzes als besonders geeignet angesehen, da durch die vielen Zustandsformen (feucht, trocken, gebrannt, glasiert) ein breites Spektrum von Eigenschaften abgedeckt wird. Daraus resultiert zugleich eine Vielzahl von beschreibenden Adjektiven, welche in diesem Zuge gelernt werden können. Bei der im pre-post-Testdesign durchgeführten Untersuchung kommt House zu dem Ergebnis, dass insbesondere Vokabeln, die im Rahmen von interaktiven Interventionen (wie dem „Schlagen“ des Tons zur Beseitigung von Luftporen) genutzt wurden, gelernt wurden. Beschreibende Aktivitäten hingegen zeigten keine oder kaum Effekte (ebd., 272). Inwiefern allerdings Ton hier einen besonderen Mehrwert aufweist, bleibt offen, da die Studie ohne Kontrollgruppe durchgeführt wurde.

Eine Studie im pre-post-Design führten auch Dubey und Rule (2007) mit einundzwanzig Schüler_innen der siebten Jahrgangsstufe durch, um den Nutzen entwickelter Lehrmaterialien¹² zur industriellen Nutzung des Tons und zu dessen Eigenschaften zu eruieren. Neben dem pre-post-Test wurde einige Wochen nach der Intervention in offener Form zum einen erneut das Wissen abgefragt, zum anderen wurde eine subjektive Einschätzung („What did you enjoy“, „What would you change“) eingefordert. Die Autoren kommen zu positiven Ergebnissen sowohl den Wissenszuwachs als auch die Bewertung der Teilnehmenden betreffend.

Mit dem *Curriculum for Clay Science* stellen Rule und Guggenheim einen umfassenden und

¹²Die Materialien wurden in Form eines Stationenlernens eingesetzt. Bei den Materialien handelt es sich in erster Linie um Kartenspiele, bei welchem Ton-Produkte mit den Eigenschaften der jeweiligen Tonmineralen gepaart werden sollen.

4. Lehm als Lerngegenstand

detaillierten Ansatz vor, der Anregungen für zahlreiche Aktivitäten beinhaltet. Viele Aspekte sind hier auch für Lehm als Lerngegenstand von Bedeutung. Allerdings wurden weder bei der Konstruktion des Curriculums noch in den bisher hierzu veröffentlichten Studien die Vorstellungen der Schüler_innen berücksichtigt bzw. erhoben. Auch die Autoren selbst fordern nach einer Sichtung der Literatur zu Schülervorstellungen bezogen auf zentrale Konzepte zum Lerngegenstand Ton mehr Forschung auf diesem Gebiet (Rule und Guggenheim, 2007, 264). Insgesamt sieht Rule in *clay science* “a long-neglected curriculum topic that may be used to support learning of foundational scientific principles“ (Rule, 2007, 311).

In Deutschland wurde in den 1970er Jahren am Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften Kiel (IPN) im „IPN-Curriculum Chemie“ Lehm als Teil einer Unterrichtseinheit („Wir lernen beim Bau einer Hütte Stoffarteigenschaften und Stoffartumwandlungen kennen und unterrichten uns über die Bekämpfung von Bränden“) für den Chemie-Anfangsunterricht aufgegriffen. (Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften Kiel, 1972). Darin werden verschiedene Bodenarten auf ihre Eigenschaften hin untersucht und Lehm als die für den Hüttenbau geeignetste Bodenart identifiziert. Weiterhin werden Entstehung der Lehmlagerstätten, der Lehmbrand und schließlich das Löschen und Verhüten von Bränden thematisiert. Besonderer Wert wird auf das verwendete Vokabular gelegt: Es wird von Stoffarteigenschaften gesprochen; weiterhin wird der Begriff Scherben anstelle des „gebrannten Lehms“ mit dem Ziel verwendet, Eigenschaftsänderungen klar mit Stoffumwandlungen in Verbindung zu bringen (vgl. häufige Fehlvorstellungen in Kapitel 2.3.3). Die phänomenologische Betrachtung steht im Curriculum im Vordergrund; atomistische Deutungen werden bewusst erst in späteren Jahrgängen vorgenommen (ebd., S. 5). Die Einheit wurde an Schülern verschiedener Schulformen erprobt. Hierbei standen Wissenszuwachs sowie Interesse der Schüler_innen im Vordergrund. Erhebungen der Vorstellungen der Schüler_innen zu den betrachteten Inhalten sowie Betrachtungen von Lernhemnissen fanden hingegen nicht statt.

Neben diesen umfangreicheren Ansätzen werden in einigen Publikationen einzelne Aspekte oder Experimente mit Ton beschrieben, die chemisches Lernen ermöglichen sollen. Hesselink et al. Hesselink et al. (2007) beschreiben verschiedene Experimente mit Bentonit, einem Sedimentgestein mit hohem Montmorillonit-Anteil, und zeigen dabei die Verwendung des Tons auf. Beispielsweise wird experimentell die Adsorption von Duftstoffen untersucht und damit die Anwendung als Haustierstreu demonstriert. Während die Autoren für die Sekundarstufe I noch einen vorwiegend phänomenologischen Zugang vorschlagen, sehen sie für die Sekundarstufe II die Möglichkeit Struktur-Eigenschaftsbeziehungen zu erarbeiten (ebd.). Weiterhin betonen Sie die Komplexität des Themenfeldes und die damit verbundene Notwendigkeit zur didaktischen Reduktion für die Nutzung im Unterricht.

In einem weiteren Ansatz wirft Bochter (1995b) anhand des Bodenprofils stark lehmhaltiger Parabraunerden die Frage nach den Vorgängen bei Tonverlagerungen im Boden auf. Ziel seines

4. Lehm als Lerngegenstand

Vorgehens ist die Thematisierung der Bedeutung von Kationen und insbesondere deren Einfluss auf bodenbildende Prozesse. Hierzu demonstriert Bochter anhand von Experimenten, wie sich verschiedenwertige Kationen auf Suspendierung und Flockung von Tonmineralen auswirken, um so Vorgänge bei der Tonmineralmobilisierung und -immobilisierung zu veranschaulichen. Zudem entwirft er modellhafte Darstellungen der Ladungsverhältnisse an den Tonmineraloberflächen (vgl. Abbildung 3.5) und weist zu Recht auf den bisherigen Mangel an anschaulichen Abbildungen für den Schulgebrauch hin (ebd., S.15).

Schmidkunz (2011) stellt anhand des Kontextes Katzenstreu, welcher häufig unter anderem aus Tonmineralen besteht, verschiedene Experimente für die Jahrgangsstufen 9 und 10 vor, mit deren Hilfe zum einen die Zusammensetzung und zum anderen die Adsorptionseigenschaften des Materials untersucht werden. Auf eine schülergerechte Deutung der Versuche wird in dem Artikel jedoch kaum eingegangen.

In einer jüngeren Ausgabe der Zeitschrift „Naturwissenschaften im Unterricht –Chemie“ (Nr.150/2015) wird Bauchemie als Thema für den Chemieunterricht diskutiert. Im Basisartikel „Bauchemie – ein Thema für den Unterricht?“ weisen Sommer et al. (2015) darauf hin, dass zwar einzelne Baustoffe (insbesondere Kalk und Gips) fachdidaktisch für den Chemieunterricht aufbereitet wurden, diese aber nur zu einem geringen Teil in den Schullehrbüchern aufgegriffen werden. Zugleich betonen sie den zentralen Stellenwert von Sand und Ton für verschiedene Baustoffe und nennen die mangelnde Unterrichtung der Chemie des Siliziums als Erschwernis für das Unterrichten der Baustoffchemie. Weiterhin sehen sie Möglichkeiten anhand des Lebenszyklus‘ eines Bauwerkes Aspekte der Nachhaltigkeit aufzugreifen, wobei als Beispiel die Zementproduktion genannt wird. Im gleichen Heft beschreibt Pfeifer (2015) die Herstellung und den Brand von Ziegeln. Er schlägt in diesem Zusammenhang ein analytisch-synthetisches Unterrichtskonzept für die Mittelstufe vor, in welchem ausgehend vom ungebrannten Rohziegel zunächst die Zusammensetzung mittels Schlämmanalyse ermittelt und anschließend die Rohstoffe (Ton, Sand, Sägespäne) in geeignetem Verhältnis mit Wasser gemischt werden, um einen Ziegel zu erhalten. Er betont, dass beim Brennen von Ziegeln eine Stoffumwandlung auf phänomenologischer Ebene erfahrbar wird (ebd., S. 17).

Insgesamt lässt sich feststellen, dass mit Ausnahme des von Rule und Guggenheim vorgestellten Ansatzes die meisten vorgeschlagenen Interventionen für die weiterführenden Schulen gedacht sind. Bezogen auf die Grundschule wird hingegen mehr Material veröffentlicht, welches den weiter gefassten Themenkomplex Boden umfassend behandelt (z. B. Stucki und Turrian, 1996, Projekt hypersoil (<http://hypersoil.uni-muenster.de/index.html> abgerufen am 25.01.16), Meiers und Sauerborn, 2013) . In diesen Veröffentlichungen werden auch Experimente zur Zusammensetzung des Bodens wie die Sedimentationsanalyse und zu einzelnen Eigenschaften wie beispielsweise der Wasserkapazität vorgeschlagen (z. B. Natur- und Umweltschutz-Akademie NUA 2005, 65f, 95f). Lehm wird hier allenfalls nebenbei erwähnt.

Die Literatur hält somit insbesondere Vorschläge für Experimente bereit. Für die Lernenden

angemessene Deutungen sowie Forschungsvorhaben, in denen die Perspektiven der Schüler_innen in den Blick genommen werden, sind hingegen kaum oder nur in Ansätzen beschrieben. Mit der vorliegenden Arbeit soll dieses Desiderat chemiedidaktischer Forschung angegangen und ein Beitrag dazu geleistet werden, die beschriebene Forschungslücke zu schließen, indem der Fokus weniger auf mögliche Vorgangsweisen bei der Thematisierung von Lehm gelegt wird, sondern vielmehr, ausgehend von der Perspektive der Kinder bezüglich der Phänomene, Vorschläge für eine naturwissenschaftliches Lernen ermöglichende Auseinandersetzung mit Lehm abgeleitet werden.

4.3. Überlegungen zum naturwissenschaftlichen Lernen anhand von Lehm

Im Folgenden werden eigene Überlegungen zu den Möglichkeiten naturwissenschaftlichen Lernens anhand von Lehm formuliert. Dazu werden die in Kapitel 3 aus fachlicher Sicht beleuchteten Phänomene auf ihre Konformität zu den für den Chemieunterricht aufgestellten Basiskonzepten und zur naturwissenschaftlichen Perspektive des Perspektivrahmens Sachunterricht hin untersucht. Zunächst erfolgt hierzu eine Beschreibung der Basiskonzepte und ihrer Bedeutung für den Chemie- sowie Sachunterricht. Abschließend werden, basierend auf diesen Überlegungen, jene Phänomene skizziert, die bei der im nachstehenden Kapitel 5 beschriebenen Untersuchung im Vordergrund stehen.

4.3.1. Basiskonzepte

Basiskonzepte wurden für die naturwissenschaftlichen Unterrichtsfächer formuliert, um Lerninhalte der einzelnen Fächer zu strukturieren und übergeordnete Konzepte für die Schüler_innen transparent werden zu lassen. Demuth et al. (2005, 57) definieren den Begriff „Basiskonzept“ als die „strukturierte Vernetzung aufeinander bezogener Begriffe, Theorien und erklärender Modellvorstellungen, die sich aus der Systematik eines Faches zur Beschreibung elementarer Prozesse und Phänomene historisch als relevant herausgebildet haben“. Im Rahmen von Chemie im Kontext (ChiK) wurden fünf Basiskonzepte formuliert (vgl. Bündler et al., 2003, Demuth et al., 2005):

- Das Stoff-Teilchen-Konzept
- Das Struktur-Eigenschaftskonzept
- Das Donator-Akzeptor-Konzept
- Das Energie-(Entropie-)Konzept
- Das Konzept des chemischen Gleichgewichts und der Reaktionsgeschwindigkeit

Davon wurden das Stoff-Teilchen- und das Struktur-Eigenschaftskonzept von der Kultusministerkonferenz in die Bildungsstandards für den mittleren Schulabschluss in Chemie übernommen,

4. Lehm als Lerngegenstand

die weiteren wurden unter „Chemische Reaktion“ und „energetische Betrachtungen bei Stoffumwandlungen“ zusammengefasst (Kultusministerkonferenz, 2005b). Im Lehrplan NRW¹³ werden die ersten beiden der zuvor genannten für die Sekundarstufe I unter „Struktur der Materie“ subsumiert; als weitere werden „Chemische Reaktion“ und „Energie“ genannt. Für die Sekundarstufe II wird hier wiederum stärker differenziert: Struktur-Eigenschaft; Donator-Akzeptor, Chemisches Gleichgewicht sowie Energie werden als Konzepte hinzugezogen (Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2008, Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, 2014).

Basiskonzepte sollen grundlegende Prinzipien innerhalb eines Faches hervorheben und so Inhalte auf gemeinsame Strukturen zurückführen, um eine Aneignung vernetzten Wissens bei den Lernenden zu unterstützen. In den verschiedenen naturwissenschaftlichen Disziplinen ähneln bzw. überlappen die Basiskonzepte teilweise. In der Physik werden beispielsweise unter anderem die Konzepte „Wechselwirkung“, „Materie“ sowie „Energie“ genannt (Kultusministerkonferenz, 2005c). Verwandt mit dem Struktur-Eigenschaftskonzept in der Chemie ist das Struktur-Funktions-Konzept in der Biologie; sowohl in den Bildungsstandards der Biologie als auch der Physik wird das Konzept „System“ angeführt. Die Vernetzung von Wissen soll sich somit nicht nur auf die Inhalte eines Faches beschränken (vertikale Vernetzung), sondern darüber hinaus auch fächerübergreifend wirken (horizontale Vernetzung) (Demuth et al., 2005).

In den Bildungsstandards für den mittleren Schulabschluss werden die im folgenden beschriebenen Kompetenzen für die einzelnen Basiskonzepte als zentral angesehen (vgl. Kultusministerkonferenz (2005a), 11):

Bezogen auf das *Stoff-Teilchen-Konzept* lernen die Schüler_innen Stoffe und deren Eigenschaften kennen und beschreiben den Aufbau von Stoffen, den Bau von Atomen sowie Bindungen bzw. Wechselwirkungen zwischen Teilchen mit Hilfe von Modellen. Die Vielfalt der Stoffe wird auf Kombination und Anordnung der Teilchen zurückgeführt.

In Hinblick auf das *Struktur-Eigenschafts-Konzept* ordnen die Schüler_innen Stoffe nach ihren Eigenschaften oder nach ihrer Zusammensetzung bzw. der Struktur der Teilchen, sie deuten Stoffeigenschaften auf Teilchenebene und leiten aus den Eigenschaften Verwendungsmöglichkeiten der Stoffe ab.

Das Basiskonzept *Chemische Reaktion* umfasst die Beschreibung und Deutung von Stoff- und Energieumwandlungen (auf Phänomen- und Teilchenebene) und das Aufstellen von Reaktionsgleichungen. Weiterhin lernen die Schüler_innen Donator-Akzeptor-Reaktionen kennen, beschreiben die Umkehrbarkeit chemischer Reaktionen und Möglichkeiten der Steuerung von Reaktionen durch Variation der Reaktionsbedingungen. Stoffkreisläufe werden als Systeme chemischer Reaktionen identifiziert.

Beim Konzept der *energetischen Betrachtungen bei Stoffumwandlungen* soll den Schüler_innen bewusst werden, dass sich im Zuge chemischer Reaktionen der Energiegehalt des Reaktionssy-

¹³Der Lehrplan des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen wird hier beispielhaft erwähnt, da die Untersuchung in NRW durchgeführt wurde.

4. Lehm als Lerngegenstand

stems durch Austausch mit der Umgebung verändert. Energetische Erscheinungen führen sie auf Energieumwandlung zurück und beschreiben die Wirkung von Katalysatoren auf chemische Reaktionen.

Im Rahmen des Projektes SINUS-Transfer Grundschule, welches der Weiterentwicklung des mathematischen und naturwissenschaftlichen Unterrichts an Grundschulen diene (s. unter www.sinus-an-grundschulen.de (abgerufen am 19.01.16)), wurden auch Basiskonzepte für den naturwissenschaftlichen Sachunterricht entwickelt, mit dem Ziel, so die Anschlussfähigkeit des erarbeiteten Wissens zu verbessern (Demuth und Rieck, 2005, Demuth et al., 2007). Folgende Basiskonzepte wurden vorgeschlagen:

- „Auf der Welt geht nichts verloren“ (Konzept der Erhaltung)
- „Mit Energie kann man etwas tun“ (Konzept der Energie)
- „Dinge beeinflussen sich wechselseitig“ (Konzept der Wechselwirkung)
(Demuth et al., 2005, 3)

Unter dem Konzept der Erhaltung wird nach den Autoren zweierlei subsumiert: zum einen die Einsicht, dass Stoffe zwar verändert werden können, aber dennoch nicht verschwinden und zum anderen, dass Stoffe aus kleinsten Teilchen bestehen (ebd., 4). Ersteres könne sowohl anhand von chemischen Prozessen wie Verbrennungen als auch von physikalischen Vorgängen wie der Verdunstung erarbeitet werden. Der Aufbau von Stoffen aus kleinsten Teilchen ließe sich inhaltlich durch die Betrachtung von Lösungsvorgängen verdeutlichen (ebd., 7).

Das Konzept der Energie konstituiert sich aus den Kategorien „Energie ist an einen Träger gebunden und kann aus diesem Träger freigesetzt werden“ sowie „Energie kann von einer Form in eine andere umgewandelt werden“ (ebd. 7ff). Als ein Beispiel zur inhaltlichen Umsetzung, anknüpfend an den Erfahrungshintergrund der Kinder, wird der Themenkomplex „Ernährung“ vorgeschlagen, um so anhand der Energiegehalte von Nahrungsmitteln Energieträger und die Nutzung der Energie zu erarbeiten (ebd. 9f).

Auch das Konzept der Wechselwirkung kann sowohl in der belebten als auch der unbelebten Natur beobachtet werden. Untergliedert wird es in die Kategorien „Eine Wechselwirkung verändert immer etwas“ sowie „Die Art und Weise der Wechselwirkung kann unterschiedlich sein“ (ebd. 10ff). Die Veränderung kann nach Ansicht der Autoren beispielsweise an der Abkühlung des einen bei gleichzeitiger Erwärmung eines anderen Körpers untersucht werden. Auch das Thema Feuer/Verbrennungen dient der Veranschaulichung: um ein Feuer zu entfachen bedarf es der Wechselwirkung der drei Faktoren „brennbarer Stoff“, „Sauerstoff“ sowie „Zündquelle“. Die Autoren weisen darauf hin, dass „man noch weitere Konzepte formulieren könnte“ (ebd. 3); jedoch wurde Wert darauf gelegt, die Anzahl möglichst überschaubar zu halten.

Auch in der 2013 erschienenen überarbeiteten Auflage des Perspektivrahmens Sachunterricht werden die vorgeschlagenen Basiskonzepte aufgeführt, inhaltlich jedoch nicht weiter konkretisiert.

4. Lehm als Lerngegenstand

Untergliedert werden die Themenbereiche der unbelebten Natur hingegen in „Eigenschaften von Stoffen/Körpern“, „Stoffumwandlungen“ sowie „physikalische Vorgänge“ (Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU), 2013, 43f). Neben den oben erwähnten Basiskonzepten wird hier auch das Konzept des Stoffes/der Materie genannt.

Wodzinski (2011a) sieht die Orientierung an Basiskonzepten kritisch bzw. bezweifelt deren Nutzen für den Sachunterricht. Insbesondere bezweifelt sie den Mehrwert der Verwendung eines Teilchenmodells in der Grundschule zur Deutung von Phänomenen (ebd.; 11ff). Zugleich spricht auch sie sich für eine verstärkte Vernetzung und Strukturierung des im Sachunterricht erworbenen Wissens aus. Sie verweist hier auf die bereits oben angeführten *Benchmarks for Science Literacy*. Wodzinski vertritt die Ansicht, dass die in den *Benchmarks* festgehaltenen Inhaltscluster mit nach Jahrgangsstufen differenzierten inhaltlichen Zielen ebenfalls den Aufbau strukturierten und vernetzten Wissen ermöglichen, „allerdings ohne dies auf einige wenige exponierte Konzepte zu reduzieren“ (ebd. S.18). Nach ihrer Ansicht kommt es in der Grundschule vielmehr darauf an, Themen gründlich zu bearbeiten, so dass Zusammenhänge auch wirklich verstanden werden (ebd., 22).

Auf der anderen Seite kann bzw. soll meines Erachtens ebendieses, von Wodzinski geforderte, gründliche Verstehen zu übergeordneten Konzepten hinführen. In der Grundschule können diese Konzepte sicher nur angebahnt werden und inwiefern es Sinn macht diese explizit, beispielsweise in Form von Wandtafeln wie bei Demuth und Rieck (2005), aufzugreifen bleibt fraglich. Dennoch muss – sollen gelernte Inhalte auf andere Problemstellungen übertragen werden können – das Ziel verfolgt werden, übergeordnete Konzepte zu verdeutlichen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll untersucht werden, welche chemischen Konzepte anhand des Lerngegenstandes Lehm in welchem Maße angebahnt werden können. Hierzu bietet es sich an, zu prüfen, inwiefern für das Fach grundlegende Konzepte am Gegenstand erarbeitet werden können. Aus diesem Grund werden in den folgenden Ausführungen die Basiskonzepte, wie sie in den Bildungsstandards für die weiterführende Schule, formuliert sind hinzugezogen. Dies macht auch in Hinblick auf die geforderte Anschlussfähigkeit des im Sachunterricht der Grundschule erarbeiteten Wissens Sinn. Inwiefern die einzelnen Betrachtungen sich bereits für die Primarstufe anbieten, wird im Anschluss diskutiert.

4.3.2. Bezug von Lehm zu den Basiskonzepten

Im Folgenden werden, auf die einzelnen Basiskonzepte bezogen und zunächst unabhängig von den Schulstufen, Erkenntnismöglichkeiten anhand des Lerngegenstandes Lehm aufgezeigt.

Lehm ist als Stoffgemisch im Sinne des **Stoff-Teilchen-Konzeptes** interessant. So weist das Gemisch bestimmte Eigenschaften auf, die als Produkt der Eigenschaften der einzelnen Bestandteile anzusehen sind. Durch physikalische Trennverfahren wie die Sieb- und Schlämmanalyse können die Bestandteile nach ihrer Korngröße getrennt werden. Hierbei werden auch die Grenzen

4. Lehm als Lerngegenstand

der einzelnen Verfahren offensichtlich. Weiterhin kann eine nähere Untersuchung der einzelnen Bestandteile erfolgen: Mit Hilfe von Mikroskopen bzw. elektronenmikroskopischen Aufnahmen können erste Hinweise auf die Form der Teilchen gewonnen werden. Betrachtungen auf atomarer Ebene bieten sich für ältere Schüler_innen an. Sie zeigen zum einen Unterschiede im Aufbau der einzelnen Bestandteile bei ähnlicher atomarer Zusammensetzung (Quarzsand als Gerüstsilikat; Tonminerale als Schichtsilikate). Zum anderen wird deutlich, dass auch der Bestandteil „Ton“ eine große Gruppe verschiedener Minerale umfasst, die im Aufbau zwar viele Gemeinsamkeiten aufweisen, deren Unterschiede allerdings in zum Teil deutlichen Abweichungen bei den Eigenschaften, wie zum Beispiel dem unterschiedlichen Verhalten bei Zugabe diverser Salze (vgl. Kapitel 3.2.2), resultieren. Die geologisch unter den Begriffen subsumierten Minerale stellen keine reinen Stoffe dar; hier bietet sich eine Reflexion über den Stoffbegriff in der Chemie und der Begriffsverwendung im Alltag oder in anderen Fachbereichen an. Wie die Überlegungen auch zeigen, kann das Stoff-Teilchen-Konzept auf unterschiedlichen Ebenen (Stoffgemisch – Stoffe gleicher Korngröße – Reinstoffe gleicher Zusammensetzung – Teilchenebene) anhand von Lehm erarbeitet werden.

Das **Struktur-Eigenschafts-Konzept** wird durch viele Phänomene berührt; so hängen alle bereits unter Kapitel 3.2 beschriebenen Eigenschaften unmittelbar mit der Zusammensetzung des Stoffgemisches und der Struktur der einzelnen Stoffe zusammen. Ein einfacher Vergleich fetten und mageren Lehms kann aufzeigen, dass der Anteil der einzelnen Bestandteile am Stoffgemisch ausschlaggebend für dessen Eigenschaften ist. Beispielsweise hängt das Schrumpfungsverhalten unmittelbar mit dem Tonanteil zusammen; hier kann auch der Frage nachgegangen werden, welcher Lehm eher für den Lehmbruch geeignet ist. Weiterhin sind die Eigenschaften auf die Struktur der Tonminerale zurückzuführen. So ist die Formbarkeit von der Plättchenform und den Oberflächeneigenschaften der Tonminerale abhängig (vgl. Kapitel 3.2.2). Weiterhin sind die Wechselwirkungen zum Wasser von großer Bedeutung. Auch das Kationenaustauschvermögen sowie die hohe Wasserkapazität sind ein Resultat der Tonmineralstruktur und entsprechender Wechselwirkungen. Die Thematisierung von Lehm als Boden, der Nährstoffe und Wasser für die Pflanzen bereithält, kann mit Bezug auf diese Eigenschaften erfolgen.

Anhand des Lehmbrandes kann das Konzept in umgekehrte Richtung verdeutlicht werden: da der gebrannte Lehmziegel andere Eigenschaften aufweist als der Grünling, muss beim Brand ein neuer Stoff entstanden sein. Die unterschiedlichen Strukturen lassen sich auch durch den Vergleich elektronenmikroskopischer Aufnahmen erkennen. Schließlich kann nicht nur ein Bezug zu den Eigenschaften sondern auch zur Verwendung erfolgen: beispielsweise wird in ariden Gebieten häufig mit Lehm gebaut, während hierzulande gebrannten Ziegeln aufgrund ihrer Wasserfestigkeit eine größere Bedeutung zukommt.

Der Lehmbrand ist natürlich auch das Thema, mit dem sich das **Konzept der energetischen Betrachtung bei Stoffumwandlungen** aufgreifen lässt. Es wurde bereits erwähnt, dass hier über die unterschiedlichen Eigenschaften auf phänomenologischer Ebene auf eine Stoffumwandlung geschlossen werden kann. Weiterhin können durch Variation der Reaktionsbedingungen (z.

B. Temperatur, Sauerstoffzufuhr) unterschiedliche Produkte erzielt werden. Dennoch gibt es hier auch Grenzen, die in der unbekanntem Zusammensetzung natürlich gewonnenen Lehms begründet liegen. Hier kann ein Vergleich zu Erzeugnissen aus Tonen bekannter Zusammensetzung erfolgen. Nicht zuletzt wird das **Konzept der Energie** berührt, wenn man das Brennen des Lehms unter dem Blickwinkel des Energieverbrauchs betrachtet und die Verwendung gebrannten sowie ungebrannten Lehms beim Bau unter Umwelt-Gesichtspunkten gegenübergestellt.

Die Ausführungen zeigen, dass – wie auch bei Rule und Guggenheim dargestellt (s. o.) – viele Betrachtungen auf unterschiedlichen Anforderungsniveaus erfolgen können und sich somit bereits für die Grundschule eignen könnten. In der nachstehenden Auflistung werden von den fachlichen Aspekten unter Rückbezug auf die Basiskonzepte jene herausgestellt, die sich möglicherweise für eine Thematisierung in der Grundschule anbieten.

1. Eigenschaften des Lehms

In erster Linie sollten in der Grundschule all jene Eigenschaften im Vordergrund stehen, für die die notwendige didaktische Reduktion eine für Grundschul Kinder nachvollziehbare und zugleich für späteres Lernen ausbaubare Erklärung liefern kann. Zugleich sollte es sich um für die Kinder relevante und fragwürdige Phänomene handeln. Im Rahmen der Untersuchung näher betrachtet werden sollen daher die Phänomene:

- Formbarkeit von Lehm
- Quellen und Schwinden
- Wasserspeichervermögen
- Lehmbrand

Die ersten drei der genannten Phänomene sind dabei auf ähnliche Prinzipien zurückzuführen: Die Wechselwirkungen mit Wasser, insbesondere jene zwischen den Tonmineralen und Wasser, sind bedeutsam. Neben dem Faktor Wasser könnte im Primärbereich auch die Zusammensetzung des Lehms aufgegriffen (s.u.) und ein Zusammenhang zwischen Ton und Formbarkeit hergestellt werden. Weiterhin kann gegebenenfalls die geringe Korngröße der Tonminerale bereits in der Grundschule thematisiert werden. Auch wenn der Zusammenhang von Korngröße und Plastizität weniger bedeutsam ist als die spezifische Oberfläche, so ist diese Verknüpfung doch als fachlich ausbaufähig zu erachten, da dieselben Prinzipien zugrunde liegen. Denkbar ist auch, hier mit Mikroskopiebildern und Modellen zu arbeiten. Beim Lehmbrand sind die Vorgänge im Einzelnen zwar sehr komplex, den Kindern offenbart sich jedoch ein möglicherweise überraschendes und faszinierendes Phänomen. Es wird zudem eine Stoffumwandlung auf Phänomenebene erkennbar, da es sich nach dem Brennen um einen Stoff mit völlig anderen Eigenschaften handelt.

2. Zusammensetzung des Lehms

Auch die Zusammensetzung lässt sich auf unterschiedlichen Ebenen betrachten. In der Grundschule ist sicherlich Lehm als Stoffgemisch interessant. Dieses kann zunächst hap-

4. *Lehm als Lerngegenstand*

tisch beispielsweise mit der Fingerprobe, die auf der unterschiedlichen Plastizität der Bodenarten beruht, untersucht werden. Weiterhin kann das Stoffgemisch in seine Bestandteile aufgetrennt werden. Als Verfahren bietet sich hier das Sieben an, was den Kindern als Trennverfahren zumeist bekannt ist. Weiterhin bietet auch die Sedimentationsanalyse einen Ansatz, um das Stoffgemisch aufzutrennen. Auch hier können die so getrennten Bestandteile beispielsweise mit Hilfe von Mikroskopen bzw. elektronenmikroskopischen Aufnahmen detaillierter betrachtet werden.

Die beiden Bereiche Eigenschaften und Zusammensetzung/Bestandteile des Lehms stellen die Schwerpunkte der im Folgenden beschriebenen Untersuchung dar. Im nachstehenden Kapitel 5 wird die konkrete Umsetzung erläutert.

5. Erhebung der Lernendenperspektiven zum Lerngegenstand Lehm

Wie in Kapitel 2.2 erläutert, stellt die Untersuchung der Perspektiven von Grundschulkindern bezüglich des Lerngegenstandes Lehm ein zentrales Ziel dieser Arbeit dar. Dies gilt als ein grundlegender Schritt für die Spezifizierung und Strukturierung des Lerngegenstandes im Sinne des Dortmunder Modells (vgl. Kapitel 2.1). Im Folgenden wird zunächst das Freilandlabor FLEX vorgestellt, in welchem die Erhebungen durchgeführt wurden, bevor im Anschluss die methodischen Grundlagen der qualitativen Untersuchung dargelegt werden. Dazu soll zunächst ein allgemeiner Überblick über den Forschungsverlauf gegeben werden; anschließend wird die konkrete Durchführung der insgesamt zwei Erhebungen beschrieben. Schließlich wird das Auswertungsverfahren dargelegt.

5.1. Das Freilandlabor FLEX

Die Erhebungen fanden im Rahmen einer AG mit Drittklässlern im Freilandlabor der Universität Siegen in Wenden Schönau statt. Das Freilandlabor mit Experimentierfeld FLEX bietet als Schülerlabor auf ca. 6500 m² eine Vielzahl von Möglichkeiten, um Schüler_innen außerschulisches naturwissenschaftliches Lernen naturnah zu ermöglichen (Gröger et al., 2012; Woyke et al., 2009). Der Konzeption des Freilandlabors liegen die Ideen Wagenscheins zugrunde, wonach ein ganzheitliches, genuines Verstehen anzustreben ist. Dies beinhaltet auch, Experimente aus der „artificialen und (Er)Lebenswelt fernen Umgebung“ (Woyke et al., 2009, 72) zurück in die Lebenswelt bzw. die Natur zu verlagern. Damit findet das Lernen nicht über sondern in der Natur statt (ebd.).

Weidentipis, Beete mit Duft- und Heilpflanzen, ein Teich, Honigbienen und Schafe gehören ebenso dazu wie eine einfache Laborausstattung mit vielfältigem Experimentiermaterial. Neben einem mit Weiden umrandeten „grünen Klassenzimmer“ gibt es ein geräumiges Zelt, so dass die Kurse bei jedem Wetter stattfinden können. Das Freilandlabor bietet Angebote für Kindergärten und Schulklassen, wobei verschiedene Themen gewählt werden können. Ziel ist es, sich den Phänomenen der Natur nicht nur rein biologisch zu nähern, sondern zugleich chemische Aspekte mit einzubeziehen. So werden klassische Themen wie „Vom Korn zum Brot“ oder „Vom Schaf zur Wolle“ verstärkt aus chemischer Sicht betrachtet; auch bieten pflanzliche Inhaltsstoffe viele Möglichkeiten hier anzusetzen.



Abbildung 5.1.: **Bodenprofil im Freilandlabor FLEX.** Gut erkennbar ist der braune mit Humus angereicherte A-Horizont mit darunterliegender Lehmschicht (B-Horizont).

Der Boden vor Ort ist gekennzeichnet durch eine mächtige Lehmschicht mit hohem Tonanteil und hohem Eisengehalt (vgl. Abbildung 5.1). In der Nähe des Teiches befindet sich eine „Lehmgrube“, in welcher der Boden sichtbar wird. Das FLEX ermöglicht eine unmittelbare, originale Begegnung mit dem Lehm. Um Erkenntnisse darüber zu gewinnen, welche Konzepte Kinder bei der Beschäftigung mit dem Gegenstand generieren können, erscheint es sinnvoll, ihnen möglichst zahlreiche, vielfältige, originäre und direkte Begegnungen mit dem Lehm zu ermöglichen. Auch Kinder, die mit dem Material bislang keinen Kontakt haben, generieren in diesem Zuge erste Konzepte. Weiterhin hilft diese Vorgehensweise, den „schulischen“ Charakter zu minimieren, was unbefangene Äußerungen der Kinder während der Interviews unterstützt (s.u.).

5.2. Methodisches Vorgehen bei der Datenerhebung

Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über den Forschungsprozess gegeben und theoretische wie methodische Überlegungen werden unter Bezugnahme auf die hier vorliegende Situation aufgeführt. Im anschließenden Kapitel 5.3 wird die konkrete Durchführung detaillierter beschrieben.

5.2.1. Überblick über den Forschungsprozess

Die Erhebung der Schüleräußerungen zum Lerngegenstand Lehm wurde im Rahmen von AGs einer nahe gelegenen Grundschule im Freilandlabor FLEX durchgeführt, welche in zwei aufeinanderfolgenden Jahren (2012 und 2013) über einen Zeitraum von etwa zehn Wochen wöchentlich stattfanden. Im Mittelpunkt der Erhebung standen problemzentrierte Interviews und *teaching experiments* zu gegenstandsbezogenen Phänomenen (s.u.), mit deren Hilfe die Konzepte der Kinder zu ebendiesen Phänomenen rekonstruiert werden sollten. Die Interviews wurden an mehreren Terminen während der AG-Veranstaltungen von der Autorin und einer weiteren Leiterin des Kurses durchgeführt (vgl. Kapitel 5.3) und videographiert. Während der Zeit im Freilandlabor erhielten die Kinder viele Gelegenheiten sich intensiv mit Lehm und dessen chemisch relevanten Phänomenen auseinanderzusetzen. So blieb genug Zeit für eine kreative Beschäftigung mit dem Lehm. Zugleich wurden im Kurs aber auch mit allen Kindern gemeinsam oder in Gruppen zu sechs Kindern Experimente durchgeführt. Bei der Arbeit in den Gruppen wurden die Kinder ebenfalls videographiert. Diese Videos wurden aber nur dann der Analyse unterstützend hinzugezogen, wenn sich besonders interessante Situationen ergaben oder wenn Kinder diese beispielsweise im Interview wieder aufgriffen. In Abbildung 5.2 wird ein erster Überblick über Struktur und Verlauf der Untersuchung gegeben.

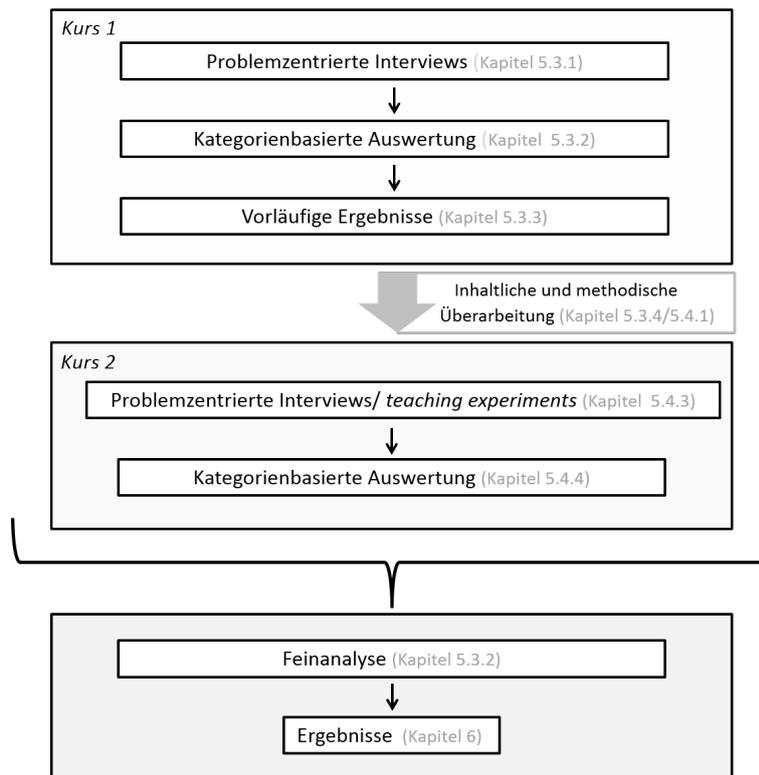


Abbildung 5.2.: **Übersicht über die Untersuchung.** Aufgelistet sind Erhebungs- und Auswertungsschritte mit Verweis auf die entsprechenden Kapitel.

Eingebettet in die Projektstage wurden im ersten Jahr (Kurs 1) problemzentrierte Interviews

durchgeführt, welche im Anschluss inhaltsanalytisch ausgewertet wurden. Auf Basis des entwickelten Kategoriensystems wurden erste Hypothesen zu den Konzepten der Kinder formuliert, welche zusammen mit praktischen Erfahrungen des ersten Kurses Ansatzpunkte für eine inhaltliche und methodische Überarbeitung lieferten. Im darauffolgenden Kurs (Kurs 2) wurden – neben den Interviews – auch *teaching experiments* mit dem Ziel durchgeführt, Aufschluss über eine mögliche Konzepterweiterung durch gezielte Interventionen zu erhalten. Nach dem Dortmunder Modell der fachdidaktischen Entwicklungsforschung wurden hier also die Phasen „Design weiterentwickeln“ sowie „Design-Experimente durchführen und auswerten“ umgesetzt (vgl. Kapitel 2.1). Schließlich erfolgte eine detailliertere Analyse, in welcher insbesondere die Konzeptentwicklung einzelner Kinder nachvollzogen werden konnte.

5.2.2. Problemzentrierte Interviews als Erhebungsinstrument

Die Datenerhebung erfolgte mit Hilfe problemzentrierter Interviews. Problemzentrierte Interviews gehen auf Andreas Witzel zurück, der diese an die von Glaser und Strauss etablierte theoriegenerierende *grounded theory* anlehnt (Witzel, 2000; Witzel, 1985). Es handelt sich um eine flexible Methode, die als prozessorientiertes, deduktiv-induktives Verfahren verstanden wird. Dies bedeutet, dass sich im Forschungsprozess seitens der Interviewten eingebrachte – zuvor möglicherweise nicht berücksichtigte – Aspekte (Induktion) und das Vorverständnis sowie die daraus abgeleitete Interpretation der Forschenden (Deduktion) ergänzen und wechselseitig bedingen.

Da das problemzentrierte Interview durch den Grundsatz der Problemorientierung klar auf ein (gesellschaftliches) Problem fokussiert und damit gegenstandsbezogen ist, ist es inzwischen auch in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung zur Ermittlung von Schülervorstellungen etabliert (z.B. Gropengießer, 2009, Baalman et al., 2004, Menger, 2010, Hamann, 2004). Hier wird anstelle des gesellschaftlichen Problems ein (naturwissenschaftliches) Phänomen in den Mittelpunkt gerückt.

Durch das Prinzip der Gegenstandsorientierung wird eine flexible Anpassung der Methoden an den jeweiligen Forschungsgegenstand gefordert. Witzel sieht die Strukturierung von Interviews mittels eines Leitfadens als ein angemessenes Vorgehen an, um einerseits zu gewährleisten, dass gleiche Aspekte in allen Interviews aufgegriffen werden, andererseits aber die Offenheit des Verfahrens für neue Aspekte, welche seitens der Probanden eingebracht werden, sicherzustellen (Witzel 2000). Er hebt hervor, dass gerade die der Offenheit geschuldeten, „unkontrollierbaren Intervieweinflüsse“ „positive Bedingungen für die Klärung der subjektiven Sichtweisen der Untersuchten“ darstellen (Witzel, 1985, 235). Niebert und Gropengießer sehen gerade leitfadengestützte Interviews als probates Instrument an, „wenn alltägliches und wissenschaftliches Wissen zu rekonstruieren ist und dafür eine große Offenheit gewährleistet sein soll – aber gleichzeitig auch die vom Interviewer eingebrachten Themen den Erhebungsprozess strukturieren sollen.“ (Niebert und Gropengießer, 2014, 122). Das problemzentrierte Interview wird daher auch in dieser Untersuchung verwendet, da es sich um eine gegenstandsbezogene Befragung handelt, bei der zwar die Schwerpunkte auf chemisch relevante Phänomene gelegt, zugleich aber eine genügend

5. Erhebung der Lernendenperspektiven zum Lerngegenstand Lehm

große Offenheit gegenüber spontanen Äußerungen der Kinder gewährleistet werden soll. Zudem ergeben sich für Interviews, welche mit Kindern durchgeführt werden, weitere Besonderheiten, die in Planung und Durchführung beachtet werden sollten. Heinzl (1997), die Experten bezüglich Kinderinterviews befragte, betont, dass die Motivation der Kinder besonders hoch ist, wenn sie sich mit einem konkreten, greifbaren Gegenstand befassen können oder wenn andere Impulse (Bilder oder Aktionen) in das Interview integriert werden. In der vorliegenden Untersuchung werden daher beispielsweise Impulse in Form von Lehm- und Sandproben genutzt oder Aufgaben gestellt, welche sich konkret mit dem Lehm befassen. Die Kinder können den betreffenden Gegenstand immer auch haptisch und visuell erfassen; steht zum Beispiel die Formbarkeit im Mittelpunkt des Gespräches, so können die Kinder während des Interviews Lehm formen und mit der Formbarkeit von Sandproben vergleichen.

Heinzl bemerkt zudem, dass die Antworten auch von der Tagesform der Kinder abhängen. Daher wird dazu geraten, mehrere Gespräche zu führen (ebd.). Niebert und Gropengießer (2014) sehen das Aufgreifen gleicher Aspekte zu unterschiedlichen Zeitpunkten zudem als eine Möglichkeit an, die Validität der Interpretation der Aussagen zu erhöhen (interne Triangulation) und schlagen vor, Validierungsfragen in den Leitfaden zu integrieren, welche bereits Erfasstes wiederholt aufgreifen. Auch raten sie an, zum Zweck der Validierung Zeichnungen erstellen zu lassen oder die Teilnehmenden zu Zusammenfassungen des Gesagten aufzufordern. Diesen Forderungen wird in den hier durchgeführten Interviews nachgegangen, indem zum einen bestimmte Fragen innerhalb eines Interviews in ähnlicher Weise mehrmals gestellt, zum anderen zentrale Phänomene wie die Formbarkeit in den Interviews an unterschiedlichen Terminen aufgegriffen werden. Außerdem werden den Kindern Zettel und Stifte mit der Aufforderung bereitgestellt, diese bei Bedarf zur Erklärung hinzuzuziehen. Wenn es gewinnbringend erscheint, werden die Kinder auch gezielt dazu aufgefordert, eine Zeichnung anzufertigen.

Schließlich ist es wichtig, ein Umfeld zu schaffen, in welchem sich die Kinder wohlfühlen und eine vertrauensvolle Atmosphäre während des Interviews herrscht. Vorteilhaft ist es, wenn den Kindern die interviewende Person bereits bekannt ist (Heinzl, 1997). Auch kann es den Kindern Sicherheit geben, sie nicht einzeln, sondern in kleinen Gruppen gemeinsam zu interviewen, wie es auch Heinzl für Gruppendiskussionsverfahren konstatiert (Heinzl, 2012). Komorek und Duit (2004) bemerken zudem, dass Interviews in Kleingruppen von zwei oder mehr Probanden Einzelinterviews insbesondere dann überlegen sind, wenn es um die Entwicklung und das Hinterfragen von Konzepten und das Diskutieren von Erklärungen geht.

Aus diesen Gründen werden die Kinder in der vorliegenden Studie immer in Zweiergruppen interviewt. Die Kinder können sich selber in die Gruppen einteilen; dies trägt dazu bei, eine ungezwungene und für die Kinder angenehme Atmosphäre zu schaffen. So können die Kinder untereinander über die Fragen diskutieren und auf die Ideen des Partners eingehen; weiterhin ist es dennoch möglich, die Aussagen der Kinder zu differenzieren und während der Transkription und Auswertung nachzuvollziehen. In allen Interviews werden die Kinder dazu aufgefordert, ihre Vermutungen zu begründen und Erklärungen für ihre Beobachtungen zu finden. Es zeigte sich,

dass die Kinder in einigen Interviews selber Versuche vorschlugen; diese wurden stets aufgegriffen, so dass sich auch abweichende Interviewverläufe ergaben. Neben der Gruppenbefragung trug auch die entspannte Atmosphäre im Freilandlabor dazu bei, dass sich die Kinder unbefangen und angstfrei äußerten.

5.2.3. *Teaching Experiments*

Eine weitere Methode zur Erhebung gegenstandsbezogener Äußerungen, die über die des problemzentrierten Interviews hinausgeht, ist die des *teaching experiments*. *Teaching experiments*¹⁴ haben ihren Ursprung in der mathematikdidaktischen Forschung, in welcher sich verstärkt die Erkenntnis durchsetzte, dass es nicht nur von Interesse ist, wie hoch der Wissenszuwachs von Schüler_innen ist, sondern auch, wie sie dieses Wissen konstruieren und ihre Konzepte entwickeln (Steffe und Thompson, 2000). Sie werden daher eingesetzt, um einerseits Vorstellungen offenzulegen, andererseits aber auch, um Lernwege und Lernhürden zu identifizieren oder zu eruieren, in welchem Maße neue Inhalte von den Schüler_innen erschlossen werden können. Komorek und Duit betonen, dass sich die Methode insbesondere für die explorative Untersuchung neuer Lerninhalte eignet: "The teaching experiment method, therefore, appears to be suitable for exploratory studies where in a relatively unknown subject area an overview of students' conceptions and learning difficulties can be obtained fairly quickly, e.g. in order to plan pilot lessons on this basis." (Komorek und Duit, 2004, 628). *Teaching experiments* können sowohl dem Testen als auch dem Generieren von Hypothesen dienen; der Wortteil "experiment" ist somit auch im forschungsmethodischen Sinn zu verstehen (Steffe und Thompson, 2000). Auch wenn häufig von der „Methode“ des *teaching experiment* gesprochen wird, so handelt es sich nicht um ein standardisiertes Verfahren (ebd.). Betont wird, dass der Forschende währenddessen sowohl die Position des Interviewenden als auch des Lehrenden einnimmt (Komorek und Duit, 2004). Somit sind zwei Aufgaben zu bewältigen: Zum einen gilt es die Konzepte und Erklärungen der Schüler_innen durch die Fragestellungen hervorzulocken, zum anderen müssen in stärker angeleiteten Phasen die Teilnehmenden im richtigen Moment durch Interventionen auch gelenkt werden (ebd.). Steffe und Ulrich 2014 sprechen in diesem Zusammenhang von zwei Kommunikationsarten, welche während eines *teaching experiments* von Bedeutung sind: Zum einen die reagierende und spontane, zum anderen die analytische Interaktion. Daher gilt in besonderem Maße, dass zwar eine grobe Struktur des Verlaufes vorliegen sollte, die Vorstellungen und Lernwege der Probanden aber spontane und unvorhergesehene Verläufe bedingen und daher Flexibilität auf Seiten des Forschenden gefordert ist. Steffe und Thompson 2000 betonen, dass es hier trotz der *teaching*-Phasen wichtig ist, die eigenen Vorstellungen und Kenntnisse in der Hintergrund zu stellen, um die Erklärungen und Vorstellungen der Kinder nachvollziehen zu können. Zentrales Element eines *teaching experiments* stellt ein fragwürdiges Phänomen oder ein Kontext dar, wodurch die Teilnehmenden zu Erklärungen und Handlungen angeregt werden (Steffe und D'Ambrosio, 1996). Komorek und Duit

¹⁴In der deutschen Literatur wird *teaching experiment* teilweise mit dem Begriff „Vermittlungsexperiment“ übersetzt (vgl. z.B. Weitzel und Gropengießer, 2009; Riemeier, 2005; Niebert, 2010.)

(2004) stellen ein *teaching experiment* vor, bei welchem sie ein Vorgehen in Anlehnung an das POE-Verfahren (*Prediction - Observation - Explanation*) nach White und Gunstone integrieren (White und Gunstone, 1992). Dies bedeutet, dass die Lernenden zunächst befragt werden, was sie für einen Ausgang bei einem Experiment erwarten (*Prediction*); im Anschluss wird das Experiment durchgeführt und die Beobachtung wird beschrieben (*Observation*). Schließlich gilt es eine Erklärung zu formulieren (*Explanation*). Kraynova (2012), die dieses Vorgehen ebenfalls in Kombination mit *teaching experiments* nutzt, führt einen zusätzlichen Schritt ein und spricht abweichend von P_{EOE} (*Prediction - Explanation - Observation - Explanation*). Sie hebt damit hervor, dass die Teilnehmenden aufgefordert werden, ihre erste Vorhersage ebenfalls zu begründen. Komorek und Duit (2004) fügen dem *teaching experiment* im Anschluss an diese Phasen noch einen weiteren Schritt hinzu: die Generalisierung. Dort sollen auf Basis der durchgeführten Intervention zunächst Vorhersagen bspw. über den Verlauf ähnlicher Experimente angestellt werden; weiterhin wird nach einer Aufstellung von oder einer Bezugnahme zu allgemeingültigen fachlichen Konzepten gefragt. Die *teaching experiments* werden zumeist mit Kleingruppen durchgeführt (z.B. Komorek und Duit, 2004; Niebert, 2010; Wilbers und Duit, 2001). Vorteil hierbei ist, dass sich der Interviewende zurücknehmen kann und die Lernenden sich gegenseitig in ihren Erklärungen ergänzen oder diskutieren können. In der hier vorliegenden Untersuchung wurden im zweiten Kurs zwei *teaching experiments* durchgeführt, welches aufbauend auf den Erkenntnissen des ersten Kurses konzipiert wurden (vgl. Abbildung 5.2). Analog zu den problemzentrierten Interviews wurden ebenfalls in Kleingruppen gearbeitet; der Ablauf wurde in Anlehnung an das P_{EOE} -Verfahrens gestaltet. Die inhaltliche Ausgestaltung wird in Kapitel 5.4 beschrieben.

5.3. Erste Erhebung im Freilandlabor FLEX

Während der ersten Erhebung (Kurs 1) stand die Generierung von Hypothesen zu den Lernendenperspektiven im Vordergrund. Hier stellten die problemzentrierten Interviews den Mittelpunkt der Analyse dar. Zugleich sollte ausgelotet werden, welche Phänomene für chemisches Lernen im Primarbereich geeignet erscheinen. Folgende Forschungsfragen waren leitend für die Planung und Durchführung der ersten Erhebung:

1. Welche Vorstellungen haben die Kinder zu einzelnen Phänomenen des Lehms (vgl. Kapitel 4.3.2; beispielsweise zu Schrumpfung oder Formbarkeit)? Entwickeln sie Erklärungen zu ihren Beobachtungen und wie stellen sich diese dar?
2. Sind die Erklärungsmuster der Kinder kongruent zu den fachlichen Grundlagen? Welche Widersprüche tauchen gegebenenfalls auf?
3. Welche Entwicklung kann bei den Vorstellungen im Verlauf des Kurses beobachtet werden?

Die Erhebung wurde nachmittags im Rahmen einer außerschulischen AG durchgeführt, an welcher Kinder der dritten Jahrgangsstufe einer nahegelegenen Grundschule freiwillig teilnahmen. Die Eltern waren zuvor über einen Elternbrief und einen Flyer des Freilandlabors auf die

AG hingewiesen worden und stimmten mit der Anmeldung der Kinder einer Teilnahme an der Untersuchung zu. Da sich deutlich mehr Jungen als Mädchen um einen Platz bewarben, nahmen schließlich 14 Jungen und nur zwei Mädchen an den Kursen teil. Der Kurs fand an zwei Tagen mit je acht Kindern statt, welche einmal wöchentlich über einen Zeitraum von neun Wochen für 2,5 Stunden das FLEX besuchten. Durch die Aufteilung auf zwei Kurse und die somit erfolgte Reduktion der Kinderzahl wurde eine optimale Betreuung gewährleistet; zudem war es so möglich, innerhalb der zur Verfügung stehenden Zeit kurze Interviews mit jeweils zwei Kindern durchzuführen. An beiden Tagen wurden weitestgehend die gleichen Inhalte bearbeitet, so dass sich allenfalls geringfügige Abweichungen ergaben. Die beiden Gruppen werden daher im Folgenden unter „Kurs 1“ zusammengefasst, „Kurs 2“ bezieht sich auf die Untersuchung im darauffolgenden Jahr.

5.3.1. Inhalt und Ablauf des Kurses

Die Inhalte, die im Kurs aufgegriffen wurden, sollten für Kinder im Grundschulalter erklärbar und verstehbar sein (vgl. Kapitel 4.3.2); zudem sollten sie mit möglichst geringem Aufwand vor Ort durchzuführen sein. Daher wurde hauptsächlich mit natürlichen Materialien gearbeitet, welche die Kinder im FLEX selber finden konnten. Weiterhin sollten viele verschiedene Phänomene behandelt, diese aber zugleich mehrfach aufgegriffen werden. Im Mittelpunkt standen die Phänomene Formbarkeit, Schrumpfverhalten, Wasserspeicherkapazität sowie Brennen von Lehm. Weiterhin wurde gemeinsam mit den Kindern die Zusammensetzung des Lehms experimentell erarbeitet. Abbildung 5.3 gibt einen ersten Überblick über die aus diesen Überlegungen abgeleitete Kursstruktur, wobei jeweils die Schwerpunkte aufgelistet und die Interviewterminierung gekennzeichnet sind.

Nach dieser kurzen Übersicht werden im Folgenden Inhalte sowie Ziele konkretisiert und didaktische Anmerkungen angeführt, bevor im Anschluss die Strukturierung der Interviews erläutert wird. Der hier vorgestellte Ablauf der Projektstage ist dabei als Produkt eines Entwicklungsprozesses anzusehen. Konkret bedeutet dies, dass vor Beginn des Kurses die Phänomene ausgewählt und entsprechende Experimente und Modelle geplant (s. auch Kapitel 4.3) sowie ein erster Verlaufsplan entworfen wurden, die genaue Ausgestaltung eines Projekttages jedoch jeweils nach dem vorherigen Termin festgelegt wurde. Auf diese Weise konnte auf unerwartete Probleme oder Verständnisschwierigkeiten eingegangen werden. Dieses Vorgehen entspricht dem im Dortmunder Modell fachdidaktischer Entwicklungsforschung (oder allgemein im Design Research) geforderten iterativen Vorgehen (vgl. Kapitel 2).

Die Kinder wurden bei durchgeführten Versuchen, die zumeist im Zentrum der Projektstage standen, stets aufgefordert, eigene Erklärungen zu äußern, bevor gemeinsam eine Deutung entwickelt wurde. Weiterhin sollten sie zumeist zunächst formulieren, welchen Versuchsausgang sie erwarteten.

In dem Kurs wurde, nach einer Phase des Kennenlernens, zunächst die Formbarkeit des Lehms

5. Erhebung der Lernendenperspektiven zum Lerngegenstand Lehm

Termin	Schwerpunkt (→ Experimente)	
1	Kennenlernen	<i>Interview I1-1</i>
2	Eigenschaften des Lehms ➤ Schrumpfung	<i>Interview I1-2</i>
3	Vielfältigkeit des Bodens; Eigenschaften von Böden ➤ Bodenprobenentnahme ➤ Wassergehalt von Böden ➤ Erhitzen versch. Bodenproben	<i>Interview I1-3</i>
4	Bestandteile des Lehms ➤ Siebanalyse	
5	Eigenschaften und Bestandteile des Lehms ➤ Mörsern von Lehm und Sand ➤ Sedimentationsanalyse	<i>Interview I1-4</i>
6	Korngrößen im Lehm; Lehm und Wasser ➤ <i>Sedimentationsanalyse</i> ➤ <i>Vergrößerung (Stereomikroskop)</i> ➤ <i>Wasserdurchlaufgeschwindigkeit</i>	
7	Eigenschaften des Lehms; Form der Tonminerale ➤ <i>Wasserspeicherkapazität</i> ➤ <i>Mikroskopische Aufnahmen</i> ➤ <i>Lehmbrand</i>	
8	Freies Werken	<i>Interview I1-5</i>
9	Abschlussveranstaltung	

Abbildung 5.3.: **Struktur des ersten Kurses**

und dessen Verwendung als Baustoff aufgegriffen. So konnten sich die Kinder zunächst gestalterisch mit dem Material befassen und zugleich dessen plastische Eigenschaften im Tun erfahren. Zudem wurden Lehmstangen genormter Länge (DIN-A4-Blatt) geformt, um in den Interviews den Prozess des Schrumpfens aufgreifen zu können. Die Kinder wählten im Kurs außerdem ein kleines Projekt, welches sie gemeinsam umsetzen wollten: in einem Fall war dies der Bau einer kleinen Lehm-Hütte, an dem anderen Tag die Errichtung einer Miniatur-Lehmstadt. Die Arbeit an diesen Projekten war neben den nachfolgend angeführten Inhalten Bestandteil eines jeden Kurstages. Im weiteren Verlauf wurde zunächst ein Bodenprobennehmer eingesetzt, mit welchem die obersten Bodenschichten sichtbar wurden. Hier konnten die Kinder insbesondere die Unterschiede in Farbe und Beschaffenheit zwischen dem humosen Oberboden und der darunterliegenden Lehmschicht erfassen. Weiterhin konnte so in einem ersten Schritt der Auffassung begegnet werden, Boden stelle etwas Einheitliches, Homogenes dar, was einer gängigen Alltagsvorstellung von Kindern entspricht (vgl. Russell et al., 1993, Happs, 1981; Kapitel 2.3.4). Da die Wasseraufnahme des Lehms für dessen plastische Verformbarkeit essentiell ist, sollte auch die Wasserkapazität im Kurs thematisiert werden. Hierfür wurden erdfeuchte Bodenproben (Sand, humoser Oberboden, Lehm) abgewogen und trocken gelagert, um anschließend wöchentlich deren Masse zu bestimmen, wodurch Rückschlüsse auf die Austrocknungsgeschwindigkeit und den

ursprünglichen Wassergehalt gezogen werden konnten. Die besonderen Eigenschaften des Lehmbodens bezüglich des Wasserspeichervermögens und die Auswirkungen auf den Wasserdurchlauf, wurden im Kurs auch später häufiger aufgegriffen (vgl. Tabelle 3). Beispielsweise wurden trockene Proben mit Wasser bis zur Sättigung versetzt und das Volumen des aufgenommenen Wassers bestimmt. Weiterhin wurde experimentell geprüft, wie schnell Wasser durch verschiedene Bodenarten hindurchsickert. Dies steht im unmittelbaren Zusammenhang mit der Porengröße (vgl. Seite 29) der Bodenproben. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Korngrößen auf das Sickerwasser wird den Kindern zudem im Modell veranschaulicht: Die bereits bekannten unterschiedlichen Korngrößen werden durch große (Sand) und kleine Kugeln (Ton) symbolisiert. Den Kindern wird so deutlich, wie die winzigen Tonminerale durch die Verringerung des Grobporenvolumens, zu einer geringeren Wasserdurchlaufgeschwindigkeit beitragen. Auf die Beschreibung des größeren Haftwasservolumens der Feinporen wurde verzichtet.

Einen weiteren Schwerpunkt stellte die Untersuchung der Bestandteile des Lehms dar. Um das Stoffgemisch hinsichtlich seiner Korngrößenzusammensetzung zu untersuchen, wurde ein Bodensieb eingesetzt. Anwendung finden Trockensiebanalysen gewöhnlich nur bei Bodenproben, deren Bestandteile größer als $63\ \mu\text{m}$ sind. Damit wäre dieses Verfahren im Falle des Lehmbodens nicht angeraten, da die Partikel in stark bindigen Böden zusammenkleben. Da Sieben allerdings ein Kindern sehr vertrautes Verfahren zur Trennung von Bestandteilen nach ihrer Größe darstellt und hier keine quantitative Auswertung der Korngrößenverteilung angestrebt wurde, wurden die methodischen Ungenauigkeiten und entstehende geringfügige Fehler hingegenommen. Der getrocknete Lehmboden wurde zunächst von den Kindern mit Hilfe von Mörsern zerstoßen und die Siebanalyse anschließend in Vergleich zu einem Sandboden durchgeführt. Hierbei stellte sich heraus, dass die Kinder die Feinkörnigkeit des Lehms sehr faszinierte. Allerdings führten sie dies ausschließlich auf die Zerkleinerung, nicht auf bereits existierende Unterschiede in den Korngrößen zurück. Zum einen ist diese Annahme aufgrund der geringen Härte der Tonminerale sicherlich nicht falsch, zum anderen schienen einige Kinder aber Sieben auch nicht zwingend als Trennung, sondern den Vorgang selber als Zerkleinerung zu begreifen.¹⁵ In den darauffolgenden Terminen wurde daher die unterschiedliche Härte der Bodenproben erneut aufgegriffen, indem das Mörsern in den Vordergrund gestellt wurden. Auch die Siebanalyse wurde mit nur sehr grob zerkleinerten Proben erneut durchgeführt. Zugleich wurde die Sedimentationsanalyse eingesetzt, um die Bestandteile aufzutrennen, was der Vorstellung der mechanischen Zerkleinerung entgegenwirkte. Nach der Betrachtung und Zeichnung der entstandenen Schichtung wurden auch die Begriffe Ton, Schluff und Sand für die unterschiedlichen Korngrößen eingeführt.

Als weitere Methode zur Untersuchung der Größe der Bestandteile wurden Mikroskope eingesetzt. Die Kinder konnten zunächst durch ein Stereomikroskop und anschließend durch ein Lichtmikroskop die suspendierten Sandkörner und Lehmbestandteile betrachten. Unter Lichtmikroskopen können lediglich Tonmineralaggregate erkannt und von den größeren Sandkörnern abgegrenzt werden. Das Stereomikroskop bietet somit eine Möglichkeit, zu verdeutlichen, dass Lehm aus

¹⁵Dieses „Ergebnis“ wird zur Begründung des weiteren Vorgehens bereits hier aufgegriffen.

5. Erhebung der Lernendenperspektiven zum Lerngegenstand Lehm

sehr kleinen Bestandteilen zusammengesetzt ist. Um die plättchenförmige Struktur, die den meisten Tonmineralen zugrundliegt, zu veranschaulichen, wurden den Kindern im weiteren Verlauf des Kurses auch elektronenmikroskopische Aufnahmen gezeigt.¹⁶ Ihnen wurde dabei erklärt, dass für die Aufnahmen ein noch deutlich besseres Mikroskop verwendet wurde, als sie es bereits kannten. Die Abbildungen zeigen zum einen Tonminerale zusammen mit einem Sandkorn, um die Größenverhältnisse zu verdeutlichen (Abbildung 5.4), zum anderen einzelne Tonmineralplättchen, um die Struktur hervorzuheben.

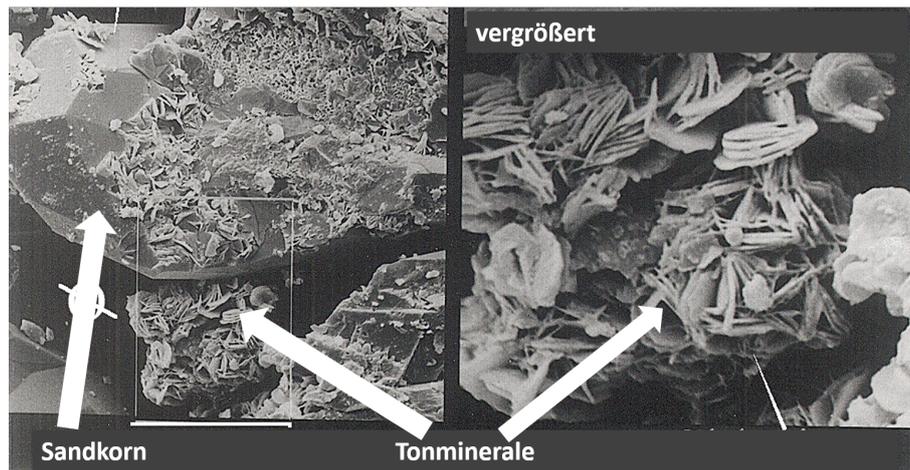


Abbildung 5.4.: Elektronenmikroskopische Aufnahmen eines Quarz-Korns bedeckt mit Tonmineralen der Chloritgruppe (Dreischichttonminerale). Verändert nach: https://pubs.usgs.gov/dds/dds-033/USGS_3D/ssx_gif/semchl.gif (10.10.2016)

Hier wurde auch ein Rückbezug zu dem Wasserbindevermögen in einem weiteren Modell hergestellt: Als Tonminerale fungieren Glasplättchen (Deckgläschen, Mikroskopiebedarf), welche mit Wasser benetzt wurden, um die Adhäsion zu verdeutlichen. Auch konnte anhand des Modells festgestellt werden, dass bei ausreichend Wasser, die Blättchen gegeneinander verschoben werden können, bei zunehmender Austrocknung diese jedoch sehr fest aneinander kleben (wobei dennoch etwas Feuchtigkeit notwendig ist, um überhaupt ein Haften zu erzielen). Als Vergleich wurden wiederum kleine Glas-Murmeln eingesetzt, welche die Sandkörner symbolisierten.

Eine weitere Eigenschaft des Lehms, welche im Kurs aufgegriffen wurde, war die Stoffumwandlung beim Brennen des Lehms. Zunächst wurde im kleinen Maßstab jeweils eine kleine Probe trockener Lehm, Sand, sowie Humus bis zur Glut in einer Gasflamme erhitzt. Hier zeigte sich die unterschiedliche Reaktion der Proben; insbesondere wurde ersichtlich, dass der organische Humus zu einem großen Teil „verbrennt“, während der Lehm erhärtet und eine Rotfärbung beobachtet werden konnte. Zum Ende des Kurses erhielten die Kinder die Möglichkeit, ihre eigenen getöpferen Waren in einem mobilen, gasbetriebenen Brennofen zu brennen. Über ein angeschlos-

¹⁶Mit Buck, Rehm und Seilnacht gehe ich davon aus, dass „für Schülerinnen und Schüler des einundzwanzigsten Jahrhunderts [...]die andersartige Situation der virtuellen Bilder (verglichen mit den Bildern, die unser Auge uns vermittelt) unproblematisch“ ist.(Buck et al., 2004, 21)

senes Thermometer konnte die Temperaturentwicklung verfolgt werden; zudem befand sich ein Loch im Deckel, so dass die Kinder die glühenden Gegenstände sehen konnten. Zur weiteren Veranschaulichung des Brennprozesses wurden zwischendurch einzelne Objekte mit einer Zange entnommen. Im Anschluss wurden die Eigenschaften der gebrannten Ware hinsichtlich Farbe, Härte und Wasserbeständigkeit beschrieben.

Die Interviews stellten den Auswertungsschwerpunkt dar; die Experimente während des Kurses wurden zwar auch aufgezeichnet, aber nur in wenigen Fällen im Rahmen einer Explikation (vgl. Kapitel 5.3.1) zur Analyse hinzugezogen.

Inhalt und Durchführung der Interviews des ersten Kurses

Die Interviews wurden in Abhängigkeit der Wetterbedingungen draußen oder im Zelt durchgeführt. Die einzelnen Gruppen wurden nacheinander befragt, während die übrigen Kinder weiter betreut wurden und beispielsweise kleine Skulpturen aus Lehm erschufen. Die Kinder nahmen zum größten Teil sehr gerne an den Interviews teil und waren gerne bereit ihre Handlungen zu unterbrechen. Zum Auffangen von Aufmerksamkeitsschwankungen der Kinder, zahlte sich das Durchführen mehrerer Interviews aus. Durch die Interviews sollte zum einen erhoben werden, welche Vorstellungen die Kinder mitbringen und was sie spontan über den Gegenstand äußern, zum anderen sollten die Erklärungskonzepte zu ausgewählten Phänomenen durch die Interviews rekonstruiert werden können. Der dazu aufgestellte, dem explorativen Charakter der Untersuchung folgend, recht grob vorstrukturierte Leitfaden ist in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Die in den Interviews thematisierten Phänomene wurden so gewählt, dass sie grundlegende Eigenschaften des Lehms aufzeigen. Ein Schwerpunkt wurde auf das Phänomen „Formbarkeit“ gelegt, da hier mehrere Faktoren eine Rolle spielen (vgl. Kapitel 3.2.2) und es sich zudem um ein einfaches, für die Kinder leicht zugängliches Phänomen handelt. Bezogen auf die Formbarkeit lassen sich beispielsweise die Faktoren „Wasser“ und „Korngröße“ aufgreifen, um erste tragfähige Konzepte zu entwickeln. Weiterhin wird dieses Phänomen für die Kinder im Umgang mit Lehm offenkundig.

Diese Überlegungen führten zur Auswahl der weiteren Phänomene Schrumpfung, Trocknen und Brennen von Lehm. Weiterhin wurden jene Aspekte, die von den Kindern genannt wurden (vgl. insbesondere I1-1 sowie I1-5 in Tabelle 5.1)¹⁷, aufgegriffen und während des Interviews vertieft. Wie bereits erwähnt, wurden die Phänomene zudem in verschiedenen Interviews erneut thematisiert (insbes. in I1-5 (Tabelle 5.1)).

Interview I1-1

Wie Tabelle 5.1 zu entnehmen, wurde zu Beginn des Kurses ein Probeinterview durchgeführt, um die Kinder an die Situation zu gewöhnen und Vertrauen zu den Interviewerinnen aufzubauen. Hier wurden ihre Interessen sowie Erwartungen an das Freilandlabor und ihre vorherigen Erfahrungen mit Lehm thematisiert.

¹⁷Die Nummerierung der Interviews setzt sich zusammen aus dem Kursjahr (Kurs1: I1 bzw. Kurs2: I2) und dem jeweiligen Interviewtermin (Tabelle 5.1 bzw. 5.3).

5. Erhebung der Lernendenperspektiven zum Lerngegenstand Lehm

Interview I1-2

Am zweiten Termin wurde den Kindern die Frage gestellt, wie sie einem guten Freund erklären würden, was Lehm sei, wenn sie gerade nicht die Möglichkeit hätten, ihm diesen zu zeigen (eine Probe konnten sie sich selber im Interview aber ansehen). Diese Frage zielte darauf ab, zu eruieren, welche Merkmale den Kindern besonders auffallen bzw. welche sie als bedeutsam erachten. Dabei wurden die Phänomene, die seitens der Kinder genannt wurden, aufgegriffen und hinterfragt. In diesem Zuge wurde beispielsweise die Formbarkeit zum ersten Mal thematisiert.

Interview I1-3

Im darauffolgenden Interview stand die Auseinandersetzung mit Lehm in unterschiedlichen Zustandsformen im Vordergrund. Dazu wurden den Kindern eine erdfeuchte, eine getrocknete sowie eine gebrannte Lehmprobe gezeigt. Ziel war es, herauszufinden, ob und welche Beziehungen sie zwischen den Proben feststellten und ob sie den Lehmbrand bereits kannten. In diesem Zuge wurde nach möglichen Umwandlungsmöglichkeiten zwischen den Formen gefragt und – in Abhängigkeit der Antworten – das Verhalten der Proben in Wasser experimentell überprüft. Im Anschluss wurden den Kindern ihre selbst geformten Objekte der vorherigen Woche gezeigt. Anhand dieser sollten sie zunächst die Veränderungen benennen, bevor schließlich anhand der genormten Lehmschlange auf die Schrumpfung eingegangen wurde. Hier sollten sie Erklärungen finden, weshalb die Lehmstücke kleiner geworden waren.

Interview I1-4

Die Formbarkeit war zentrales Element des nächsten Interviews. Dabei wurde ein Vergleich der Formbarkeit des erdfeuchten Lehms mit der zweier feuchter Sandproben (bestehend aus grobem und feinem Sand) angestellt. Dieses Vorgehen sollte zum einen die hohe Plastizität des Lehms als eine besondere Eigenschaft hervorheben, zum anderen legte dieses Vorgehen einen Einbezug der Korngrößen nahe.

Interview I1-5

Im letzten Interview am Ende des Kurses wurde erfragt, was den Kindern besonders gut im Gedächtnis geblieben war und an welche Experimente sie sich noch erinnerten. Des Weiteren diente die Wiederholung der Frage aus dem zweiten Interview („Erkläre einem Freund, was Lehm ist“) dazu, eine mögliche Entwicklung der Konzepte nachvollziehen zu können. Weiterhin konnten hier alle relevanten Phänomene erneut thematisiert werden – hierunter auch die Formbarkeit. In diesem Zuge wurde häufig auch erneut das Beispiel Sand als Vergleich aufgegriffen.

5. Erhebung der Lernendenperspektiven zum Lerngegenstand Lehm

Tabelle 5.1.: Interviewleitfaden der ersten Erhebung

Interview	Impulse und Leitfragen	Schwerpunkt/ Übergeordnete Fragestellung
1. Interview (I1-1) am 1. Termin	(Hobbys, Interessen, Vorerfahrungen mit Lehm)	Gewöhnen der Kinder an die Interviewsituation und Kennenlernen
2. Interview (I1-2) am 2. Termin	Stellt euch vor, ihr solltet einem Freund erklären, was Lehm ist. Was würdet ihr sagen?	Welche Aspekte des Lehms sind für die Kinder von Bedeutung?
3. Interview (I1-3) am 3. Termin	<p>1) Erdfeuchte, getrocknete und gebrannte Lehmprobe als Impuls: Ihr seht hier drei unterschiedliche Proben auf dem Tisch. Könnt ihr mir erklären was das ist?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Welche Unterschiede stellt ihr fest? • Ist es möglich aus diesen Sachen noch etwas anderes zu formen? Wie? • Was passiert, wenn ich die Proben ins Wasser gebe? <p>Je nachdem, ob der gebrannte Lehm als solcher bekannt ist und genannt wird: Bekannt: Umwandlungsmöglichkeiten ineinander aufgreifen Nicht bekannt: Aussehen und Eigenschaften beschreiben lassen</p> <p>2) Getrocknete Objekte der Vorwoche zeigen Welche Unterschiede könnt ihr feststellen?</p>	<p>Welche Beziehung sehen Kinder zwischen feuchtem und getrocknetem Lehm sowie dem gebrannten Scherben? Welche Veränderungen der getrockneten Proben fallen den Kindern auf? Was äußern sie zum Prozess des Schrumpfens?</p>
4. Interview (I1-4) am 5. Termin	<p>Auf dem Tisch befinden sich Lehm, feiner und grober Sand. Die Kinder sollen versuchen aus den Materialien einen Schneemann zu formen. Was ist das? Beschreiben lassen. Worin unterscheiden sich die drei Materialien? Warum ist es leichter mit dem einen Material einen Schneemann zu formen als mit dem anderen?</p>	Vergleich der Formbarkeit von Sand und Lehm
5. Interview (I1-5) am 8. Termin	<p>Woran könnt ihr euch noch besonders gut erinnern? Was haben wir gemacht? Stellt euch vor, ihr solltet einem Freund erklären, was Lehm ist. Was würdet ihr sagen? Werden die einzelnen Phänomene (Formbarkeit, Brennen etc.) von den Kindern einbezogen wird individuell vertiefend nachgefragt.</p>	<p>Rückblick aus Sicht der Kinder Wiederholung des ersten Interviews</p>

5.3.2. Datenaufbereitung und –analyse

Die Interviews wurden vollständig mit Hilfe der Software f4 transkribiert (Transkriptionssystem s. Anhang). Dabei wurde auf die Tonaufnahmen zurückgegriffen, da diese eine bessere Qualität als die Videoaufnahmen aufwiesen. Anstelle der Namen der Kinder wurden Pseudonyme gesetzt. Im Anschluss wurden die Transkripte mit den Videoaufnahmen abgeglichen, um im Zweifel den Sprecher genau zuzuordnen und Handlungen nachvollziehen zu können. Die zugrundeliegenden Handlungen wurden nur dann genauer beschrieben, wenn dies für die Analyse gewinnbringend erschien; andernfalls wurden nur Stichworte hinzugefügt, die für ein Verständnis unerlässlich sind. Diese zusätzlichen Anmerkungen wurden stets in Klammern und kursiv gesetzt (z.B. „Wenn ich das (*Lehm*) nehme [...]“). Nicht sinntragende Passagen (bspw. wenn über das Aussehen der Lehmfiguren o.ä. diskutiert wurde) wurden zur besseren Lesbarkeit der Transkripte ausgeklammert ([...]).

Der explorative Charakter der Untersuchung und der geringe Forschungsstand zum Gegenstand erforderten ebenso wie die breit gefächerten und nur grob vorstrukturierten Interviews eine Fokussierung. Zunächst sollte daher analysiert werden, welche Aspekte von den Kindern aufgegriffen wurden und welche Phänomene in Bezug auf chemisches Lernen besonders interessant erschienen. In einem weiteren Schritt sollten ebendiese Phänomene im Zuge einer Fokussierung genauer betrachtet werden. Ziel dieses Vorgehens war eine Einschränkung des Forschungsgegenstandes ohne im Vorhinein Aspekte zu vernachlässigen. Die Analyse erfolgte daher in zwei Schritten, wobei der zweite Schritt in zwei (Vertiefungs-)Stufen gegliedert wurde. Im Folgenden wird der konkrete Ablauf beschrieben.

Erster Schritt - Sichtung und Strukturierung des Materials

Die Auswertung erfolgte in Anlehnung an die inhaltlich strukturierende Inhaltsanalyse nach Kuckartz (Kuckartz, 2012, vgl. 5.5). Erste Ideen zu den Äußerungen der Kinder wurden bereits während der Sichtung der Transkripte in Form von Memos notiert (Schritt 1 in 5.5).¹⁸ Die Codierung erfolgte in Sinneinheiten (vgl. Kuckartz, 2012, 82). So wurden der Zusammenhang und eventuell auftretende Diskussionen zwischen den Gruppenmitgliedern beim Abrufen der entsprechenden Textsegmente ersichtlich und verständlich. Da zunächst im Vordergrund stand, welche Aspekte die Kinder zum Gegenstand nannten und wie sich diese Äußerungen klassifizieren ließen, wurde während des ersten Codierprozesses nicht zwischen den Interviewterminen unterschieden. Dies erschien auch vor dem Hintergrund der teilweise auftretenden thematischen Überschneidung sinnvoll (so wurden insbesondere in den Interviews I1-2 und I1-5 jene Themen (erneut) aufgegriffen, die seitens der Kinder genannt wurden). Als besonders interessant und in Hinblick auf chemisches Lernen gewinnbringend, stellten sich jene Textpassagen dar, die unter den Kategorien „Formbarkeit“ und „Brennen des Lehms“ zusammengefasst werden konnten. Im Sinne einer schrittweisen Eingrenzung des Lerngegenstandes und Fokussierung auf ein Phänomen wur-

¹⁸Die Auswertungen wurden computergestützt mit Hilfe der Software MaxQDA durchgeführt, welche das Verfassen von Memos am Text ermöglicht. Weitere verwendete Funktionen des Programms werden in den entsprechenden Abschnitten erläutert.

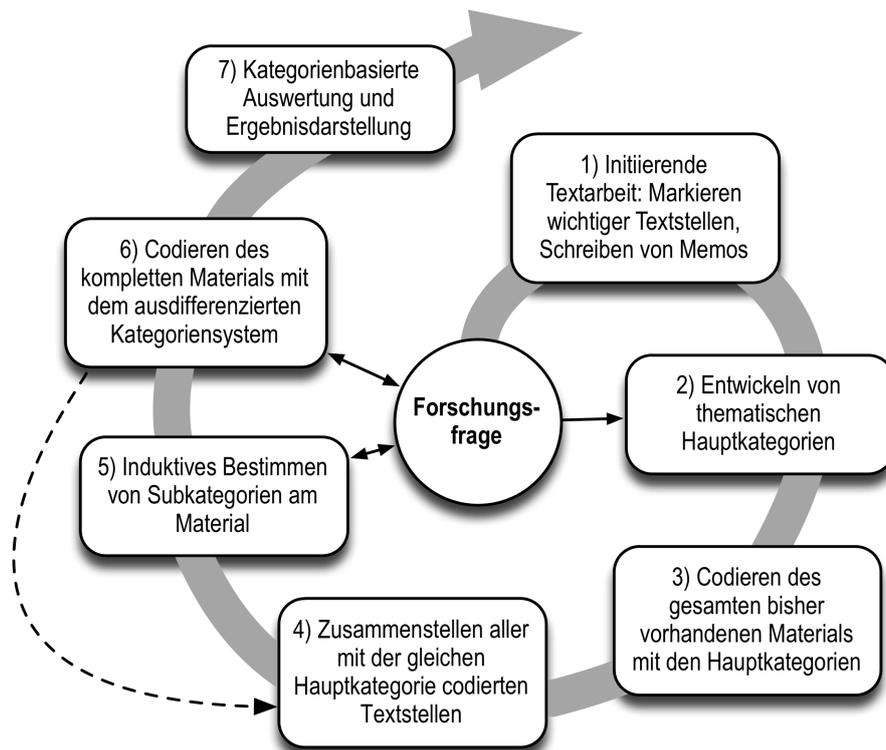


Abbildung 5.5.: Ablauf der inhaltlich strukturierenden Inhaltsanalyse (aus: Kuckartz, 2012, 78)

den schließlich die Formbarkeit für die differenziertere Untersuchung ausgewählt. Nach dem in Abbildung 5.5 dargestellten Vorgehen wurden die entsprechenden Textpassagen erneut gesichtet und in Subkategorien untergliedert.

Analyse der Konzepte zum Phänomen Formbarkeit

Nach der groben Vorstrukturierung wurden die Textpassagen zur Formbarkeit weiteren Auswertungsschritten unterzogen. Die Analyse der Interviews erfolgte dabei in zunehmend feineren, detaillierteren Schritten, welche in Abbildung 5.6 zusammenfassend dargestellt sind. Zunächst wurden die Aussagen der Kinder kategorisiert (1. Analysestufe - Schritt 1.1 und 1.2 in Abbildung 5.6), durch Hinzuziehen weiterer Textpassagen expliziert (Schritt 1.3) und schließlich die unterschiedlichen Konzepte kontrastiert und die Aussagen einzelner Kinder stärker fokussiert (2. Analysestufe). Folgende Fragen standen im Mittelpunkt der Analyseschritte:

Fragen der Grobanalyse (1. Analysestufe):

1. Wie begründen Kinder die Formbarkeit von Lehm? Welche Erklärungen treten häufig, welche seltener auf?
2. Welche Unterschiede ergeben sich im Vergleich zu den Begründungen zur Formbarkeit des Sandes?

Fragen der Feinanalyse (2. Analysestufe):

5. Erhebung der Lernendenperspektiven zum Lerngegenstand Lehm

1. Welche weiteren Aussagen über die Konzepte der Kinder können getroffen werden, vergleicht man die Äußerungen innerhalb einer Subkategorie? Welche unterschiedlichen Ausprägungen können die (Sub-) Kategorien haben?
2. Können Zusammenhänge zwischen den Konzepten zu Beginn und zum Ende des Kurses erkannt werden? Wie ändern sich die Konzepte?

Im Folgenden werden die in Abbildung 5.6 dargestellten Analyseschritte detaillierter beschrieben.

1. Analysestufe

Ziel dieser ersten Analyse war das Herausarbeiten und Klassifizieren der Konzepte der Kinder zum Phänomen Formbarkeit. Das Kategoriensystem wurde anhand des vierten Interviews – dem Vergleich der Formbarkeit von Lehm und Sand (s. Tabelle 5.1) – entwickelt, da hier die Plastizität im Mittelpunkt stand.

Dazu wurden die unter die Kategorie „Formbarkeit“ fallenden Textpassagen erneut gesichtet und thematisch zusammengefasst, um induktiv Subkategorien aus dem Material erarbeiten zu können (vgl. Punkt 4 und 5 in Abbildung 5.5). Innerhalb eines Sinnabschnittes wurde eine Kategorie nur einmal vergeben, wohingegen innerhalb eines Dokumentes (eines Transkriptes) eine Kategorie mehrmals vergeben werden konnte. Da in Sinneinheiten codiert wurde, kam es vor, dass ein Abschnitt mehreren Codes zugeordnet wurde. Wenn Kinder einer Gruppe innerhalb einer Sinneinheit Ideen äußerten, welche unter dieselbe Kategorie fielen, so wurde diese Kategorie nur einmal vergeben. Dies liegt darin begründet, dass die Kinder sich häufig ergänzten oder die Idee des Vorredners bestätigten.

Definitionen und Ankerbeispiele zu den Kategorien wurden in einem Codierleitfaden zusammengefasst (s. Anhang). Teilweise wurden durch die Interviewenden sehr konkrete Nachfragen, mitunter auch Suggestivfragen, gestellt, welche es in Interviews zu vermeiden gilt. Diese Textpassagen wurden, je nach Ausprägung des Fragefehlers, entweder überhaupt nicht codiert oder nur mit geringer Gewichtung. Das Prinzip, codierte Segmente mit einer Gewichtung versehen zu können, ist eine Möglichkeit, um in MaxQDA Unterschiede zwischen Codings innerhalb einer Kategorie zu kennzeichnen. In der Regel wurde den Codings der Wert 100 zugewiesen; im Falle einer entsprechend konkreten Nachfrage, welche aber dennoch als interpretierbar angesehen wurde, der Faktor 50. Bei den Auswertungen konnte die Aussagekraft des jeweiligen Segmentes daher mit berücksichtigt werden.

Im Anschluss wurde das Material durch mindestens eine (in einigen Fällen auch zwei) weitere Mitarbeiter_innen der Arbeitsgruppe codiert und die Intercoderreliabilitäten bestimmt. Textstellen, welche zu Abweichungen führten, wurden im Sinne des konsensuellen Codierens (Kuckartz, 2012; Hopf und Schmidt, 1993) zunächst zwischen den Codierenden, bei bestehenden Unklarheiten innerhalb der Arbeitsgruppe der Didaktik der Chemie diskutiert. Teilweise ergaben sich geringfügige Änderungen des Kategoriensystems; in wenigen Fällen konnte keine abschließende Klärung erzielt werden (vgl. Problem „Steine“ S. 69).

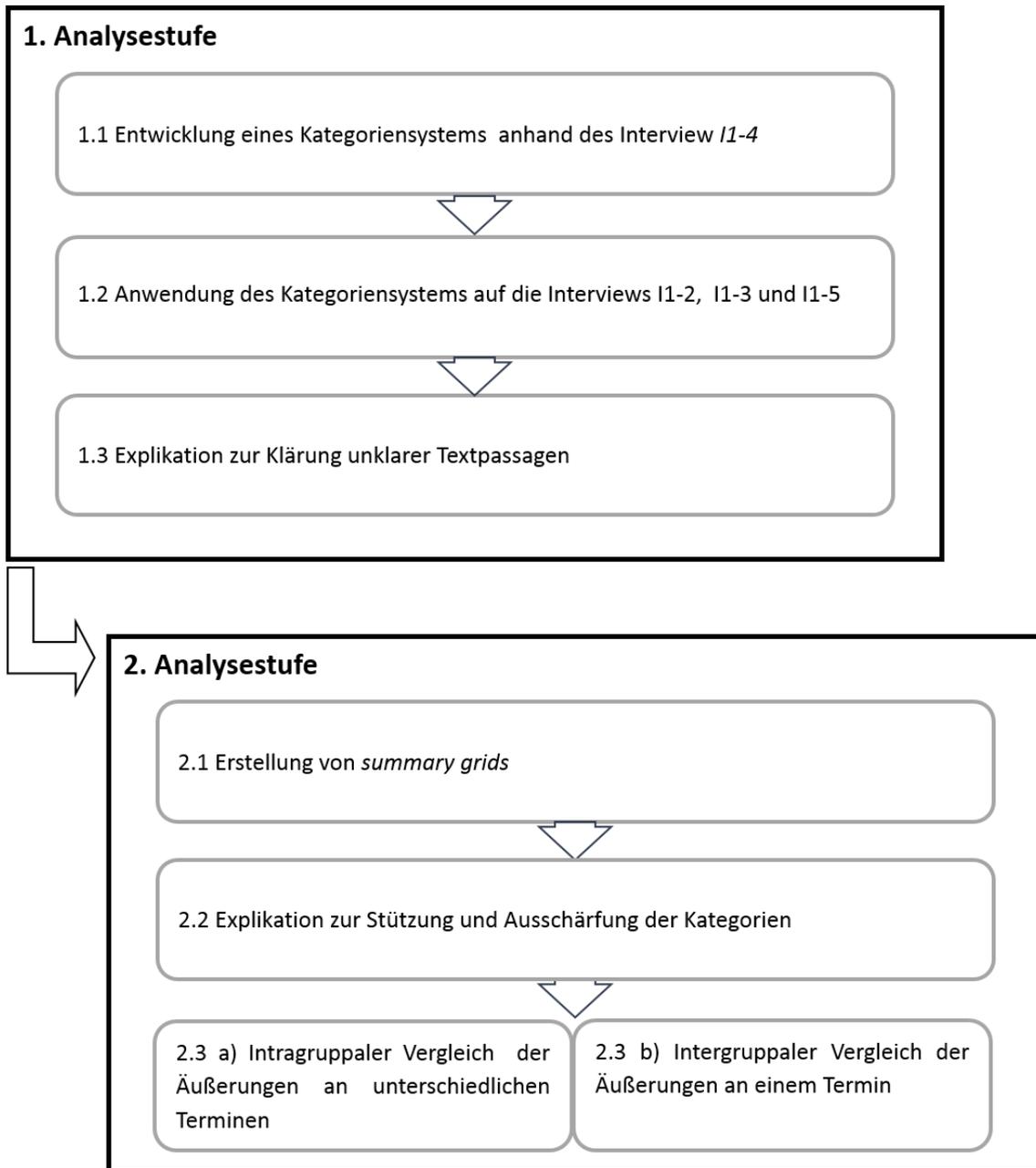


Abbildung 5.6.: Übersicht über die Analyseschritte des Phänomens Formbarkeit

Anschließend wurde dieses Kategoriensystem auf weitere Interviews angewendet, in denen die Formbarkeit ebenfalls an einigen Stellen aufgegriffen wurde – wenn sie auch nicht im Mittelpunkt des Interviews stand (Schritt 1.2.). Konkret waren dies

1. das Interview zum Vergleich von trockenem und feuchtem Lehm (I1-3). So konnten weitere Informationen zur Sicht der Kinder auf die Bedeutung des Wassers für die Formbarkeit erhalten werden.
2. das erste sowie das letzte Interview, in welchen alle Aspekte, die seitens der Kinder aufgegriffen wurden (I1-2 und I1-5) – darunter befand sich immer auch das Phänomen Formbarkeit - erneut thematisiert wurden. Anhand dieser Interviews
 - konnte geprüft werden, inwiefern die Kinder bei ihren Argumentationsmustern bleiben und konnten somit Hinweise gewonnen werden, ob es sich eher um ad-hoc-Konstruktionen oder um relativ stabile „Konzepte“ handelt.
 - können erste Rückschlüsse darauf gezogen werden, ob bzw. wie sich die Konzepte durch die intensive Auseinandersetzung mit dem Lehm entwickelt haben.

Um die Aussagen der Kinder weiter konkretisieren zu können, wurden Elemente der explizierenden Inhaltsanalyse angewendet (Schritt 1.3). Ziel einer Explikation ist die Klärung „interpretationsbedürftiger Textstellen“ unter Einbezug weiteren Materials (Mayring, 2010, 85). Hierzu wurden Textpassagen, welche sich zwar nicht konkret auf die Formbarkeit bezogen, die Aussagen der Kinder bezüglich der Formbarkeit aber konkretisierten oder unterstützten, unter der Kategorie „Explikation“ zusammengefasst. In dieser wurden wiederum Subkategorien gebildet, welche den Hauptkategorien des verwendeten Kategoriensystems entsprachen, um die Aussagen entsprechend zuordnen zu können. Durch die Explikation konnten insbesondere Textstellen, bei welchen es zwischen den Codierenden zu Abweichungen kam, in den meisten Fällen einer Kategorie zugeordnet werden. Zudem lieferte die Explikation wertvolle Erkenntnisse für die zweite Analysestufe, bei welcher die Konzepte einzelner Kinder detaillierter betrachtet wurden.

2. Analysestufe

Ziel des nächsten Schrittes war zum einen eine detaillierte Betrachtung der Entwicklung der Konzepte einzelner Kinder über den Zeitraum des Kurses. Zum anderen sollte ein Vergleich der Konzepte der Kinder in einer Kategorie erfolgen, um Unterschiede auch innerhalb einer Subkategorie herausarbeiten und die Subkategorien hinsichtlich ihrer unterschiedlichen Ausprägungen näher beschreiben zu können. So sollten neue Perspektiven auf die Konzepte zum Lerngegenstand gewonnen werden.

Die hier beschriebene zweite Analysestufe erfolgte - aus zeitlichen Gründen – erst nach Abschluss des zweiten Kurses im darauffolgenden Jahr. Zur Auswertung wurde die Funktion *summaries* der Software MaxQDA genutzt, deren Aufbau zur Verdeutlichung in Abbildung 5.7 dargestellt ist. Mit Hilfe dieser Anwendung wurden zu allen unter eine Kategorie fallenden Textpassagen innerhalb eines Interviews (Spalte 2 in Abbildung 5.7) zusammenfassende Interpretationen erstellt

5. Erhebung der Lernendenperspektiven zum Lerngegenstand Lehm

(Spalte 3). So können beispielsweise alle Äußerungen, die in einem Interview in der Kategorie „Eigenschaften Lehm“ genannt werden, zueinander in Beziehung gesetzt und zu einer Aussage gebündelt werden. Bei diesem Vorgehen wurde darauf geachtet, zwischen den Aussagen der Kinder zu differenzieren – äußerten sich alle Gruppenmitglieder, wurde dementsprechend in der Übersicht differenziert. Zusätzlich wurden hier die Textstellen, welche unter „Explikation“ zusammengefasst worden waren, sowie im zweiten Kurs die Aussagen während des *concepts maps* (s. S. 79) berücksichtigt.

Übersicht Kategoriensystem und Interviews	Zu einer Kategorie und einem Interview codierte Textsegmente	Erstellte <i>summary</i>
<p>ALM - I2-4 - Sonstiges</p> <p>Codesystem</p> <ul style="list-style-type: none"> Ursachen der Formbarkeit <ul style="list-style-type: none"> Lehm Bestandteile <ul style="list-style-type: none"> Sand <ul style="list-style-type: none"> Bestandteile Eigenschaften d... Einbezug der Teil... Lehm <ul style="list-style-type: none"> Bestandteile Eigenschaften d... Einbezug der Teil... Teilchengröße (allge... Wasser <ul style="list-style-type: none"> Wasser als notwend... Wasser hat eine Fu... Andeutung Wechsel... Analogien, Bilder, <ul style="list-style-type: none"> Hinweis Gefügeebene Lehm als Bindemittel Sonstiges Explikation <ul style="list-style-type: none"> Bestandteile <ul style="list-style-type: none"> Bestandteile Lehm Sand - Steine ---... Unterschiede zw... Sonstiges Wasser <ul style="list-style-type: none"> Trodnen von Le... Reversibilität Sonstiges Begriffliche Schwieri... Sonstiges (1) Zusammensetzung <ul style="list-style-type: none"> Farbstoffe Lehm besteht aus Kristallen 	<p>Codings</p> <p>I: Warum würdest du dich dafür entscheiden, Anja?</p> <p>A: Wenn man da Wasser reinton (<i>Kies</i>) ist es eigentlich - //M: Normal.// A: Kann man damit gar nicht formen. Hiermit (<i>grober Sand</i>) wird es matschig //M: Matschig, aber es fällt auseinander//A: Kann man ein bisschen formen, aber da (<i>grober Sand</i>) sind viel zu viele Steine drin, dann kann man das nicht.//M: Und da würde ich (<i>feiner Sand</i>), darein schüttest (<i>Ton</i>) (?)// A: (unv.)Ja und hier (<i>Ton-Schluff</i>) kann man das total, weil da ist ja auch (<i>Ton</i>)?//M: Da ist ja auch kleine Teilchen (<i>mit seltsamer Betonung</i>)//A: Und da ist auch Ton drinne. Und hier (<i>Ton</i>) vermischt sich das nicht so sehr wie da (<i>Kies</i>), weil da zu große Teilchen sind. Kathi [40-41](100)</p> <p>I: Und warum habt ihr euch so entschieden?</p> <p>A: Weil, wie ich ja eben gesagt habe, weil man hiermit (<i>Kies</i>) (unv.) //M: Und weil es am wenigsten damit zu tun hat.</p> <p>A: Weil wenn ich da jetzt Wasser reinton würde, dann wäre das eher Wasser mit Steinchen. Und damit kann ich nicht formen. Und umso matschiger, umso mehr formen. [...] Und hier das bröckelt auseinander (<i>grober Sand</i>), so Bröckel-Sand.</p> <p>L: Wir haben ja mal so einen Schneemann gemacht// M: Da wo das klebrig ist und hängenbleibt.//A: Da (<i>feiner Sand</i>) wird das glaube ich auch so klebrig weil das selbst so ganz fein ist. Und hier (<i>Ton</i>) würde es eher gehen, und weil da ja auch Schluff, und in Lehm ist ja auch Schluff und Ton drin und deswegen würde das damit gehen. Kathi [44-47](100) Vergleich mit Prototyp?</p> <p>M: Also ich würde sagen, dass das hier (<i>Ton</i>) am meisten dadrin steckt. Weil, wir haben ja auch gelernt, dass Schluff und so dadrin auch sonst ist. Und das (<i>feiner Sand</i>) hat jetzt weniger damit zu tun, weil, nein das (<i>grober Sand</i>) weniger damit zu tun, weil, wir haben ja Ton schonmal angeguckt, und wenn man den auseinander brechen würde, würde man ja ganz viele große Steinchen sehen, und das sieht man eben nicht. Und wenn dann würde ich mehr sagen, als Steinchen wären diese</p>	<p>Summary</p> <p>Anja und Maren argumentieren häufig mit "Prototyp Lehm": Weil Ton am meisten mit Lehm zu tun hat, lässt er sich besser formen. Sand hingegen hat weniger damit zu tun.</p> <p>Hier wird Ton und Lehm aber augenscheinlich etwas vermischt/durcheinander geworfen. ("wir haben ja Ton schonmal angeguckt, und wenn man den auseinander brechen würde, würde man ja ganz viele große Steinchen sehen"). Ich denke aber eigentlich können sie beide Begriffe einordnen und dies sind eher "versprecher" (s. CM2).</p>

Abbildung 5.7.: Ausschnitt aus der erstellten *summary*

Das so entstehende Raster ermöglicht eine Übersicht über Kurzzusammenfassungen und/oder Interpretationen von Textpassagen eines Interviews, die unter einer Kategorie codiert wurden. Dies erlaubt

- a) eine direkte Verknüpfung von Originaldaten und Interpretation,
- b) eine detailliertere Analyse der einzelnen Kategorien hinsichtlich ihrer möglichen Ausprägungen durch Vergleich der Gruppen untereinander sowie
- c) eine direkte Gegenüberstellung von Äußerungen der Kinder an den verschiedenen Interviewterminen.

Anschließend wurden die erstellten Zusammenfassungen eingehend gesichtet und die Aufzeichnungen zu einer Gruppe weiter interpretierend verdichtet, um schließlich eine Übersicht über die Konzepte, deren Konsistenz und Entwicklung im Verlauf des Kurses zu erhalten. Dazu wurden zunächst alle Einträge einer Gruppe eines Interviewtermins zusammengestellt, mit ständigem Rückbezug auf die Originaldaten zueinander in Beziehung gesetzt, neu sortiert und schließlich die zentralen Aussagen herausgearbeitet. Durch einen anschließenden Vergleich der Aussagen an den unterschiedlichen Terminen konnte ein Überblick über die Konzeptentwicklungen der einzelnen Kinder erstellt werden, welcher die zentralen Aussagen zur Formbarkeit innerhalb der Kategorien abbildet und über den Zeitraum des Kurses hinweg dokumentiert.

Schließlich konnten durch den Vergleich der Konzepte der Kinder und deren Entwicklung übergeordnete Zusammenhänge aufgedeckt werden, welche als Ergebnis der Feinanalyse in Kapitel 6 dargelegt werden.

Oftmals war (aufgrund von Fehltagen oder Zurückhaltung) nicht für alle Kinder einer Gruppe die Aussagedichte hoch genug, um die Konzepte exakt zu rekonstruieren. Die Aussagen dieser Kinder flossen in die Grobanalyse mit ein; die Feinanalyse bezieht sich nur auf die Kinder mit ausreichend vielen Äußerungen. Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der ersten Analysestufe des ersten Kurses vorgestellt. Inhalte und Methoden dieses Kurses werden daraufhin einer kritischen Reflexion unterzogen und die daraus getroffenen Konsequenzen für die Folgerhebung dargelegt.

5.3.3. Ergebnisse aus der ersten Erhebung (1. Analysestufe)

Da die Ergebnisse des ersten Kurses Einfluss auf die Erhebung des zweiten Kurses haben, wird bei der Ergebnisdarstellung auch bereits eine kurze Interpretation und Diskussion vorgenommen. Daraus werden im Anschluss Konsequenzen für den folgenden Kurs abgeleitet (s. Kapitel 5.3.4). Zudem tauchten im Zuge der ersten Erhebung neue Aspekte auf, die bei der Auseinandersetzung mit Lehm eine Rolle spielen bzw. zu berücksichtigen sind. Sind daher für ein Verständnis weitere fachliche oder didaktische Überlegungen vonnöten, so werden diese in Form von Exkursen berücksichtigt. Zentrale Ergebnisse werden am Ende eines jeden Kapitels in Stichpunkten zusammengefasst.

Als Ergebnis der ersten Analysestufe des ersten Kurses steht das entwickelte Kategoriensystem, welches die Konzepte der Kinder zum Phänomen Formbarkeit widerspiegelt und in Abbildung 5.8 dargestellt ist. Da in den Interviews häufig der nicht plastische Sand zum Vergleich hinzugezogen wurde, bildet das Kategoriensystem beide Stoffe ab. Differenziert wird aber nur in jenen Kategorien, in welchen die Aussagen unterschiedliche Grundannahmen offenbaren. Bei den Kategorien „Wasser“ und „Gefügebene“ wird nicht zwischen Sand und Lehm differenziert.

Um einen Überblick über die von den Kindern genannten Aspekte zu geben, wird das Kategoriensystem im Folgenden zunächst beschrieben. Im Anschluss wird die Anzahl der Codierungen innerhalb der jeweiligen Kategorien wiedergegeben, was zeigt, ob entsprechende Äußerungen häufig oder eher selten auftraten.

1. Eigenschaften
1.1 Sand
1.2 Lehm
2. Bestandteile
2.1 Sand
2.1.1 Bestandteile genannt
2.1.2 Eigenschaften der Bestandteile
2.1.3 Einbezug Teilchengröße
2.2 Lehm
2.2.1 Bestandteile genannt
2.2.2 Eigenschaften der Bestandteile
2.2.3 Einbezug Teilchengröße
2.3 <i>Allgemeiner Bezug zur Teilchengröße</i>
3. Wasser
3.1 Wasser als notwendiges Kriterium
3.2 Wasser hat eine Funktion
3.3 <i>Andeutung einer Wechselwirkung</i>
4. Hinweis Gefügebene
5. Lehm als Bindemittel
6. Bilder (Analogien, Metaphern)
7. Sonstiges

Abbildung 5.8.: **Kategoriensystem zum Phänomen Formbarkeit.** Die kursiv hervorgehobenen Subkategorien wurden erst während der Auswertung des zweiten Kurses dem Kategoriensystem hinzugefügt (s. Kapitel 6).

Kategorie 1: Eigenschaften

Unter diese Kategorie werden Äußerungen gefasst, welche sich auf andere Eigenschaften (neben der Formbarkeit) des jeweiligen Materials (Kat. 1.1 Sand bzw. 1.2. Lehm) beziehen. Die Plastizität wird also unter Zuhilfenahme anderer Eigenschaftswörter bezogen auf den jeweiligen Stoff erklärt. Beispielhafte Äußerungen stellen *E: Das kann man gut formen, weil das so- das ist weich.* (EL - I1-2, 43-44)¹⁹ oder *A: Weil hier das hier (Sand) halt so wabbelig ist.* (ALM - I2-2, 29) dar.²⁰

Kategorie 2: Bestandteile

Die Kategorie „Bestandteile“ beinhaltet all jene Äußerungen, welche zur Erklärung der Plastizität die Zusammensetzung des Stoffes in den Blick nehmen und somit auf dessen Bestandteile fokussieren. Hierbei wird weiterhin differenziert, ob lediglich die Bestandteile angeführt werden (z.B. *L: Ich glaube, weil bei dem Sand so viele Steinchen drin sind, hält das nicht so gut zusammen.* MLN - I2-2, 35; Kat. 2.1), deren Eigenschaften (*J: Beim Sand, den kann man nicht formen, weil die Steine dann nicht aneinander haften* (DJ - I1-4, 176-177); Kat. 2.1.2) oder die Teilchen-

¹⁹Die Kürzel setzen sich aus den ersten Buchstaben der Vornamen der Kinder, sowie dem entsprechenden Interview (s. Tabellen 5.1 und 5.3) zusammen.

²⁰Die unterschiedliche „Qualität“ der Adjektive wird in der Feinanalyse (Kapitel 6.3) berücksichtigt.

5. Erhebung der Lernendenperspektiven zum Lerngegenstand Lehm

größe (z.B. *I: Warum könnte es mit dem einen besser gehen als mit dem anderen? Le: Weil der größer ist. Die haben größere Stückchen.* (LL- I1-4, 81-84); Kat. 2.1.3) aufgegriffen wird. Auch hier wird zwischen den Bodenarten Lehm und Sand differenziert. Zur Kategorie hinzugezählt werden alle Begriffe, die darauf hindeuten, dass die Kinder einzelne Bestandteile fokussieren, unabhängig davon, wie konkret diese ausfallen oder ob sie korrekt sind. Beim Sand wurden seitens der Kinder insbesondere Steine als Bestandteile aufgegriffen. Vermutlich ist die Präferenz für „Steine“ gegenüber beispielsweise dem Begriff „Körner“ darauf zurückzuführen, dass die Leiter diesen Begriff, nachdem er von einigen Kindern genannt worden war, verwendeten.²¹ Bei Sand handelt es sich um kleine Gesteinsteile (vgl. Kapitel 3.1). Dass in der Geologie erst ab einer Korngröße von 2 mm von Steinen gesprochen wird, wird für die stoffliche Auseinandersetzung als irrelevant angesehen.

Im Rahmen der unabhängigen Codierung unterschiedlicher Personen kam jedoch die Frage auf, ob der Begriff „Stein“ für die Kinder mit einer gewissen Korngröße einhergeht oder ob vielmehr das Material „Stein“ fokussiert wird, welches für sie mit nicht-plastischen Eigenschaften einhergeht. In ersterem Fall würden die entsprechenden Passagen unter die Kategorie 2.1.3 fallen. Zwar konnten im Rahmen der explizierenden Analyse Hinweise darauf gewonnen werden, welches der beiden Konzepte jeweils vermutlich vorliegt; da jedoch eine abschließende Klärung nicht möglich war und um eine Überinterpretation zu umgehen, wurden lediglich solche Aussagen unter der Kategorie „Teilchengröße“ codiert, welche einen eindeutigen Bezug erkennen ließen.

Da Äußerungen, welche unter die Kategorie „Eigenschaften der Bestandteile“, bzw. „Einbezug der Teilchengröße“ fallen, verständlicherweise eine Nennung der Bestandteile (Kat. 2.1.1./2.2.1) implizieren, wird hier keine Doppelcodierung vorgenommen; die Kat. 2.1.1 bzw. 2.2.1 werden daher nur dann vergeben, wenn die Bestandteile allein als hinreichende Begründung angesehen werden.

Die Kategorie 2.3 „Allgemeiner Bezug zur Teilchengröße“ wurde bei der Auswertung des zweiten Kurses hinzugefügt und wird daher an entsprechender Stelle beschrieben (vgl. Kapitel 6.1).

Kategorie 3: Wasser

Wasser wird von den Kindern als ein weiterer Faktor für die plastische Verformbarkeit identifiziert (dies gilt für beide Bodenarten). Hierbei kann differenziert werden zwischen der Einsicht, dass Wasser für die Formbarkeit notwendig ist (z.B. *I: Mit dem Sand geht es auch? // E: Wenn der nass ist, geht es gut.* (EL - I1-4: 48-4)) und der Zuschreibung einer Funktion, also einer Wirkung des Wassers (z.B. *I: Dann hattest du doch eben noch was mit dem Wasser erklärt. N: Achso, ja, durch das Wasser ist, ist das glaube ich ein bisschen stabiler.* (MLN - I2-2: 21-29) oder *J: Weil die Feuchtigkeit den Halt gibt.* (DJ - I1-4: 152-155)). Die letzte hier aufgeführte Kategorie „Andeutung einer Wechselwirkung“ wurde wiederum während der zweiten Auswertung hinzugefügt, da hier vereinzelt Äußerungen auftraten, die erkennen ließen, dass eine Wechselwirkung zwischen den Stoffen oder ihren Bestandteilen und dem Wasser für die Formbarkeit vonnöten ist. Bei ei-

²¹ „Sand“ steht sowohl für den Boden an sich als auch für die einzelne Korngröße und damit das einzelne Sandkorn. Worauf sich die Kinder bezogen, wurde aber im Kontext fast immer offensichtlich.

ner erneute Sichtung der Interviewtranskripte des ersten Durchgangs fiel auf, dass ein codiertes Segment durch diese Kategorie ebenfalls besser beschrieben wird als durch die Kategorie „Wasser hat eine Funktion“, auch wenn hier lediglich eine Wechselwirkung zwischen dem Stoff Lehm und dem Wasser angedeutet wird: *I2: Und warum klebt Lehm? Du hast ja eben gesagt, er klebt. N: Wegen dem Wasser da drin. I2: Und das Wasser klebt? N: Ja das mischt sich dann so mit dem Lehm zusammen. Und das gibt dann so eigentlich wie so ein Kleber.* (DN - I1-5: 196-199).

Kategorie 4: Hinweis Gefügebene

Bei der Analyse der Daten fiel auf, dass viele Kinder auf einer Ebene argumentieren, welche in Richtung „Bodengefügeform“ weist. Da dieses Konzept erst während der Interpretation der Äußerungen der Kinder hervortrat und daher auch bei der vorherigen fachlichen Analyse unter primär chemischen Gesichtspunkten nicht berücksichtigt wurde, wird in Exkurs 1 ein Überblick über den geowissenschaftlichen Ansatz des Bodengefüges gegeben.

Exkurs 1: Bodengefüge

In der Bodenkunde ist es üblich, den Boden auf seine Gefügestruktur hin zu untersuchen. Diese gibt Aufschluss über die Porengröße und -verteilung und somit über Bodenluft, -wasser und die Durchwurzelbarkeit. Die Gefügestruktur ist u.a. von der Größe der Körner abhängig und steht damit mit der Bodenart in engem Bezug. Es finden sich verschiedene Klassifikationssysteme, die sich geringfügig unterscheiden. Scheffer et al. (2010) unterscheiden bei den Makrogefügen zwischen Einzelkorngefüge, Kohärentgefüge sowie Aggregatgefüge (ebd., 196). Während beim Einzelkorngefüge die Teilchen isoliert nebeneinander vorliegen (z. B. beim Sand), zeichnet sich das Kohärentgefüge dadurch aus, dass die einzelnen Primärteilchen (wie z.B. Schluff, Ton, Sand) miteinander verklebt sind. Lehmböden liegen daher häufig als Kohärentgefüge vor. Eine Besonderheit des Kohärentgefüges stellt nach Scheffer et al. (ebd.) das Kittgefüge dar, bei welchem beispielsweise Sandteilchen über Hüllen aus Carbonaten oder Eisenoxiden miteinander verbunden sind. Aggregatgefüge können aus Einzelkorn- oder Kohärentgefügen hervorgehen. Hier kommt es zur Ausbildung separater, klar abgegrenzter Aggregate. Dabei wird zwischen Absonderungs-, Aufbau- sowie Fragmentgefüge unterschieden. Bei den Absonderungsgefügen wird in Abhängigkeit von der Form der Aggregate zwischen Prismen-, Polyeder-, Subpolyeder-, Säulen- und Plattengefüge differenziert (Scheffer et al., 2010, 196ff). Die einzelnen Aggregate können Größen von etwa 1-50 mm annehmen; man spricht hier auch vom Makrofeingefüge. Aufbaugefüge werden in Krümel- sowie Wurmlösungsgefüge unterteilt und entstehen zumeist durch die Aktivität von Bodenorganismen (ebd., S. 198f). Das Fragmentgefüge wird wiederum in Krümel- und Bröckelgefüge unterteilt.

Neben diesen Makrogefügen existieren außerdem Mikrogefügeformen, welche nur mikroskopisch bestimmbar sind.

Betrachtet man die fachwissenschaftlichen Begriffe, die zur Beschreibung von Bodengefügen

5. Erhebung der Lernendenperspektiven zum Lerngegenstand Lehm

verwendet werden, so zeigen sich bemerkenswerte Ähnlichkeiten zu jenen, welche seitens der Kinder genannt werden. Beispielsweise heißt es in Scheffer et al. (2010, 196): „Beim Einzelkorngefüge sind die Primärteilchen [...] **nicht miteinander verklebt**.“;²² und demgegenüber: „Beim Kohärentgefüge werden die Primärteilchen durch Kohäsionskräfte zusammengehalten und bilden auch nach dem Austrocknen eine **ungegliederte Masse**“ (ebd.). Gisi (1990, 27) betont, dass im Einzelkorngefüge die „Primärteilchen nicht dauerhaft **aneinander haften**“, während die dauerhafte Haftung im Kohärentgefüge eine „mehr oder weniger gleichförmige, dichte Masse“ zur Folge hat. Äußerungen der Kinder wie „Sand zerbrösel“, „im Lehm hängt/klebt alles zusammen“ oder „das ist alles einzelnes und das war schon zusammen“ weisen Ähnlichkeit zu den in der Literatur zur Beschreibung eines Bodengefüges verwendeten Begriffen auf. Diese Aussagen könnten eine Vorstellung offenlegen, nach der Sand als granularer Stoff aufgefasst, Lehm hingegen als eine kontinuierliche Masse verstanden wird. Teilweise scheint den Kindern dabei aber bewusst zu sein, dass auch im Lehm einzelne Bestandteile vorhanden sind (welche zusammenkleben können). Dies zeigt beispielsweise die Äußerung „im Lehm hängt alles zusammen“. Innerhalb der Kategorie „Hinweis Gefügebene“ wird nicht zwischen den Bodenarten differenziert, da hier lediglich die Ebene der Diskussion von Interesse ist und zudem die Anzahl der Äußerungen nicht so hoch ist, dass eine Untergliederung sinnvoll erscheint.

Kategorie 5: Lehm als Bindemittel

Die Kategorie „Lehm als Bindemittel“ wird vergeben, wenn die Kinder erwähnen, dass der Lehm in der Lage ist andere Stoffe zusammenzukleben. Der „Versuch“ Materialien zu vermischen war im Leitfaden nicht vorgesehen; wurde aber zum Teil von den Kindern vorgeschlagen.²³ In diesem Fall wurde dieser durchgeführt, so dass entsprechende Textstellen nur in einigen Interviews zu finden sind.

Kategorie 6: Bilder (Analogien, Metaphern)

Zum Teil nutzen die Kinder bildliche Beschreibungen, um ihre Gedanken auszudrücken. Bei ihren Erklärungen zogen die Kinder insbesondere zwei Analogien heran: Zum einen wird der Begriff Knete verwendet, um das plastische Verhalten des Lehms zu beschreiben, zum anderen wird der Begriff Kleber oder Klebstoff genutzt.

Kategorie 7: Sonstiges

Alle über die bisher genannten Kategorien nicht abgedeckten Äußerungen werden an dieser Stelle codiert.

Anzahl codierter Segmente in den Kategorien zur Formbarkeit in Kurs 1

Die Anzahl der Nennungen in den einzelnen Kategorien kann erste Hinweise darauf liefern, welche der verschiedenen Erklärungskonzepte häufig und welche weniger häufig anzutreffen sind. Die Aufführung der Zahlenwerte kann dabei aufgrund der geringen Stichprobenzahl keine validen

²²Hervorhebungen hier und im Folgenden durch die Autorin.

²³Die Kinder gaben schlugen beispielsweise vor, den Lehm mit dem Sand zu mischen, um dessen Plastizität zu erhöhen.

5. Erhebung der Lernendenperspektiven zum Lerngegenstand Lehm

quantitativen Zusammenhänge belegen, vielmehr soll so ein Einblick gegeben werden, welche Aspekte nur selten genannt und welche stärker von den Kindern fokussiert werden. Es sei darauf hingewiesen, dass innerhalb eines Dokumentes Kategorien auch dann zweimal vergeben wurden, wenn sie von einem Probanden an verschiedenen Stellen erwähnt wurden.

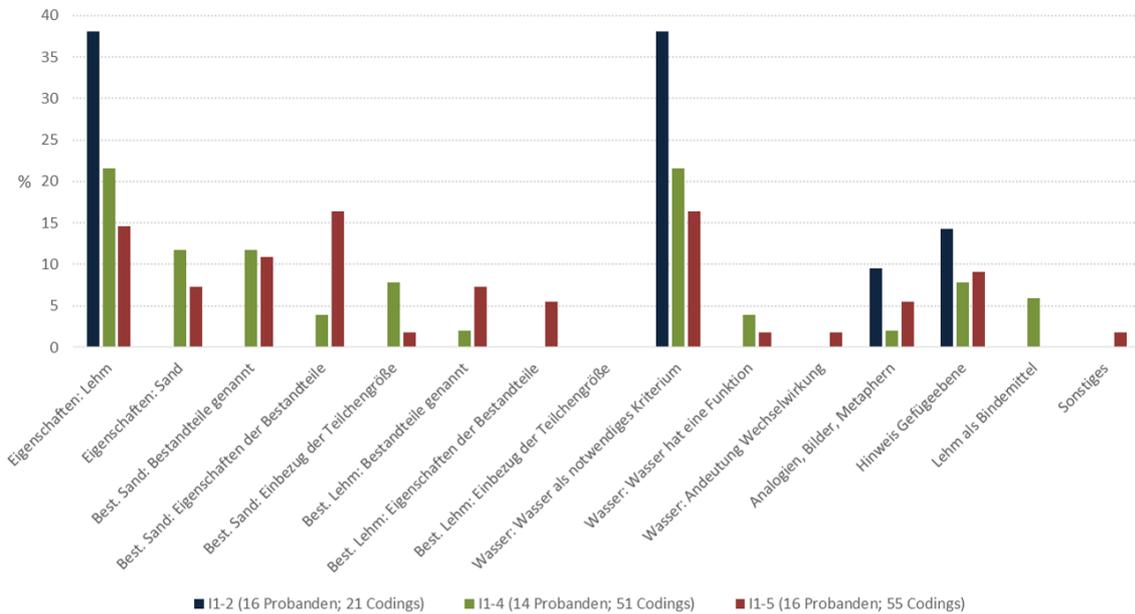


Abbildung 5.9.: **Verteilung der Äußerungen in den inhaltlichen Kategorien zur Formbarkeit.** Dargestellt sind die prozentualen Anteile der Äußerungen bezogen auf die Gesamtanzahl in den auf der x-Achse gelisteten Kategorien in den jeweiligen Interviews. Die Auswertung erfolgte ohne Berücksichtigung der Gewichtung.

In Abbildung 5.9 wird der prozentuale Anteil der codierten Textstellen in den verschiedenen Kategorien bezogen auf alle innerhalb des jeweiligen Interviews codierten Segmente dargestellt. So können zum einen erste Hinweise darüber gewonnen werden, welche Konzepte häufig und welche eher selten auftreten, zum anderen lassen sich über den Vergleich der verschiedenen Termine möglicherweise Rückschlüsse auf eine Änderung der Konzepte ziehen. Das Interview I1-3 ist nicht aufgeführt, da hier die Formbarkeit nicht im Zentrum stand und daher nur sehr wenige Äußerungen codiert wurden.

Im Interview I1-2, in welchem die Formbarkeit zum ersten Mal thematisiert wird, ist eine deutliche Fokussierung auf die Konzepte „Eigenschaften Lehm“ sowie „Wasser als notwendiges Kriterium“ zu beobachten (vgl. Abbildung 5.9). Es stehen also Begründungen, die die Formbarkeit auf den Wassergehalt zurückführen sowie jene, die sich auf weitere Eigenschaften des Lehms beziehen, im Vordergrund. Darüber hinaus wird auch die Gefügebene aufgegriffen; bei einer Sichtung der Textpassagen wird allerdings deutlich, dass die unter diese Kategorie fallenden Äußerungen immer Vergleiche zu ähnlichen Stoffen, wie beispielsweise Gartenerde, enthalten („Erde ist zu stückig zum Formen“).

Im Interview I1-4, dem Vergleich zur Formbarkeit von grobem und feinem Sand, geht der Anteil der unter „Wasser als notwendiges Kriterium“ codierten Passagen zurück. Wie Tabelle 5.2, in

welcher die Anzahl der Gruppen, in der eine Kategorie mindestens einmal auftritt, aufgeführt ist, zeigt, wird dieser Aspekt aber in allen Gruppen mindestens einmal aufgegriffen. Der anteilige Rückgang resultiert sicherlich aus dem Einbezug des feinen und groben Sandes, welcher sich zugunsten der „Sand-Kategorien“ auswirkt (absolut wurden in I1-4 sogar fünf Aussagen mehr unter den Subkategorien zu „Wasser“ codiert). Hier sind insbesondere die Bestandteile des Sandes zu nennen, welche jetzt zur Begründung der unterschiedlich ausgeprägten Formbarkeit angeführt werden. Häufig werden Steine als Bestandteile genannt, die wiederum, wie den Kindern aus ihrer alltäglichen Erfahrung bekannt, keinerlei plastische Eigenschaften besitzen und nicht aneinander haften. Teilweise wird auch die Korngröße der Sande mit einbezogen. Wird von der Seite des Lehms aus argumentiert, werden hingegen erneut andere Eigenschaften des Lehms genannt (vgl. 5.9 sowie Tabelle 5.2). Bezogen auf Lehm finden sich hingegen fast keine Äußerungen, die die Zusammensetzung des Lehms in irgendeiner Form aufgreifen.²⁴

Der Einbezug der Teilchengröße in Bezug auf Sand ist jedoch nur bei vier bzw. drei von acht Gruppen festzustellen (vgl. Tabelle 5.2), das heißt, für die anderen war die Korngröße trotz des Vergleiches der beiden Sande nicht von Relevanz. Bei einer Sichtung der entsprechenden Interviews fällt auf, dass die Gruppen, welche die Teilchengröße nicht mit einbeziehen, auch bei der Beschreibung der Sande (zu Beginn des Interviews) den Hauptunterschied nicht in der Größe der Bestandteile suchen, sondern andere Merkmale (z. B. Farbe, Vorkommen) fokussieren.

Weitere Nennungen in I1-4 betreffen die Gefügebene, die in diesem Interview auch in Bezug auf Lehm beschrieben wird.

Die in Abbildung 5.3.3 dargestellte Verteilung der Häufigkeiten im Interview I1-5 kann auch erste Hinweise liefern, ob und inwiefern sich die Konzepte der Kinder im Zuge der intensiven Auseinandersetzung mit Lehm im ersten Kurs ändern. Deutlich wird, dass die Kinder im letzten Interview die Bestandteile des Lehms häufiger aufgreifen. Dies ist schon daher zu erwarten, da die Bestandteile des Lehms im Kurs thematisiert wurden. Dennoch scheinen diese nicht automatisch eine Bedeutung für alle Kinder zu haben; schließlich beziehen nur drei der acht Gruppen die Zusammensetzung mit ein (vgl. Tabelle 5.2). Zugleich fällt auf, dass in Zusammenhang mit Lehm nie die Korngröße der Bestandteile aufgegriffen wird; diese spielt immer nur in Bezug auf Sand eine Rolle. Es ist also möglich, dass zwar Ton als Faktor für die ausgeprägte Plastizität identifiziert wird – inwiefern hier aber Zusammenhänge zur Korngröße gesehen werden, oder Ton als eine homogene, plastische Masse im Lehm gesehen wird, kann in dieser Analyse nicht geklärt werden. Bei einer genaueren Betrachtung der Textstellen (im Rahmen der Explikation), in denen Ton aufgegriffen wird, zeigte sich zudem ein uneinheitliches Bild. Während zwar einige Kinder Ton als ganz kleine Teile oder kleine Kristalle mit in ihre Erklärungen einbeziehen, scheinen andere ihn eher als eine homogene Masse zu sehen oder als „Prototyp der guten Formbarkeit“ (z. B.: I: *„Warum ist das so? Warum kannst du das denn so gut kneten? (...) L: Weil Ton- weil man Ton gut kneten kann.“* (EL - I1-5: 111-113) vs. J: *„Ton sind mikroskopische kleine Dinger (...)“*

²⁴In der Äußerung beschreibt ein Junge, was **nicht** im Lehm ist; damit argumentiert er nach dem gleichen Prinzip wie in Bezug auf die nicht-plastischen Eigenschaften des Sandes.

Tabelle 5.2.: **Anzahl der Gruppen, von denen mindestens eine Äußerung unter der jeweiligen Kategorie eingeordnet wurde.** In Klammern ist die Anzahl unter Berücksichtigung der Gewichtung (Gewichtung=100) wiedergegeben. Im unteren Abschnitt sind die Subkategorien jeweils zusammengefasst. n= Anzahl der Interviews (je 2 Kinder).

	I1-2	I1-4	I1-5
n=	8	7	8
Eigenschaften: Lehm	7	7	6
Eigenschaften: Sand	0	4	4
Best. Sand: Bestandteile genannt	0	2	3
Best. Sand: Eigenschaften der Bestandteile	0	2	5
Best. Sand: Einbezug der Teilchengröße	0	4(3)	1
Best. Lehm: Bestandteile genannt	0	1	2
Best. Lehm: Eigenschaften der Bestandteile	0	0	2(1)
Best. Lehm: Einbezug der Teilchengröße	0	0	0
Wasser: Wasser als notwendiges Kriterium	6(3)	7(6)	6(5)
Wasser: Wasser hat eine Funktion	0	1	1
Wasser: Andeutung einer WW	0	0	1
Analogien, Bilder, Metaphern	2	1	3
Hinweis Gefügebene	2	2	2
Lehm als Bindemittel	0	2(1)	0
Sonstiges	0	0	1
Eigenschaften: Lehm	7	7	6
Eigenschaften: Sand	0	4	4
Bestandteile Sand	0	4	6
Bestandteile Lehm	0	1	3
Wasser	6	7	7

Die in Lehm sind.“ (DJ - I1-5: 43)). Zu Beginn wird zudem der gebrannte Lehm sehr häufig als Ton bezeichnet. Dies wird auf Vorerfahrungen mit Töpferton zurückzuführen sein.

Dass die Argumentation über die Teilchengröße bezogen auf Sand im Interview I1-5 gegenüber I1-4 abnimmt, ist vermutlich damit zu erklären, dass in I1-4 ein Vergleich zwischen feinem und grobem Sand stattfand, welcher einen Einbezug der Korngröße nahelegt. Weiterhin fällt auf, dass der Anteil der Äußerungen, welche unter die Kategorie „Eigenschaften der Bestandteile“ bezogen auf Sand fällt, deutlich zunimmt. Dies kann bedeuten, dass die entsprechenden Kinder bereits auf einer anderen Ebene argumentieren: Die Bestandteile, und damit der Aufbau des Stoffes, sind für die Formbarkeit von Bedeutung; es werden zugleich aber auch Eigenschaften auf einer „tieferliegenden“ Ebene - der Ebene der Bestandteile - beschrieben (deren Ursache wieder in einer zugrundeliegenden Struktur zu suchen ist).

Bezüglich der Äußerungen zum Wasser kann kaum eine Änderung der Konzepte festgestellt werden. Allerdings wird es bereits zu Beginn von sehr vielen Gruppen als notwendig erachtet und spielt somit für die Kinder eine bedeutende Rolle. Es scheint ihnen bewusst, dass die plastische Verformbarkeit aus zwei Faktoren (Lehm und Wasser) resultiert (wie aus 5.2 zu entnehmen, be-

gründen die Gruppen stets über mehrere Faktoren). Eine Wechselwirkung von Lehm und Wasser wird allerdings nur in einem Fall im letzten Interview (DN - I1-5, 196) angedeutet, wobei hier auf makroskopischer Ebene argumentiert wird (s. Beispiel S. 70).

Zusammenfassung:

- Die Formbarkeit von Lehm wird über den Wassergehalt sowie besondere Eigenschaften des Lehms begründet.
- Die Zusammensetzung des Lehms spielt keine oder nur eine untergeordnete Rolle. Dies ändert sich zum Teil durch die intensive Auseinandersetzung mit dem Lehm.
- Beim Sand sind neben dem Wasser auch die Bestandteile von Bedeutung.
- Unter Berücksichtigung der unter die Kategorie „Gefügebene“ fallenden Textpassagen kann vermutet werden, dass Lehm von einigen Kindern eher als kontinuierliche Masse aufgefasst wird, während Sand für sie eine körnige Struktur besitzt und damit aus Einzelteilen zusammengesetzt ist.

Diese ersten Erkenntnisse sollten durch die detailliertere Feinanalyse erweitert und spezifiziert werden. Diese erfolgte aus zeitlichen und organisatorischen Gründen erst nach Abschluss des zweiten Kurses und wird daher gemeinsam mit der des Folgekurses beschrieben (s. Kapitel 6).

5.3.4. Reflexion des ersten Kurses und Konsequenzen für die folgende Erhebung

Im Folgenden sollen sowohl der Erhebungs- und Auswertungsprozess als auch die Ergebnisse des ersten Kurses kritisch reflektiert werden, um daraus im anschließenden Kapitel Konsequenzen für die Durchführung und Auswertung des darauffolgenden Kurses abzuleiten.

Die hier zusammengefassten Ergebnisse können nur für die vorgestellte Stichprobe sprechen; die entwickelten Konzepte der Kinder zum Ende des Kurses sind auch Produkt der dortigen Aktivitäten. Sie geben einen ersten Überblick über die Konzepte der Kinder und haben hypothetischen Charakter. Ein Ziel des folgenden Kurses ist es zu untersuchen, inwiefern die hier geschilderten Konzepte erneut auftreten und welche Abweichungen möglicherweise sichtbar werden.

Kritisch zu bewerten ist der eher geringe Anteil eigeninitiiertem Äußerungen der Kinder. So steigt die Gefahr suggestiver Fragen durch den Interviewer²⁵; zudem zeigen natürlich gerade die spontanen Äußerungen, welche Aspekte aus Sicht der Befragten besonders wichtig sind. Um die Diskussionen unter den Kindern zu fördern und dem Interviewenden die Möglichkeit zu geben, sich selbst zurückzunehmen, war bereits im Vorfeld die Wahl auf das Kleingruppeninterview gefallen. Zumeist hatte dies den gewünschten Erfolg; in wenigen Fällen führte es aber dazu, dass die Äußerungen eines Kindes stark überwogen. Möglicherweise kann der relativ geringe Anteil der Äußerungen ohne konkrete Nachfrage auch darauf zurückzuführen sein, dass den Kindern

²⁵In diesem Kurs wurden 9 % der codierten Segmente aufgrund einer zu offensichtlichen Nachfrage geringer gewichtet.

die Fragen nicht relevant oder die Phänomene nicht fragwürdig genug erschienen.

Die Ergebnisse zeigen, dass – auch wenn Lehm im Kurs auf seine Bestandteile hin untersucht wurde – diese dennoch von den Kindern häufig nicht als relevant für die Formbarkeit erachtet werden. Die Korngröße der Bestandteile ist für noch weniger Kinder von Bedeutung. Der Einbezug zweier unterschiedlich grob gekörnter Sande führt dazu, dass ein Teil der Probanden die unterschiedliche Korngröße zur Begründung hinzuzieht; dies ist allerdings nicht immer der Fall und wird nicht auf die Bestandteile des Lehms übertragen. Vielmehr scheint Lehm eine (kontinuierliche) Masse darzustellen, deren Aufbau für die Fragestellung als irrelevant erachtet wird. Zudem war die Zuordnung der Äußerungen zur Kategorie „Teilchengröße“ teilweise schwierig, was auch darauf zurückzuführen ist, dass die Begriffskonzepte der Kinder zum Teil nicht eindeutig nachvollzogen werden können. Dies zeigt sich insbesondere bei der Verwendung des Begriffes „Stein“ (vgl. Beschreibung der Kategorie 2, S. 68), aber auch bezogen auf den Ton-Begriff (s. S. 73).

Weiterhin wird das Wasser zwar als notwendig beschrieben, tiefergehende Erklärungen, welche beispielsweise dessen Funktion genauer darstellen, sind hingegen selten anzutreffen. Auf der anderen Seite erscheinen die vorhandenen Konzepte durchaus ausbaufähig. Hier sind insbesondere die Konzepte zur Formbarkeit des Sandes als Anknüpfungspunkt zu nennen; weiterhin kann die Gefügebene als potentieller Ausgangspunkt für chemisches Lernen angesehen werden. Auch die Tatsache, dass dem Wasser eine hohe Bedeutung zugemessen wird, ist im Sinne einer Ausbaufähigkeit der Konzepte positiv zu beurteilen.

Nicht zuletzt sind die Inhalte des Kurses (außerhalb der Interviews) unterschiedlich zu bewerten. Die meisten Experimente und Aktivitäten wurden von den Kindern positiv aufgenommen und schienen zu dem intendierten Lernziel zu führen - allerdings gab es auch Ausnahmen. Die Beurteilung basiert hier auf den Eindrücken der Betreuer sowie deren Aufzeichnungen, eine Evaluation der einzelnen Inhalte fand nicht statt.²⁶ Während beispielsweise der Versuch zur Wasserkapazität sowie der Einsatz der Mikroskope die Kinder zu zahlreichen Äußerungen anregte und die intendierten Ziele (z.B. die Verdeutlichung des partikulären Charakter des Lehms und der unterschiedlichen Teilchengröße) weitestgehend erfüllten, ist das anfängliche Vorgehen zur Untersuchung der Zusammensetzung eher kritisch zu beurteilen. Hervorzuheben ist hier insbesondere die Siebanalyse, deren Ergebnis (sehr feines Ton-/Schluffpulver) die Kinder zwar faszinierte, jedoch nicht primär als Stofftrennung sondern vielmehr als Zerkleinerung aufgefasst wurde. In Kombination mit dem groben Zerstoßen der getrockneten Proben mit Hilfe des Mörsers wird eher eine Fokussierung auf die Härte denn auf die Größe der Bestandteile des Materials gefördert.

Aus den angeführten Überlegungen resultieren folgende Ableitungen für die anschließende Erhebung im Folgejahr:

a) *Anteil eigeninitiiertes Äußerungen in den Interviews erhöhen:* Insbesondere ist zu überle-

²⁶Die einzelnen Aktivitäten sind, im Sinne des Dortmunder Modells fachdidaktischer Entwicklungsforschung, in weiteren Zyklen durch Design-Experimente hinsichtlich ihres Beitrages zum Lernprozess zu beurteilen.

gen, inwiefern methodische Änderungen hierzu beitragen können.

- b) *Bestandteile fokussieren*: Die Bestandteile und insbesondere deren Relevanz für die Plastizität gilt es weiter zu verdeutlichen. In einem ersten Schritt muss Lehm als Stoffgemisch aus einzelnen miteinander verbundenen Partikeln und nicht als kontinuierliche Masse begriffen werden. Weiterhin sollte die Relevanz der Korngröße als ein Faktor für die Formbarkeit stärker in den Fokus gerückt werden. Dabei muss eine für die Kinder eindeutige Benennung der Bestandteile erfolgen.
- c) *Experimente überarbeiten*: Die Aktivitäten im Kurs sind basierend auf den Erfahrungen des Vorjahres zu überarbeiten.
- d) *Begriffliche Klarheit schaffen*: Die Konzepte der Kinder zu den verwendeten Begriffen müssen geklärt werden. Zudem muss auf eine einheitliche und klare Nutzung von Begriffen verstärkt geachtet werden.

5.4. Zweite Erhebung im FLEX

Ziel des zweiten Kurses war die Überprüfung und Erweiterung der zuvor beschriebenen Ergebnisse. Insgesamt nahmen 13 Kinder der dritten Klassenstufe am zweiten Kurs teil; sechs Jungen und sieben Mädchen. Bei den Kindern handelte es sich um Schüler_innen derselben Grundschule wie zuvor (damit nahm der nachfolgende Jahrgang an der AG teil). Der Kurs wurde abweichend von dem Vorherigen nicht in zwei Gruppen zu unterschiedlichen Terminen aufgeteilt. Die Beschränkung auf nur einen Kurs hatte den Vorteil, dass die erste Sichtung und Auswertung der Aufzeichnungen und Beobachtungen eines Kurstages aufgrund des geringeren Zeitaufwandes intensiviert werden konnte. So war es möglich, angemessener auf auftauchende Fragen oder unklare Äußerungen zu reagieren. Inhalt und Ablauf des Kurses sowie das methodische Vorgehen wurden auf Basis der im vorherigen Kapitel angeführten Überlegungen überarbeitet. Die genauen Änderungen werden nachfolgend beschrieben.

5.4.1. Inhaltliche Überarbeitungen und Struktur des Kurses

Hauptziel der Überarbeitungen aus inhaltlicher Sicht war es, einen Konzeptausbau in Richtung „Bestandteile des Lehms“ und „Einbezug der Teilchengröße“ anzuregen. Dies bedeutet, dass die Kinder ihre intuitiven Konzepte weiterentwickeln und die Formbarkeit des Lehms auch auf die Bestandteile des Lehms und deren geringe Korngröße zurückführen sollen.

Zunächst werden jene Interventionen vorgestellt, welche sich auf die Auseinandersetzung mit den Bestandteilen des Lehms beziehen, bevor im Anschluss die Änderungen in den Interviews erläutert werden, deren zentraler Bestandteil das Phänomen Formbarkeit darstellt. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse beider Kurse zu gewährleisten, wurde die Grundstruktur des Kurses aber beibehalten.

In den zweiten Kurs wurden folgende Inhalte mit Bezug zu den Lehmbestandteilen mit einbezogen (**hervorgehoben: Interventionen, die nicht während der Interviews stattfanden und zudem zuvor nicht eingesetzt wurden**):

- Formen des selbst ausgegrabenen Lehms:
Um die spontanen Äußerungen während des Formens besser nachvollziehen und verfolgen zu können, wurde die erste Situation, in der sich die Kinder mit dem Material beschäftigten, ebenfalls in Kleingruppen durchgeführt und videographisch festgehalten. Die Äußerungen können im Zuge der Explikation gegebenenfalls hinzugezogen werden.
Sammeln eigener Vorschläge zur Untersuchung der Bestandteile:
Die Kinder wurden aufgefordert, eigene Ideen zur Untersuchung der Bestandteile zu formulieren. Ziel war es, durch diese Überlegungen das Nachdenken über den Aufbau eines Stoffes anzuregen.
- Sieb-/Schlamm-Analyse:
Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Siebanalyse im vorherigen Kurs (vgl. Kapitel 5.3.1), wurde dieses Mal die Sedimentationsanalyse stärker in den Fokus gerückt. Die Siebanalyse wurde hingegen nur kurz in einem Interview hinzugezogen (s. u.), wobei nur das Ergebnis betrachtet, nicht der Prozess verfolgt wurde, um zwar die Feinheit der Lehmbestandteile zu verdeutlichen, aber die Entwicklung des Konzeptes „mechanische Zerkleinerung“ nicht zu stützen.
- **Verwendung einer „Ausdünnenschale“:**
Neben der Schlamm-Analyse wurde zugleich eine „Ausdünnenschale“ verwendet. Hierunter wird eine großflächige schwarze Schale verstanden, in welche eine geringe Menge einer sehr stark verdünnten Lehm-Wasser-Suspension gegeben und durch Schwenken fein verteilt wird. Der Ansatz wird eine Woche später, nach Verdunsten des Wassers, betrachtet. Ziel war es auf diesem Wege ein Bewusstsein für die Bestandteile des Lehms aufzubauen und die geringe Größe der Bestandteile für die Kinder anschaulicher zu gestalten.

Weitere inhaltliche Abweichungen vom ersten Kurs ergaben sich insbesondere durch Reaktion auf aufkommende Fragen. Da häufiger die Frage nach der Herkunft des Lehms auftauchte, wurde an einem Termin die Verwitterung von Gestein aufgegriffen und der Verrottung organischen Materials als Ursprung der organischen Bodenbestandteile gegenübergestellt. Weiterhin stellte sich erneut der Tonbegriff als kritisch heraus (s. Kapitel 6.2.2); als Konsequenz wurde Ton in unterschiedlichen Farben und Formen (pulverisiert, Modellierton) betrachtet und mit dem Lehm verglichen. Als verbindendes Element der verschiedenen Tonproben wurde die geringe Korngröße herausgestellt.

Demgegenüber wurden einige der im vorigen Kurs durchgeführten Aktivitäten nicht wieder aufgegriffen. Hierbei wurden beispielsweise jene ausgelassen oder umgestaltet, die ihre ursprüngliche Intention verfehlten oder deren Durchführung sich als schwierig erwies (s.o.). Weiterhin wurde

auf den Einsatz der Modelle (bspw. zum Wasserdurchlauf und zur Adhäsion) verzichtet. Dies hatte zeitliche Gründe; zudem erschien es sinnvoll, diese in einer weiteren Studie gesondert in Kleingruppen zu untersuchen, um den Beitrag zum Konzeptausbau abschätzen zu können, da dieser hier nicht beurteilt werden konnte.

Auch die Inhalte der Interviews wurden zugunsten eines verstärkten Einbezuges des Aufbaus des Stoffgemisches Lehm überarbeitet. Folgende inhaltliche Anpassungen wurden vorgenommen:

- Einbezug mehrerer Korngrößen:
Der zuvor durchgeführte Vergleich von feinem und grobem Sand hatte zwar den Effekt, dass die Kinder den Aufbau oder sogar die Korngröße verstärkt in ihre Betrachtungen einbezogen. Jedoch wurde dies fast nie auf Lehm übertragen. Durch die Verwendung einer feineren Abstufung der Korngrößen und der Verwendung trockenen Lehms sollte hier in einem *teaching experiment* angesetzt werden.
- „Herstellung“ von Lehm:
An zwei Interviewterminen stand das umgekehrte Vorgehen im Vordergrund. Die Kinder sollten aus den einzelnen Korngrößen Lehm selber herstellen; zu einem anderen Zeitpunkt galt es aus verschiedenen organischen und anorganischen Materialien Bestandteile für eine Lehmmischung auszuwählen.
- Mikroskopieren:
Da das Mikroskopieren den Kindern den partikulären Charakter des Lehms gut zu veranschaulichen schien, wurde dieses Vorgehen in die Interviews integriert, um die Äußerungen der einzelnen Kinder diesbezüglich besser nachvollziehen zu können.

Neben diesen inhaltlichen Überarbeitungen, wurden auch methodische Änderungen vorgenommen, welche nun vorgestellt werden.

5.4.2. Methodische Überarbeitungen

Durch Änderungen des methodischen Vorgehens galt es insbesondere zwei Problemen zu begegnen: dem der begrifflichen Unschärfen sowie dem geringen Anteil eigeninitiiertem Äußerungen. Daher wurden folgende Modifikationen vorgenommen:

- Mit dem Ziel, den Anteil eigeninitiiertem Äußerungen zu erhöhen, wurden bei dem Interview zum Vergleich der Formbarkeit von Lehm und Sand Arbeitsblätter eingesetzt (s. Anhang). Hier sollten die Kinder zunächst beschreiben, was sie bezüglich der Formbarkeit beider Materialien feststellen und im Anschluss eine mögliche Erklärung für ihre Beobachtung formulieren. Dabei sollte innerhalb einer Gruppe nur ein Arbeitsblatt gemeinsam ausgefüllt werden. So diskutierten die Kinder zunächst untereinander, bevor in einem nächsten Schritt durch den Interviewenden vertiefend nachgefragt wurden.

5. Erhebung der Lernendenperspektiven zum Lerngegenstand Lehm

- Es wurden immer drei (in einem Fall vier) anstelle von zwei Kindern (Kurs 1) gemeinsam interviewt. Dies hatte organisatorische Gründe; zugleich sollten die Kinder verstärkt zu Diskussionen untereinander angeregt werden. Da die Auswertung hinsichtlich der Zuordnung der Aussagen zu den einzelnen Kindern keine Schwierigkeit darstellte, wurde eine Erhöhung der Kinderanzahl als unproblematisch angesehen.
- Im ersten und letzten Interview wurde gemeinsam mit den Kindern ein *concept map* entwickelt. Allgemein werden *concept maps* zur Unterstützung von Schüler_innen im Lernprozess bei der Strukturierung neuer Inhalte, zur Wiederholung von Unterrichtseinheiten oder zur Diagnose von Lerngegenständen (und Lernprozessen) eingesetzt (Sager und Ralle, 2011). Letztgenanntes ist auch in diesem Fall das Ziel. Die Methode des *concept maps* sollte vor dem Einsatz als Diagnoseinstrument bekannt und eingeübt sein (ebd.). Da dies im FLEX aus zeitlichen Gründen nicht möglich war, wurde die Methode durch Integration in das Interview vereinfacht. Die Kinder sollten aus Begriffen auswählen und den Zusammenhang zum Oberbegriff Lehm (oder zu anderen bereits verwendeten Begriffen) mündlich darstellen. So konnte der Interviewer gegebenenfalls nachfragen oder den Kindern Hilfestellungen leisten.²⁷ Das *concept map* wurde in der gleichen Gruppenzusammensetzung wie die übrigen Interviews erstellt. Dabei wählte ein Kind einen Begriff aus und begründete warum es (k)einen Zusammenhang zum Lehm herstellen konnte. Die anderen Gruppenmitglieder sollten im Anschluss äußern, ob sie der Einschätzung zustimmen, sie ergänzen oder ihr widersprechen wollten. In gleicher Weise wurde reihum mit allen Begriffen verfahren. In das *concept-map* flossen Begriffe ein, welche sich im Vorkurs als kritisch erwiesen (Ton, Sand, Steine), sowie Wörter, die von den Kindern im Vorkurs in Bezug auf Lehm aufgegriffen worden waren (z.B. Schlamm, Matsch und Analogien wie Knete und Klebstoff). Darüber hinaus wurden weitere fachliche Begriffe (z.B. Keramik, Mineralien) sowie Begriffe, die kaum Bezug zum Lehm aufweisen (z.B. Baum, See), hinzugefügt. Letzteres sollte verhindern, dass die Kinder zu jedem Wort einen Bezug zu konstruieren versuchen. Darüber hinaus erhielten die Kinder die Möglichkeit auf freie Kärtchen weitere Begriffe ihrer Wahl hinzuzufügen. Zu Beginn fand das *concept map* im Anschluss an das eigenständige Formen statt, am letzten Veranstaltungstag wurde es wiederholt. Ziel war es, die Kinder zum Nachdenken über die gewählten Begriffe anzuregen und den Anteil begriffsbezogener Äußerungen zu erhöhen. So sollte auch ein Rückschluss auf das Begriffsverständnis der Kinder möglich werden. Zugleich wurde dieses Vorgehen als eine weitere Möglichkeit angesehen, um die Kinder zum Gespräch anzuregen.
- Um die begrifflichen Schwierigkeiten zu minimieren und eine einheitliche Begriffsverwendung zu gewährleisten, wurde der Begriff „Teilchen“ für alle Bestandteile eingeführt (Sand besteht aus Sandteilchen, Ton aus Tonteilchen; s. auch Exkurs 2). Der Begriff wurde au-

²⁷Das *concept map* und das hier geschilderte Vorgehen wurde vorab in einer Staatsarbeit mit anderen Kindern gleichen Alters erprobt.

ßerdem in dem *concept map* aufgegriffen, um Rückschlüsse auf bereits vorhandene Vorstellungen ziehen zu können.

Exkurs 2: Teilchen

Der Begriff Teilchen wurde in der zweiten Erhebung als Begriff für die einzelnen Bestandteile gewählt. Im ersten Kurs waren seitens der Kinder häufig die Begriffe „Steine“ oder „Körner“ für die einzelnen Bestandteile des Sandes gefallen; in Hinblick auf Ton wurden in Bezug auf die einzelnen Tonpartikel nur wenige Äußerungen getroffen. Die auftretenden Äußerungen zeigten, dass den Kindern hier Begriffe fehlten und sie daher Umschreibungen wählten (z.B. „mikroskopisch kleine Dinger die im Lehm sind“. (DJ-I1-5, 45)). Als Konsequenz muss daher den Kindern ein Begriff angeboten werden, der von ihnen akzeptiert wird und der zudem fachlich ausbaufähig ist. Zunächst wurde erwogen, von einzelnen Tonmineralen zu sprechen. Allerdings zeigte sich durch eine kurze Diskussion mit den Kindern in Sechsergruppen, dass der Begriff „Mineral“ bei den meisten Kindern Assoziationen hervorruft, welche wiederum kaum mit dem fachlichen Verständnis von Mineralen zu tun haben. Häufig wurden die Vorstellungen von dem Begriff „Mineralwasser“ abgeleitet. Dies zeigen Äußerungen wie „Wenn man schüttelt und dann aufmacht (Anm.: die Mineralwasserflasche) kommen die so raus die Mineralien“ oder „Also Leitungswasser trinkt man ja normal nicht, dann tut man da noch Mineralien rein (?)“. Von einigen Kindern wurde postuliert es seien „Kleine Teilchen oder so“, „Irgendwie sowas ähnliches wie Luftblasen [...] eine Flüssigkeit die auch Luftblasen erzeugt“ oder „Nen Pulver oder ne Flüssigkeit, irgendwas Kleines denke ich“. Auf Basis dieser Erfahrungen wurde von der Verwendung dieses Begriffes abgesehen.

In Disziplinen, die sich mit Ton befassen, wie der Geologie oder der Keramik, werden die einzelnen Bestandteile als „Teilchen“ bezeichnet; auch allgemein wird beispielsweise bezogen auf den Feinboden von „Teilchengröße“ gesprochen (s. z.B. Salmang et al., 2007; Scheffer et al., 2010). Salmang et al. (2007) nennen den Begriff Teilchen synonym zu „Partikeln“ und „Körnern“ (ebd. S. 127) und fassen unter dem Teilchenbegriff auch aus mehreren Partikeln bestehende Agglomerate und Granulate zusammen (ebd., S. 128). In der Chemiedidaktik hingegen wird der Teilchenbegriff bzw. damit verbunden die Teilchenvorstellung vielfach diskutiert. Da bei der vorliegenden Arbeit das chemische Lernen im Mittelpunkt steht, sollen hierzu einige Überlegungen angeführt werden.

Häufig wird in chemiedidaktischen Veröffentlichungen von DER Teilchenvorstellung gesprochen. Häufig wird mit dem Begriff auf Atome oder Moleküle rekurriert, ohne dies zu thematisieren bzw. zu reflektieren. Dass der Teilchenbegriff eigentlich weiter gefasst ist, bleibt im Allgemeinen unerwähnt. Im RÖMPP-Lexikon der Chemie wird zwischen dem mikrophysikalischen und dem makrophysikalischen Teilchenbegriff differenziert:

„1. Im mikrophysikal. Sinne Bezeichnung für alle Elementarteilchen einschließlich der Photonen und imaginären Teilchen wie den Quarks, Partonen und Tachyo-

nen, in erweitertem Sinne auch für Atomkerne, Atome, Mol. und Ionen, deren physikal. Eigenschaften z. T. nur im Rahmen der Quantentheorie beschrieben werden können. [...] 2. Im makrophysikal. Sinne bezeichnet man mit Teilchen sehr kleine, aus vielen Mol. oder Formeleinheiten zusammengesetzte Körper wie etwa Staub oder Schwebstoffe in Gasen und Flüssigkeiten (partikuläre Materie); $6,022 \cdot 10^{23}$ (Avogadro-Konstante) identische Teilchen sind ein Mol, die Grundeinheit der Stoffmenge.“ (Falbe und Regitz, 2017)

In Bezug auf die Betrachtung von Teilchen der submikroskopischen Ebene (also der mikrophysikalischen Sicht) sind in der Literatur zahlreiche Fehlvorstellungen von Lernenden beschrieben (vgl. Kapitel 2.3.3). Hier ist unter anderem die Übertragung der Eigenschaften der Stoffe auf die Teilchenebene zu nennen. Schmidt (2010) geht zudem davon aus, dass gerade der Begriff Teilchen aufgrund der sprachlichen Nähe zum „Zerteilen“ die Vorstellung der „kontinuierlichen Körnigkeit“ (vgl. Kapitel 2.3.3) fördert. Sie fordert ebenso wie Barke et al. (2015), den Begriff nur für submikroskopische Entitäten einzusetzen. Wodzinski (2011a) bemerkt, dass Fehlvorstellungen womöglich durch die Einführung von Teilchenkonzepten in der Grundschule evoziert werden. Als Beispiel führt sie häufig verwendete anschauliche Abbildungen wie die Illustration kleiner Wassertropfen bei der Verdunstung von Wasser an. Zudem überfordere eine wissenschaftlich korrekte Teilchenvorstellung selbst viele Erwachsene.

Unter Berücksichtigung der Verwendung des Teilchenbegriffes in unterschiedlichen Disziplinen wird in der vorliegenden Arbeit der Begriff im makrophysikalischen Sinn gebraucht. Eine Abgrenzung und Ausdifferenzierung hat (meines Erachtens) vielmehr bei der Einführung von Molekülen und Atomen zu erfolgen. Das Aufgreifen der „Andersweltlichkeit“ (Rehm und Buck, 2006) der submikroskopischen Teilchen in der Primarstufe erachte ich als wenig sinnvoll.

Um zu klären, ob die Kinder bereits über Assoziationen oder Konzepte zu dem Begriff „Teilchen“ verfügen, wurde dieser im concept map aufgegriffen. Die Ergebnisse sind in Kapitel 6.2.2 beschrieben.

5.4.3. Interviews und *teaching experiments* während des zweiten Kurses

Im Verlauf des Kurses wurden an sechs Terminen problemzentrierte Interviews bzw. *teaching experiments* durchgeführt. Ziel war es, die Konzepte der Kinder zur Formbarkeit und deren Ausbaufähigkeit detaillierter zu untersuchen; zugleich sollten die übrigen Phänomene nicht vernachlässigt werden, um auch hier in anschließenden Studien Konzepte herausarbeiten zu können. Thematisiert wurden neben der Formbarkeit insbesondere die Zusammensetzung, das Brennen des Lehms sowie das Schrumpfverhalten. In der folgenden Auflistung sind die *teaching experi-*

5. Erhebung der Lernendenperspektiven zum Lerngegenstand Lehm

ments als solche deklariert, es sei jedoch darauf hingewiesen, dass auch die problemzentrierten Interviews in einigen Teilen Lehrphasen enthielten.

Interview I2-1

Das erste Interview wurde eingesetzt, um spontane Äußerungen und Vorerfahrungen sowie wichtigen Begriffen zugrundeliegende Konzepte rekonstruieren zu können. Zunächst wurde den Kindern ein getrocknetes, geformtes Lehmstück als Impuls gezeigt. Die Kinder sollten vermuten worum es sich handelt und Vermutungen anstellen, wie man ein solches Stück erhält.

Nach dem gemeinsamen Ausgraben des Lehms mit den Kindern, wurden sie beim Formen von Objekten gefilmt und dabei nach den Vorerfahrungen mit dem Werkstoff befragt. Ansonsten wurden keine vorbereiteten Fragen gestellt, vielmehr wurde versucht, spontan entstehende Gespräche aufrechtzuerhalten und weiterzuentwickeln. Im weiteren Verlauf wurde das *concept map* eingesetzt (s.o.), wobei die Kinder die gewählten oder selbst hinzugefügten Begriffe erläutern sollten.

Interview I2-2

Das Interview stellte den ersten Teil einer Modifikation des Interviews I1-4 (Formen eines Schneemanns) vom vorherigen Kurs dar. In diesem Interview ging es primär darum, die Ergebnisse des Vorjahres durch ein ähnliches Vorgehen zu überprüfen; in einem späteren Interview, welches als *teaching experiment* konzipiert wurde, sollten der Zusammenhang zwischen Korngröße und Formbarkeit mit den Kindern erarbeitet werden (vgl. I2-4). An dieser Stelle wurde – abweichend von der Vorerhebung – ausschließlich ein Vergleich der Formbarkeit von grobem Sand und Lehm gezogen (der feine Sand wurde erst im *teaching experiment* eingesetzt). Zudem wurde, wie beschrieben, ein gemeinsam auszufüllendes Arbeitsblatt eingesetzt, um die Kinder zunächst zu eigenständigeren Äußerungen anzuregen.

Interview I2-3 (teaching experiment)

Im dritten Interview stand die Zusammensetzung des Lehms im Vordergrund. Die Annäherung erfolgte über einen getrockneten Lehmklumpen, welchen die Kinder fühlen und mit der Lupe betrachten konnten. Der trockene Lehm bröckelt leicht ab, so dass die partikuläre Struktur erkennbar wurde. Anschließend wurde das Bodensieb mit bereits gesiebttem Lehm gezeigt, die Kinder beschrieben die Siebfraktionen und wurden anschließend aufgefordert, wieder Lehm herzustellen, mit dem sie etwas formen könnten (Wasser stand natürlich ebenfalls zur Verfügung). Dieses Vorgehen sollte dazu beitragen, Lehm als ein Stoffgemisch zu begreifen. Zudem wurde die Bedeutung des Wassers durch die Verwendung des trockenen Lehms hervorgehoben.

Interview I2-4 (teaching experiment)

Dieses Interview stellte den zweiten Teil zum Thema Formbarkeit dar. Hier sollte insbesondere auf die Tatsache eingegangen werden, dass die Kinder zwar bei Betrachtung der unterschiedlichen Sande die Korngröße mit einbezogen, diesen Zusammenhang jedoch nicht auf den Lehm übertragen. Den Kindern wurden vier verschiedene trockene Proben gezeigt: feiner Sand, grober Sand, Kies, sowie Lehmpulver (welches ihnen bereits aus I2-3 bekannt war). Es wurden trockene, pul-

5. Erhebung der Lernendenperspektiven zum Lerngegenstand Lehm

verisierte Proben verwendet, um zum einen die Bestandteile „greifbarer“ und die Wirkungen des Wasser bei der Ausbildung des „Gefüges Lehm“ zu verdeutlichen. Vorgegangen wurde nach der P_{EOE} - Methode: Die Kinder sollten zunächst eine Vermutung über die Formbarkeit der Materialien (bei Wasserzugabe) äußern und diese begründen; im Anschluss konnten sie ihre Hypothesen durch Formen der unterschiedlichen Proben überprüfen, ihre Beobachtungen beschreiben und schließlich für diese eine (gegebenenfalls abweichende) Erklärung suchen.

Weiterhin wurde im Anschluss der Lehmbrand aufgegriffen. Hier wurde zunächst eruiert, ob die Kinder eine gebrannte Probe erkennen und welche Eigenschaften sie dieser zuschreiben. Schließlich wurden Vermutungen zum Verhalten der Proben in Wasser angestellt und der entsprechende Versuch durchgeführt.

Interview I2-5

Die Schrumpfung des Lehms war Schwerpunkt des fünften Interviews. Hier wurde (wie im ersten Kurs) eine Lehmschlange definierter Länge betrachtet, welche gemeinsam mit den Kindern geformt worden war. Ziel war es unter anderem, Anhaltspunkte dafür zu finden, ob bzw. welche Unterschiede die Kinder zwischen dem Trocknen und dem Brennen des Lehms sehen.

In einem zweiten Teil stand wiederum die Zusammensetzung des Lehms im Mittelpunkt. Hier sollten die Kinder zwischen verschiedenen anorganischen und organischen Materialien wählen (s. Tabelle 5.3), um ein Stoffgemisch ähnlich dem des Lehms zu erzeugen.

Interview I2-6

Im letzten Interview wurde das *concept map* erneut durchgeführt, um etwaige Veränderungen in den Begriffskonzepten und bezüglich der Relevanz der Begriffe für die Kinder ausmachen zu können. Wenn in diesem Zuge die Formbarkeit aufgegriffen wurde, so wurden hier vertiefend Nachfragen gestellt. Zudem sollten alle Gruppen eine Einschätzung zu der Frage nach der Formbarkeit mageren Lehms („Lehm, der sehr viel Sand enthält“) abgeben.

Der vollständige Leitfaden ist in Tabelle 5.3 dargestellt.

Tabelle 5.3.: Interviewleitfaden der zweiten Erhebung

Interview/ Zeitrah- men	Leitfragen/Impulse	Schwerpunkt/ Übergeord- nete Frage
1. Interview (I2-1)	1) Die Kinder werden während des Formens in Kleingruppen gefilmt; dabei frei äußern lassen. 2) Beim <i>concept map</i> werden die von den Kinder gewählten Begriffe aufgegriffen und nach der Beziehung zum Lehm gefragt. Alle Gruppenmitglieder sollen sich zu den entsprechenden Begriffen äußern.	1) Formbarkeit des Lehms – Erste Eindrücke und Vorerfahrungen 2) Klärung von Begriffskonzepten durch Einsatz eines <i>concept maps</i>

5. Erhebung der Lernendenperspektiven zum Lerngegenstand Lehm

<p>2. Interview (I2-2)</p>	<p>1) Einsatz des Arbeitsblattes (s. Anhang) 2) Aufgreifen der verfassten Erklärungen: a) Allgemein: Erklärungen hinterfragen (<i>Wie meint ihr das?</i>) b) Eigenschaften werden als Begründung angegeben: <i>Warum haben die Materialien unterschiedliche Eigenschaften?</i> c) Zusammensetzung des Materials werden als Begründung angegeben: <i>Wie ist das bei... (dem anderen Material?)</i></p>	<p>Vergleich der Formbarkeit von grobem Sand und Lehm. Tauchen die Konzepte des ersten Kurses wieder auf?</p>
<p>3. Interview (in Form eines teaching experiments) (I2-3)</p>	<p>1) Getrockneten Lehmklumpen zeigen. Den getrockneten Lehm zwischen den Fingern zerreiben lassen → Lupe: <i>Was könnt ihr beobachten?</i> 2) Gesiebten Lehm im Sieb zeigen und dessen „Herstellung“ erklären. Die Kinder können die verschiedenen Fraktionen auch haptisch erfassen. <i>Was seht ihr?</i> Beschreiben lassen. Vergleich mit der Schlämmanalyse (bereits am vorherigen Termin besprochen). 3) <i>Wie könnte man aus diesen Materialien wieder Lehm herstellen?</i> 4) <i>Was müsste man tun, damit man wieder etwas damit bauen kann?</i> 5) <i>Wie fühlt sich der Lehm vorher an?</i> 6) <i>Wie verändert er sich bei Wasserzugabe?</i></p>	<p>Untersuchung der Zusammensetzung anhand getrockneten Lehms. Lehm als Stoffgemisch begreifen. Sehen die Kinder die Zusammenhänge zwischen den nach Korngrößen getrennten Lehmbestandteilen und dem Stoffgemisch Lehm?</p>

5. Erhebung der Lernendenperspektiven zum Lerngegenstand Lehm

<p>4. Interview (in Form eines teaching experiments) (I2-4)</p>	<p><i>1. Teil</i> Auf dem Tisch stehen vier Behälter mit verschiedenen Inhalten: Kies, grober Sand, feiner Sand, sowie Lehmpulver</p> <p>a) Materialien beschreiben und benennen lassen.</p> <p>b) <i>Woraus könnte man am besten etwas formen? Warum?</i></p> <p>c) Wenn von den Kindern nicht selbst genannt, greift der Interviewende stärker leitend ein: Am Ende sollte eine je, desto Beziehung stehen: Je kleiner die Bestandteile, desto besser lässt sich das Material formen.</p> <p>d) Übertragung zum Lehm herstellen.</p> <p><i>2. Teil</i> Gebranntes Lehmstück (Ziegel/Geformtes) zeigen: <i>Was ist das? Vermutete Antworten:</i></p> <p>a) Ton: Nachfragen Vorerfahrungen <i>Wie kommt ihr darauf? Warum hat es diese bestimmte Form? Wo finde ich es?</i> Eigenschaften beschreiben lassen</p> <p>b) Gebranntes Lehmstück wird als gebrannt beschrieben. Anschließend Eigenschaften beschreiben lassen (nicht in Bezug zu ungebranntem Lehm setzen - Die Abgrenzung sollte später im Kurs bei der Erarbeitung der Stoffumwandlung erfolgen.)</p> <p>c) Stein: <i>Wie kommt ihr darauf?</i></p> <p>Eigenschaften beschreiben lassen. <i>Was passiert wenn wir dieses Stück in Wasser legen?</i></p>	<p><i>1. Teil</i> Bedeutung der Korngröße für die Formbarkeit unterschiedlicher Bodenarten.</p> <p><i>2. Teil</i> Brennen des Lehms: Ist den Kindern das Brennen von Lehm/Ton bekannt? Sehen sie einen Unterschied zwischen dem Trocknen und dem Brennen von Lehm? Welche Eigenschaften ordnen sie dem Scherben zu? Was postulieren sie hinsichtlich des Verhaltens gegenüber Wasser?</p>
---	---	---

5. Erhebung der Lernendenperspektiven zum Lerngegenstand Lehm

<p>5. Interview (I2-5)</p>	<p><i>1. Teil: Schrumpfung</i></p> <p>a) Getrocknete Lehmschlange zeigen <i>Was ist passiert? Warum?</i></p> <p>b) <i>Würde sich etwas ändern, wenn wir die Schlange noch länger liegen lassen? Würde sich etwas ändern, wenn wir sie in dem Ofen auf etwa 1000°C erhitzen?</i></p> <p><i>2. Teil: Lehm herstellen</i> Material: verschiedene Tone, Sand, Kies, Steine, Erde, Schluff, Wasser, Pflanzen, Stroh, Wurzeln <i>Versucht einmal aus diesen Materialien selber Lehm herzustellen! Was würdet ihr auswählen? Warum glaubt ihr ist das im Lehm?</i> Bei Ton: <i>Wie wäre der Lehm ohne Ton? Warum lässt sich der Ton so gut formen? Was ist der Unterschied zwischen Lehm und Ton?</i></p>	<p><i>1. Teil:</i> Welche Veränderungen der getrockneten Proben fallen den Kindern auf? Was äußern sie zum Prozess des Schrumpfens? Wird zwischen Trocknen und Brennen differenziert?</p> <p><i>2. Teil:</i> Bestandteile des Lehms: Unterscheiden die Kinder zwischen organischen und anorganischen Materialien?</p>
<p>6. Interview (I2-6)</p>	<p>Das <i>concept Map</i> wird erneut durchgeführt; es wird unbedingt erneut auf die Formbarkeit eingegangen. Dabei: <i>Wie würde sich Lehm, der sehr viel Sand enthält, formen lassen?</i></p>	<p>Wiederholung des <i>concept Maps</i>: Entwicklung der Begriffskonzepte. Formbarkeit: Anwendung der Konzepte auf eine theoretische Fragestellung</p>

5.4.4. Datenaufbereitung- und analyse

Der Fokus der Analyse lag auf dem Phänomen Formbarkeit. Bei der Transkription wurde daher in Hinblick auf die Analyserichtung eine Vorauswahl getroffen. Somit standen die Interviews I2-2 und I2-4 im Vordergrund; weiterhin wurde das letzte Interview zur Auswertung hinzugezogen. Im ersten Interview fanden sich nur wenige relevante Passagen, es wurde aber im Zuge der Explikation berücksichtigt. Auch die *concept maps* flossen in die Analyse der Daten ein.

Während im Interview I2-2 die Überprüfung und Erweiterung der Ergebnisse des Vorjahres im Vordergrund stand, diente das Interview I2-4 in Form des *teaching experiments* dazu, eine Konzepterweiterung durch einen Vergleich von Materialien unterschiedlicher Korngrößen anzuregen. I2-6 sollte – bezogen auf die Formbarkeit – Rückschlüsse auf die Konzeptänderungen zulassen.

Für die Auswertung wurde das im ersten Kurs erarbeitete Kategoriensystem genutzt. Äußerungen, welche nicht in das bestehende System passten, wurden zunächst unter einer weiteren Kategorie „Sonstiges“ eingeordnet, um diese gegebenenfalls nachträglich auszudifferenzieren. So wurden die Kategorien „Teilchengröße: Allgemeiner Zusammenhang“ sowie „Wasser: Andeutung einer Wechselwirkung“ nachträglich hinzugefügt. Die Codierungen des ersten Kurses wurden daraufhin einer erneuten Sichtung unterzogen, falls eine Textpassage nach dem überarbeiteten Leitfaden eher einer der neu gebildeten Kategorien zugeordnet werden konnte.

5. Erhebung der Lernendenperspektiven zum Lerngegenstand Lehm

Für die Interviews, in welche die Erstellung des *concept-maps* integriert war, wurde ein gesondertes Kategoriensystem zu den einzelnen Begriffen erstellt (s. Anhang). Da es sich nur um vier Interviewgruppen handelte (in denen nicht zwangsläufig alle Begriffe genannt wurden), wurde eine Kategorie auch dann erstellt, wenn sie nur im Interview mit einer Gruppe genannt wurde. Da bei der Auswertung des *concept maps* im Vordergrund stand, welche Konzepte den einzelnen Begriffen zugrunde liegen und inwiefern sich die Begriffskonzepte vor und nach dem Kurs unterschieden, wurden eine Codierung innerhalb eines Dokumentes nur einmal vorgenommen, auch wenn beispielsweise ein Kind seinem Vorredner zustimmte. Aussagen einzelner Kinder wurden in der Feinanalyse berücksichtigt.

Im Anschluss wurden die Explikation sowie die detailliertere Analyse (Analysestufe 2, Abbildung 5.6) durchgeführt.

6. Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden zunächst die Ergebnisse, die auf der kategorienbasierten Auswertung des zweiten Kurses beruhen, vorgestellt (1. Analysestufe) und mit denen des vorherigen Kurses verglichen. Die zuvor bereits dargestellten vorläufigen Ergebnisse können so gestützt, eingeschränkt oder erweitert werden. Weiterhin werden die methodischen und inhaltlichen Änderungen im Vorgehen beim zweiten Kurs bezüglich ihrer Effekte analysiert. Im Anschluss wird in Kapitel 6.3 durch die Beschreibung der Resultate der zweiten Analysestufe ein erweiterter Blick auf die Daten gegeben. Die Ergebnisse werden teilweise bereits in diesem Kapitel in ersten Ansätzen diskutiert. Dies erleichtert die Einordnung der Ergebnisse in den Gesamtzusammenhang und soll dem Verständnis dienen. In Kapitel 7 werden die zentralen Ergebnisse unter Rückbezug auf didaktische Ansätze zusammenfassend diskutiert und darauf aufbauend erste Leitlinien für den Lerngegenstand abgeleitet.

6.1. Ergebnisse der kategorienbasierten Auswertung

Um zu prüfen, ob die Ergebnisse des ersten Kurses durch die des zweiten gestützt, erweitert oder eingeschränkt werden, erfolgt zunächst ein Vergleich der Interviews, in welchen Lehm und Sand bezüglich ihrer Formbarkeit verglichen werden (I1-4 bzw. I2-2), hinsichtlich der Häufigkeit der vergebenen Kategorien. Diese Interviews wiesen inhaltlich prinzipiell die gleiche Struktur auf; im zweiten Kurs wurde (aufgrund des im weiteren Verlauf durchgeführten *teaching experiments*) allerdings auf den Einsatz des feinen Sandes verzichtet und nur ein Vergleich von grobem Sand mit Lehm angestellt. Wie aus Abbildung 6.1a ersichtlich, sind nur geringe Abweichungen in der Verteilung der Äußerungen auf die Kategorien zwischen beiden Kursen zu erkennen.²⁸ Hauptsächlich wird auch in diesem Kurs über die Eigenschaften der Stoffe, die Bestandteile des Sandes und das Wasser argumentiert. Auch Begründungsansätze, die sich inhaltlich der Gefügebene zuordnen lassen, werden ähnlich häufig aufgegriffen.

Die größten Abweichungen sind in den Kategorien „Sand: Einbezug der Teilchengröße“ sowie der Verteilung auf die Subkategorien zum Wasser auszumachen. Ersteres lässt sich durch die beschriebene inhaltliche Abweichung erklären, schließlich legt ein Vergleich verschieden grobkörniger Sande eine Fokussierung der Größe der Bestandteile nahe. Weshalb im zweiten Kurs dem Wasser eher eine Funktion zugeschrieben wird, kann nicht auf Anhieb geklärt werden. Es fällt

²⁸In Abbildung 6.1a sind zur besseren Übersicht nur jene Kategorien aufgegriffen, auf denen der Hauptauswertungsschwerpunkt lag (vgl. Kapitel 5.3; die Kategorie *Wasser: Andeutung einer Wechselwirkung* wurde nicht codiert und wird daher nicht aufgeführt). Ein Diagramm mit allen Kategorien findet sich im Anhang.

6. Ergebnisse

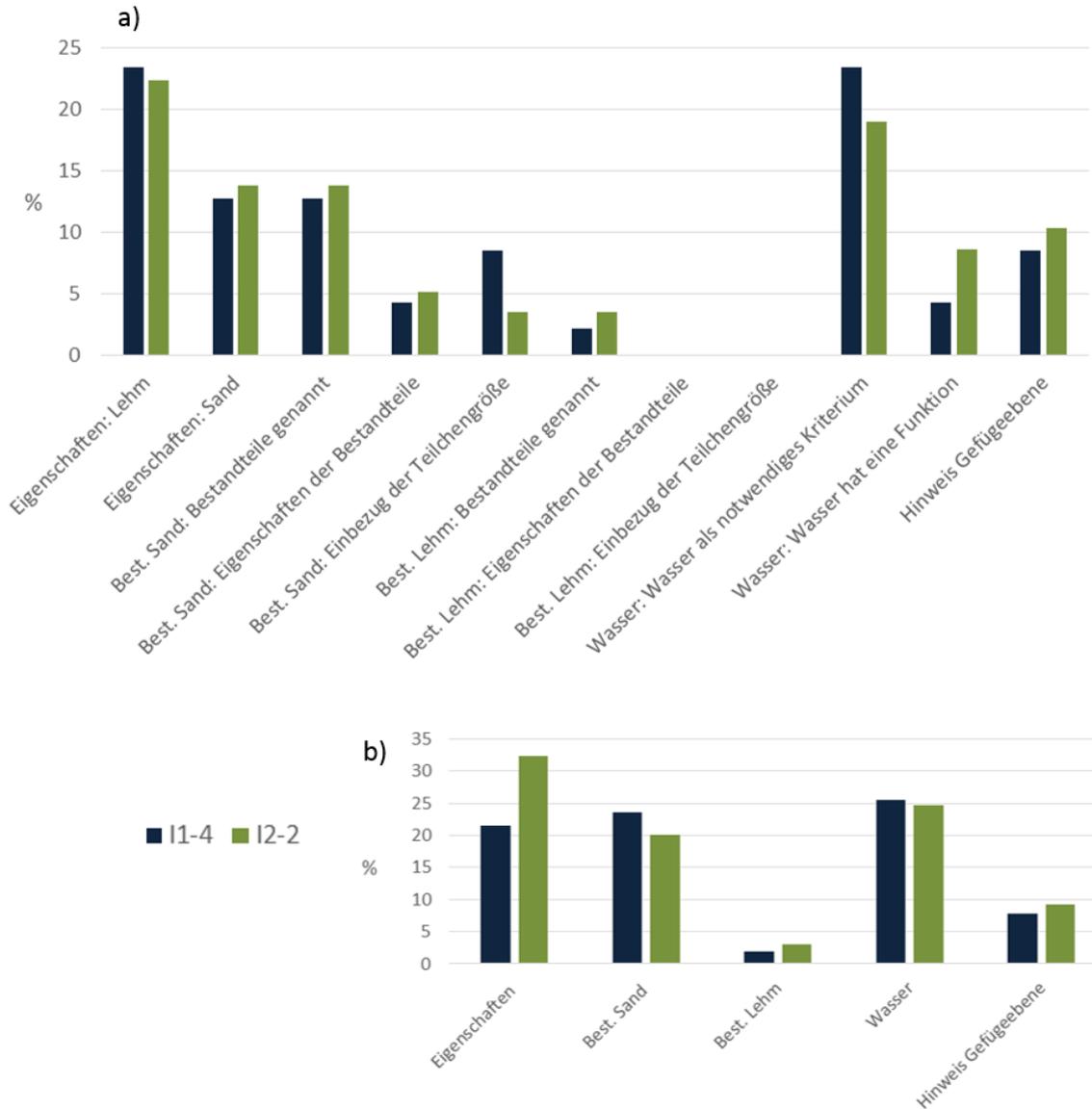


Abbildung 6.1.: **Vergleich der Hauptkategorien des ersten und zweiten Kurses** bezogen auf den Vergleich der Formbarkeit von Lehm und Sand (I1-4 bzw. I2-2). Dargestellt sind die prozentualen Anteile der codierten Segmente innerhalb der jeweiligen Kategorie bezogen auf alle innerhalb des Interviews codierten Äußerungen. a) Kategorien mit Hauptauswertungsschwerpunkt; b) Subkategorien zusammengefasst

6. Ergebnisse

allerdings auf, dass auch hier die Summe der unter der Hauptkategorie „Wasser“ gefassten (anteiligen) Äußerungen nahezu identisch ist (6.1b).

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Äußerungen, welche von den Kindern spontan zur Formbarkeit geäußert werden, in beiden Kursen sehr ähnlich auf die jeweiligen Kategorien verteilt sind. Somit werden die zuvor beschriebenen Ergebnisse gestützt.

Ein Vergleich der Codierungen an den unterschiedlichen Interviewterminen des zweiten Kurses hinsichtlich der Anzahl codierter Segmente innerhalb der verschiedenen Kategorien gibt Aufschluss über mögliche Änderungen der Konzepte bei den Lernenden. In Abbildung 6.2 werden dazu die Interviews I2-2 (Vergleich der Formbarkeit von Lehm und Sand), I2-4 (*teaching experiment* zur Formbarkeit unterschiedlicher Korngrößen), sowie das letzte Interview I2-6 (Entwicklung des *concept maps* und Frage nach der Formbarkeit mageren Lehms) miteinander verglichen. Bei der Interpretation der Ergebnisse müssen stets die unterschiedlichen Fokusse und Leitfäden der Interviews (vgl. Tabelle 5.3) berücksichtigt werden. Die hier dargestellten Ergebnisse können erste Hinweise auf eine Konzeptentwicklung geben; in der zweiten Analysestufe werden einige mögliche kausale Zusammenhänge beschrieben.

6. Ergebnisse

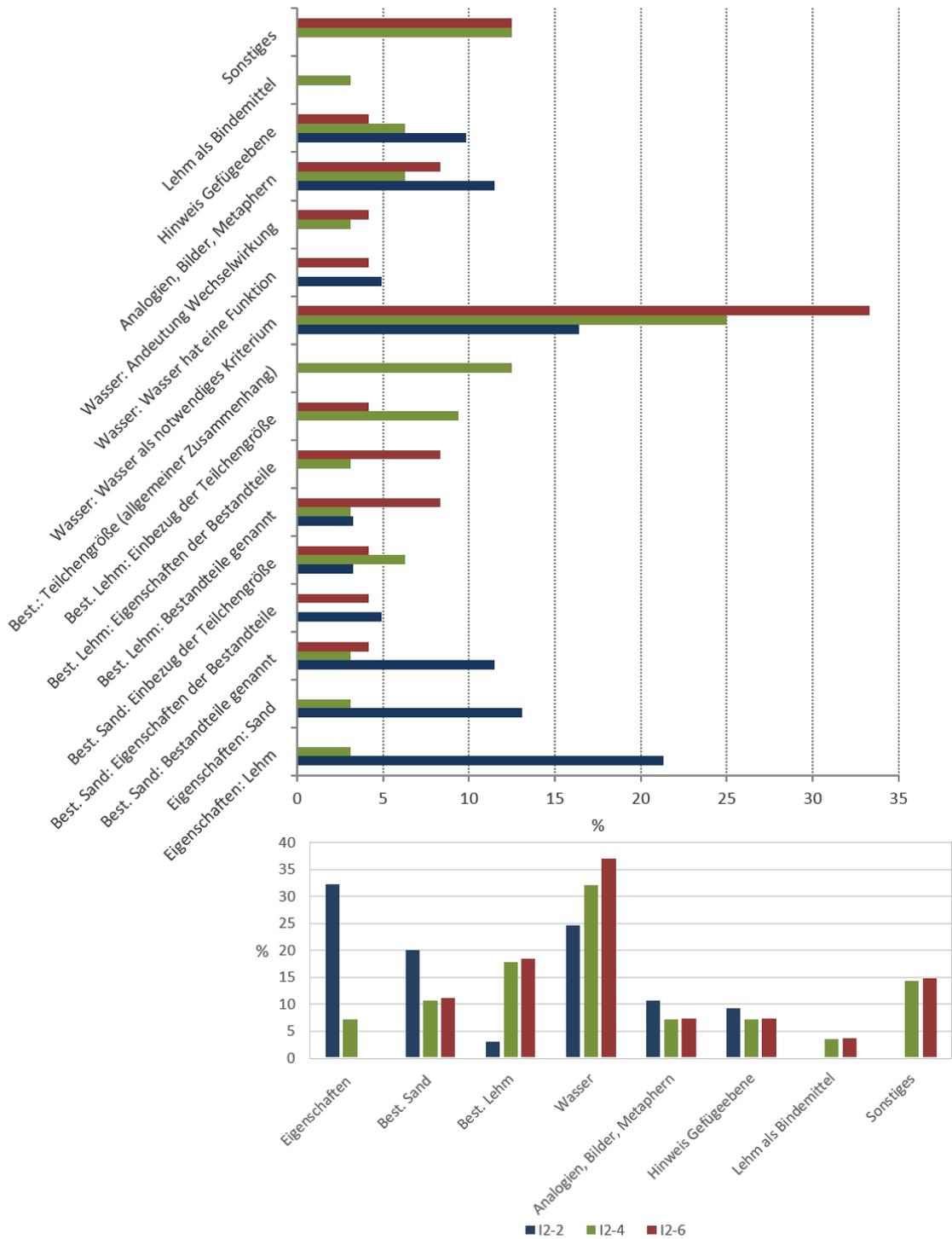


Abbildung 6.2.: **Verteilung der Äußerungen in den inhaltlichen Kategorien zur Formbarkeit im zweiten Kurs.** Dargestellt sind die prozentualen Anteile der Äußerungen bezogen auf die Gesamtanzahl in den auf der x-Achse gelisteten Kategorien in den jeweiligen Interviews. a) Alle Kategorien; b) Subkategorien zusammengefasst

Wie bereits in Kapitel 5.3.3 beschrieben, wurden die Kategorien „Wasser: Andeutung einer Wechselwirkung“ sowie „Teilchengröße: Allgemeiner Zusammenhang“ dem Kategoriensystem bei

der Auswertung des zweiten Durchgangs zusätzlich hinzugefügt. Während der Zusammenhang zwischen Korngröße und Formbarkeit (Kategorie Teilchengröße: allgemeiner Zusammenhang) eine logische Konsequenz der Struktur des *teaching experiments* darstellt (sie war sogar das Ziel des Vorhabens), wurde die Kategorie der Wechselwirkung trotz einer eher geringen Anzahl an Codierungen hinzugefügt, da sie sich qualitativ von den übrigen Kategorien zum Wasser deutlich abhebt. Zudem zeigt sich, dass die Kategorie „Sonstiges“ in I2-4 sowie I2-6 relativ häufig codiert wurde. Dies deutet darauf hin, dass durch das Kategoriensystem nicht alle Aussagen abgedeckt werden. Da es sich aber um weniger relevante bzw. nur vereinzelt auftretende Äußerungen handelt, wurde darauf verzichtet, weitere Kategorien zu generieren. Die betreffenden Passagen werden aber im zweiten Analyseschritt berücksichtigt (Kapitel 6.3). Es fällt auf, dass – ähnlich wie bei den Ergebnissen des ersten Kurses – die Bestandteile des Lehms in den letzten Interviews deutlich häufiger aufgegriffen werden und demgegenüber die Anteile der Äußerungen, welche sich auf andere Eigenschaften des entsprechenden Stoffes beziehen, zurückgehen (vgl. Abbildung 6.2). Diese Tendenz ist im zweiten Kurs sogar noch deutlicher festzustellen, wie ein Vergleich der in Abbildung 6.3 dargestellten Änderungen hinsichtlich der Kategorienverteilung vom letzten Interview gegenüber dem ersten Interview mit dem Schwerpunkt Formbarkeit zeigt. Auch der Korngröße wird am Ende des zweiten Kurses eine höhere Relevanz zugesprochen. Sie spielt zu Beginn nur in seltenen Fällen und in Bezug auf Sand eine Rolle (vgl. Abbildung 6.2); zuletzt wird sie auch für den Lehm als bedeutsam erachtet (diese Tendenz war im ersten Kurs nicht zu beobachten (vgl. Abbildung 5.9). Zudem wird im zweiten Kurs häufig ein allgemeiner Zusammenhang zwischen Korngröße und Plastizität erkannt.²⁹ Dies legt die Vermutung nahe, dass das gewählte Vorgehen zu einer Konzepterweiterung beitragen kann und die Kinder zu einem verstärkten Nachdenken über die Zusammensetzung der Materialien anregt (s. auch Kapitel 6.3).

Weiterhin scheint auch das Wasser für die Kinder bei der Deutung des Phänomens an Bedeutung zu gewinnen. Vermutlich ist dies darauf zurückzuführen, dass ausschließlich getrocknete Proben eingesetzt und so die Notwendigkeit des Hinzufügens von Wasser offensichtlich wurde. Zudem kann die Beobachtung des unterschiedlichen Verhaltens der Lehm- bzw. Sandbestandteile bei Wasserzugabe auch zu einer Fokussierung der Wechselwirkung zwischen Wasser und Lehm/Sand beitragen.

Die Kategorisierung der Textpassagen im letzten Interview deutet darauf hin, dass die Äußerungen, welche auf eine Konzepterweiterung hindeuten, nicht nur auf das *teaching experiment* beschränkt bleiben, sondern auch im letzten Interview auftauchen (vgl. Abbildung 6.2). Hier wurde weniger an einem konkreten Experiment gearbeitet; vielmehr wurde die Formbarkeit während des *concept maps* aufgegriffen oder spätestens bei der Frage nach der Formbarkeit sehr mageren Lehms thematisiert. Einschränkend ist darauf hinzuweisen, dass nicht auszuschließen ist, dass die Konfrontation mit den Begriffen des *concept maps* zum Nachdenken über die Zusammensetzung

²⁹Da es sich um ein *teaching experiment* handelte, wurde in den Gruppen zum Teil auch durch den Interviewenden auf diesen Aspekt hingeleitet. Dies spiegelt das Kategoriensystem nicht wider, wird aber in der Feinanalyse aufgegriffen (Kapitel 6.3)

6. Ergebnisse

(bspw. durch den Einbezug der Begriffe Ton, Sand) anregte. Andererseits waren auch Begriffe, die eher weitere Eigenschaften nahelegten (z.B. Knete) Bestandteil des *concept maps*. Inwiefern das gewählte Design Auswirkungen auf die Äußerungen der Kinder hatte, kann hier nicht endgültig beantwortet werden.

Die erste Auswertung deutet jedoch darauf hin, dass die Überarbeitung der inhaltlichen Struktur die Konzeptentwicklung positiv beeinflussen konnte.

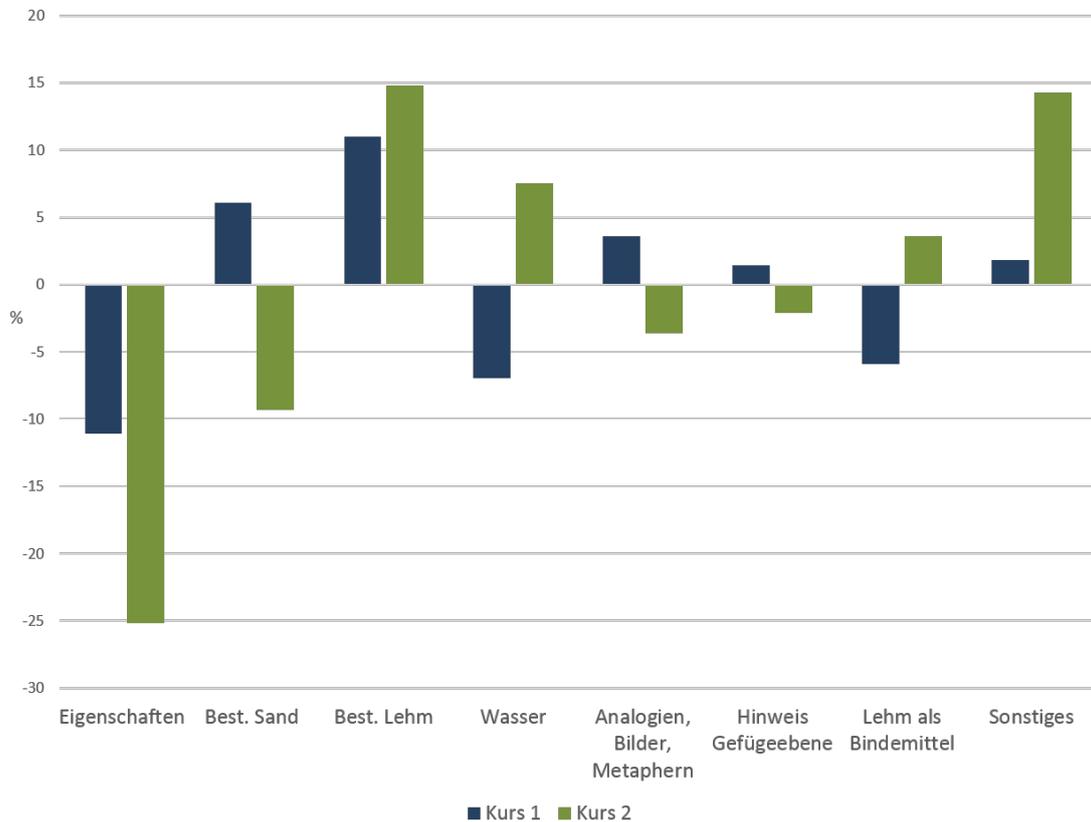


Abbildung 6.3.: Vergleich der Änderungen der anteiligen Äußerungen im letzten Interview von Kurs 1 und 2 gegenüber den Interviews in welchen die Formbarkeit zum ersten Mal thematisiert wurde. Die Subkategorien sind unter der Hauptkategorie zusammengefasst.

Zusammenfassung

- Die Ergebnisse der kategorienbasierten Auswertung des zweiten Kurses stützen die des vorherigen. Das Kategoriensystem wurde um die Kategorien „Wasser: Andeutung einer Wechselwirkung“ sowie „Teilchengröße: Allgemeiner Zusammenhang“ erweitert.
- Durch das gewählte Design im *teaching experiment* kann die Bedeutung der Korngröße für Kinder – auch in Bezug auf Lehm – verdeutlicht werden.
- Die Bestandteile und die Korngrößen des Lehms werden ebenso wie der Faktor Wasser auch am Ende des zweiten Kurses zur Begründung der Formbarkeit herangezogen.

6.2. Effekte der methodischen Überarbeitungen und Auswertung der concept maps

Wie in Kapitel 5.4 beschrieben, wurden neben inhaltlichen auch methodische Änderungen vorgenommen, um bei der Auswertung des ersten Kurses festgestellten Schwierigkeiten zu begegnen. An dieser Stelle wird auf die Effekte dieser Überarbeitungen eingegangen.

6.2.1. Einsatz von Arbeitsblättern

In dem Interview zur Formbarkeit von Sand und Lehm wurden Arbeitsblätter mit dem Ziel eingesetzt den Anteil der – bezogen auf die Plastizität – relevanten Aussagen zu erhöhen und die Kinder zu eigeninitiiertem Sprechen anzuregen (vgl. Kapitel 5.4). Einen Hinweis auf den Erfolg dieser Strategie kann die Anzahl der Codierungen innerhalb des Interviews liefern. So wurden im ersten Kurs insgesamt 51 Textpassagen in dem entsprechenden Interview codiert ($n=14 \rightarrow 3,6$ Codierungen/Kind), im zweiten Kurs wurden 65 Codierungen vorgenommen ($n=11 \rightarrow 5,9$ Codierungen/Kind). Die Zunahme deutet darauf hin, dass die Arbeitsblätter die Diskussion über die gestellten Aufgaben fördern und die Kinder zu vermehrten Äußerungen anregen. Dennoch ist ein kausaler Zusammenhang nicht erwiesen und weitere Faktoren können nicht ausgeschlossen werden. Beispielsweise kann zugleich die veränderte Gruppengröße einen positiven Effekt gehabt haben.

6.2.2. Concept map und Verwendung des Teilchenbegriffs

Weiterhin wurde das *concept map* entwickelt, um den Anteil sachbezogener Äußerungen zu erhöhen und die Konzepte der Kinder bezüglich verschiedener Begriffe besser rekonstruieren zu können. Im Folgenden werden jene Begriffe aufgegriffen, die durch die Verwendung des *concept maps* näher bestimmt werden sollten oder die darüber hinausgehend weitere, für die Untersuchung gewinnbringende Äußerungen beinhalten. Einschränkend ist zu berücksichtigen, dass – bedingt durch die Frage nach dem Bezug der Begriffe zum Oberbegriff Lehm – nicht alle zuvor aufgeworfenen Fragen (wie beispielsweise der Bezug zwischen Sand und Steinen) eindeutig geklärt werden können. Die Assoziationen, die die Kinder zu dem jeweiligen Begriff an sich (unabhängig von dessen Bezug zum Begriff Lehm) mitbrachten, wurden zwar häufig, aber nicht immer, im Gespräch deutlich.

Die Kategorien werden zunächst tabellarisch aufgelistet, darauf aufbauend erfolgt eine kurze Beschreibung und Interpretation der Befunde. In den Tabellen werden die Gruppen genannt, in welchen mindestens eine Äußerung in der entsprechenden Kategorie codiert wurde. Die Anzahl der Kinder wird nicht angegeben, da nicht geklärt werden kann, inwiefern Kinder innerhalb einer Gruppe bereits Gesagtes nur wiederholten oder - im umgekehrten Fall- trotz gleicher Ideen diese nicht erneut nannten. Zudem steht hier zunächst im Vordergrund *was* genannt wurde; im Rahmen der Feinanalyse werden die Aussagen einzelner Kinder gegebenenfalls bei der Interpre-

Tabelle 6.1.: Kategorien zum Begriff Ton. *cm1=concept map zu Beginn des zweiten Kurses, cm2=concept map am Ende des zweiten Kurses.* Die Buchstabenfolgen kennzeichnen die jeweiligen Gruppen (Anfangsbuchstaben der beteiligten Kinder)

Kategorie	Interview I2-1 (<i>cm1</i>)	Interview I2-6 (<i>cm2</i>)
Vorkommen	ALM, MLN	
Gleiche/Ähnliche Eigenschaft (Formbarkeit)	ALM, DIN	JAHM
Gleiche/Ähnliche Eigenschaft (Sonstige)	ALM, MLN ³⁰	ALM
Unterschiedliche Eigenschaft	JAHM, MLN	
Unterschiedliche Zusammensetzung	ALM	ALM
Bestandteil des Lehms	JAHM	ALM, DIN, JAHM, MLN
Ton als Bindemittel		DIN
Korngröße		ALM, DIN, JAHM, MLN
Keine Vorstellung	DIN	

tation hinzugezogen. In wenigen Fällen erscheint die Anzahl der Kinder relevant (insbesondere innerhalb der Kategorie „keine Vorstellung“ zu den jeweiligen Begriffen) und wird in der anschließenden Beschreibung angeführt.

Die grau hinterlegten Zeilen umfassen Kategorien zu Äußerungen, welche sich nicht auf die konkrete Fragestellung - den Bezug des Begriffes zum Begriff Lehm - beziehen, aber darüber hinausgehend Vorstellungen zu dem Begriff selbst umfassen. Da Äußerungen innerhalb dieser Kategorie unabhängig von der Aufgabenstellung in den Interviews auftraten, repräsentieren sie nicht all jene Konzepte, die bei einer Erhebung, welche sich nur auf den Begriff an sich bezöge (und nicht dessen Beziehung zum Lehm-Begriff), möglicherweise hervortreten würden.

Begriff Ton

Während des ersten Kurses wurde offensichtlich, dass die Kinder scheinbar vielfältige Assoziationen zum Begriff Ton mitbrachten und beispielsweise die Frage, inwiefern der Begriff mit einem feinkörnigen Material in Verbindung gebracht wird, schwierig zu beantworten war (vgl. Kapitel 5.3.3). Um diesem Problem zu begegnen wurde der Begriff ins *concept map* integriert. Lediglich ein Kind aus der Gruppe DIN hat keinerlei Vorstellung von dem Begriff „Ton“. ³¹ Alle anderen Kinder sehen im ersten *concept map* (I2-1) insbesondere Ähnlichkeiten oder Unterschiede zum Lehm als relevant an. Unter anderem wird die Formbarkeit als verbindende Eigenschaft von Ton und Lehm genannt. Unterschiede sehen die Kinder in anderen Eigenschaften wie der Härte oder der Farbe (*H*: „*Ich glaube, dass der Ton da ist, weil Ton ist beinahe genauso wie Lehm. Nur*

³⁰Hier wird nur von „ist so ähnlich“ gesprochen - es ist nicht auszuschließen, dass sich diese Äußerung auch auf die Zusammensetzung beziehen könnte.

³¹Das Kind hat einen Migrationshintergrund und teilweise noch Schwierigkeiten mit der deutschen Sprache.

Lehm der ist weicher als Ton. Und hat auch eine andere Farbe.“ (JAHM - I1-2, 86)). Ein Kind beschreibt Ton als an sich identisch zum Lehm mit der Einschränkung, Ton sei homogener („*Und im Lehm sind ja auch so Steine und die Farben, das kann man mehr erkennen*“ (ALM - I2-1, 37)). Die meisten Kinder sehen also die große Ähnlichkeit, die zwischen beiden Stoffen besteht; als Bestandteil des Lehms wird Ton aber nur von einem Kind bezeichnet.

Gestützt werden diese Ergebnisse von den spontanen Äußerungen der Kinder während des ersten Formens mit dem Lehm, welches vor dem *concept map* durchgeführt wurde (s. S. 83).³² Hier äußern die Kinder, dass ihnen Ton aus der Schule bekannt und Lehm diesem ähnlich sei. Teilweise werden beide Begriffe synonym gebraucht bzw. verwechselt. Unterschiede sehen einige Kinder hier unter anderem in dem unterschiedlichen Verhalten beim Trocknen und/oder Brennen.

Wie aus der Verteilung der Kategorien im *concept map* am letzten Interviewtermin (I2-6) erkennbar, sehen am Ende des Kurses alle Gruppen Ton als Bestandteil des Lehms an und greifen die Korngröße des Materials auf.

Bewertung Es zeigt sich somit, dass der Begriff Ton bei einem Großteil der Kinder konkrete Assoziationen hervorruft. Neben den positiven Effekten, die diese Vorerfahrungen mit sich bringen, kann dies auch zu Schwierigkeiten hinsichtlich der Einsicht in die Tatsache, dass Ton einen Bestandteil von Lehm darstellt, führen. Schließlich ist der Begriff für die Kinder „belegt“, so dass das Begriffsverständnis an dieser Stelle erweitert werden muss.

Die Tatsache, dass den Kinder die ähnlichen Eigenschaften bewusst sind, kann aber zugleich auch eine Chance darstellen, die Tonbestandteile als für die Eigenschaften des Lehms besonders bedeutsam herauszustellen. Dass eine explizite Thematisierung des Tonbegriffes im ersten Kurs nicht erfolgte, kann möglicherweise einen Grund darstellen, weshalb viele Kinder ihr Konzept zur Bedeutung des Tons für die Formbarkeit des Lehms nicht weiter ausbauen konnten (vgl. Kapitel 5.3.3). Zwar wurde Lehm als Stoffgemisch aus Ton, Schluff und Sand charakterisiert, inwiefern allerdings der Aufbau des Tons aus sehr kleinen Bestandteilen mit dem Begriff Ton in Zusammenhang bzw. Einklang gebracht werden konnte, bleibt unklar (vgl. auch S. 73). Im zweiten Kurs wurde daher Ton als Bestandteil explizit thematisiert und als feinkörniges, durch Verwitterung entstandenes, formbares Material eingeführt (s. Kapitel 5.4. Weiterhin wurde der Begriff „Tonteilchen“ für die einzelnen Bestandteile des Tons gewählt (s.u.) Dieses Vorgehen kann möglicherweise zu einer Erweiterung des Begriffsverständnisses (auf welche die Kategorienverteilung am Ende des Kurses in I2-6 sowie die kategorienbasierte Auswertung (Kapitel 6.1 hinweisen) beigetragen haben.

³²Die hier dargestellten Ergebnisse beruhen auf einer Kurzzusammenfassung, welche nach jedem Kurstag nach erster Sichtung der Videos angefertigt wurde. Eine Transkription fand aufgrund der geringen Dichte auswertungsrelevanter Aussagen nicht statt.

Zusammenfassung

- Der Begriff Ton ist den Kindern zu Beginn des Kurses bereits vertraut und mit konkreten Vorstellungen belegt.
- Der Bezug zwischen Lehm und Ton wird über Ähnlichkeiten oder Unterschiede in den Eigenschaften beider Stoffe hergestellt.
- Die vorhandenen Vorstellungen zum Tonbegriff können eine Lernhürde bei der Vermittlung von Ton als Bestandteil des Lehms darstellen, insbesondere wenn Ton als „Masse“ aufgefasst wird.
- Eine Klärung des Begriffes kann zur Konzepterweiterung beitragen.

Begriff Steine

Der Begriff Steine wurden dem concept map hinzugefügt, da im Zuge der Auswertung des ersten Kurses häufig die Frage aufkam, inwiefern Kinder Steine als Bestandteil des Lehms oder des Sandes postulieren. Weiterhin war es schwierig zu beurteilen, ob der Begriff für die Kinder mit einer gewissen Korngröße einhergeht (vgl Kapitel 5.3.3). Letzterer Punkt kann allerdings nur durch eine umfassendere Betrachtung der Transkripte geklärt werden, da im *concept map* in erster Linie die Verknüpfung der Begriffe zu Lehm im Vordergrund stand.

Tabelle 6.2.: Kategorien zum Begriff Steine

Kategorie	Interview I2-1 (<i>cm1</i>)	Interview I2-6 (<i>cm2</i>)
Getrockneter Lehm ist wie Stein	DIN	
Vorkommen	MLN, JAHM	
Bestandteil des Lehms	JAHM	ALM
Bestandteil des Sandes		JAHM, MLN
Stein als Bindemittel	JAHM	
Verwitterungssubstrat		DIN, JAHM, MLN

Die Kategorien zum Begriff „Steine“ (6.2) zeigen, dass die Äußerungen der Kinder wenig einheitlich sind und viele unterschiedliche Aspekte genannt werden. Häufig ist auch nur ein Kind der Gruppe der Ansicht, dass der Begriff mit Lehm in Beziehung steht, während die anderen keinen Bezug sehen. Als Bestandteil von Lehm wird der Begriff einmal im ersten und einmal im letzten Interview von unterschiedlichen Gruppen aufgegriffen. Im letzten Interview dominieren die, vermutlich durch die Aktivitäten im Kurs induzierten, Vorstellungen von Steinen als Ausgangsmaterial, aus welchem die Bestandteile des Lehms durch Verwitterung hervorgehen können sowie als Bestandteile des Sandes. Auch das Vorkommen spielt, wie bei Ton, zu Beginn eine Rolle: da sich beides unter der Erde befindet hat es auch etwas miteinander zu tun. Ein Kind äußert im ersten Interview die Vorstellung, Steine seien im Lehm und fungierten dort als Bindemittel. Denn „*Stein ist massiv und ohne den Stein, da würde der Lehm einfach immer auseinanderbrechen.*“

(JAHM-I2-1, 42). Ein anderes Kind sieht eine Beziehung in der Härte von getrocknetem Lehm und Stein.

Allein aus diesen Äußerungen lassen sich keine Aussagen zu den oben genannten Fragen treffen. Da die Aufgabe explizit auf den Bezug zu Lehm zielte, kann aus dem Fehlen der Kategorie „Bestandteil des Sandes“ nicht ausgeschlossen werden, dass sie den Begriff in Zusammenhang mit Sand wählen würden. Bei den weiter unten aufgeführten Kategorien zum Begriff „Sand“ wird „Steinchen“ von einer Gruppe als Bestandteil des Sandes aufgegriffen (vgl. Tabelle 6.4).

Interessanter bezüglich der Frage nach der Korngröße sind die Äußerungen beim Vergleich verschiedener Bodenarten, wie sie in dem *teaching experiment* in I2-4 angestellt wurden. Doch auch hier ergibt sich kein einheitliches Bild; zumeist scheint der Begriff „Stein“ für die Kinder eine gewisse Korngröße zu implizieren. Andererseits ist dies auch relativ: werden die Kinder mit dem Kies konfrontiert, so bezeichnen sie dessen Bestandteile als „Steine“, während der Begriff in Bezug auf Sand nicht mehr verwendet wird. Ähnliches zeigt sich aber auch für den Begriff „Körner“ in Bezug auf die Sandbestandteile: So beschreibt Moritz bei seinem angeführten Vergleich von grob- und feinkörnigem Sand, im feinen Sand seien „auch keine Steine bei“ (JAHM - I2-2, 52), er sei „ganz körnerfrei“ (JAHM - I2-2, 94).

Bewertung Durch die Analyse der Textpassagen konnte in diesem Fall keine abschließende Aussage über das Begriffsverständnis abgeleitet werden. Für die vorliegende Untersuchung ist dies nicht zentral und soll daher an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden; es weist aber erneut darauf hin, dass, wie in der Literatur beschrieben, viele geowissenschaftliche Begriffe in der Alltagssprache häufig abweichend verwendet werden (vgl. Kapitel 2.5). Erschwerend kommt hier die begriffliche Nähe zum Oberbegriff „Gestein“ hinzu, so dass im Alltag eine Definition häufig aufgrund des Erscheinungsbildes des Materials und nicht aufgrund der Korngröße erfolgt. Auch im ersten Kurs der Erhebung wurde hier nicht genau getrennt; der von den Kindern verwendete Begriff „Stein(chen)“ für die Bestandteile des Sandes wurde seitens der Kursleiter aufgegriffen (vgl. Kapitel 5.3.3).

Zusammenfassung

- Ähnlich wie der Begriff Ton ist der Begriff Stein auch mit Vorstellungen belegt; eine Beziehung zum Lehm wird aber deutlich seltener hergestellt.
- Inwiefern der Begriff Stein eine Korngröße impliziert oder mit einem gewissen Material verbunden wird, kann nicht abschließend geklärt werden bzw. ist bei den einzelnen Kindern unterschiedlich.

Tabelle 6.3.: Kategorien zum Begriff Teilchen

Kategorie	Interview I2-1 (cm1)	Interview I2-6 (cm2)
Stoffportion/Partikel	MLN	
Bestandteile des Lehms	MLN, (ALM)	ALM, DIN, MLN, JAHM
Geringe Größe bezogen auf Lehmbestandteile	ALM	JAHM
Geringe Größe allgemein	ALM	
Keine Vorstellung	DIN, MLN	DIN
Backwaren	ALM, MLN, JAHM	

Begriff Teilchen

Im zweiten Kurs wurde der Begriff „Teilchen“ (s. S. 81) für die Bestandteile der einzelnen Stoffe (Lehm, Sand) verwendet. Um zu Beginn die Assoziationen zu dem Begriff zu klären, wurde er ebenfalls im *concept map* berücksichtigt. Tabelle 6.3 zeigt die ermittelten Kategorien.

In einer Gruppe (DIN) äußert zu Beginn (I2-1) keines der Kinder eine Idee bezüglich des Begriffes; in zwei weiteren Gruppen können einzelne Kinder den Begriff nicht einordnen, bzw. äußern sich nicht dazu (MLN, JAHM). Mehrere Kinder assoziieren mit dem Begriff Backwaren, was auf die Homonymie des Wortes hinweist. Einige Kinder haben bereits eine Vorstellung, die in Richtung „Teil von etwas“ oder „Bestandteil“ deutet. Beispielsweise zeigt Anja, dass sie bereits eine Doppeldeutigkeit in dem Begriff erkennt: „*Entweder so ein kleines Teilchen oder so ein großes Essens-Teilchen.*“ (ALM - I2-1, 2). Später nennt Maren (in derselben Gruppe) die kleinen Steine im Sand als Beispiel für Teilchen („M: *Ja aber wie jetzt- und ich mein jetzt Teilchen, weil es sind ja auch ganz viele zum Beispiel ganz, ganz kleine Steine, die man nicht sehen kann.*“ (ALM - I2-1, 91) und – vermutlich bezogen auf Lehm – nimmt sie an, dass die braunen Stellen auch auf kleine braune Teilchen zurückzuführen seien („M: *Und, zum Beispiel, diese braunen Stellen, das sind ja auch so kleine braune Teilchen.*“ (ALM – I2-1. 92)). Damit impliziert der Begriff Teilchen für sie auch immer eine geringe Größe. Niklas hat zwar eine Vorstellung, was der Begriff auf Lehm bezogen meinen könnte, allerdings sind seine Erklärungen schwer zu interpretieren. Es scheint, als begreife er Teilchen als eine Stoffportion: N: „*Also, Teilchen, also Lehm, war ja gerade auch so, das, das sind ja immer Teilchen gewesen. Hat man die ja immer so ein bisschen gerieben und daraus was gemacht (reibt die Hände aneinander). Die Teilchen. I: Aha. Also, im Lehm waren Teilchen, oder? //N: Nein (Kopfschütteln)// I: Oder der Lehm besteht aus Teilchen? N: Nein, der Lehm besteht ja aus Teilchen. M: Ich weiß das nicht. N: Oder, ist ja eigentlich ganz, alles auf der - das ganze Lehm auf der Welt auf einem Klotz (?). Das geht ja nicht.*“ (MLN - I2-1,47). Zur Klärung sei auf eine Textpassage im zweiten Interview hingewiesen, welche daraufhin deutet, dass Niklas bezogen auf den Begriff „Teilchen“ nicht unbedingt nur eine kleine Stoffmenge vor Augen hat, sondern von einzelnen Partikeln ausgeht: N: „*Also Lehm, also oder Sand hat kleine Teilchen, also kleine Partikel, also die können nicht so richtig fest werden*“ (MLN - I2-2, 24). Die Bedeutung der Größe für die Charakterisierung des Begriffs wird auch innerhalb der Gruppe

ALM diskutiert. Teilchen geht mit „klein“ einher, sowohl allgemein als auch auf Teilchen im Lehm bezogen.

Am Ende des Kurses (I2-6) werden Teilchen auf die Bestandteile des Lehms bezogen bei allen Gruppen genannt, wobei die einzelnen Bestandteile angeführt werden (z.B.: M: „*Also ich habe Teilchen genommen, weil in Lehm stecken ja auch viele Tonteilchen und Schluffteilchen, die dann auch zusammen den Lehm bilden.*“ (JAHM - I2-6, 21)).

Bewertung Bei den hier beschriebenen Kategorien zum Begriff „Teilchen“ wird deutlich, dass die Kinder – wie zu erwarten – keine Vorstellung im fachchemischen Sinn zu dem Begriff mitbringen. Zu Beginn tritt häufig die Assoziation zum Kuchenteilchen auf. Weiterhin wird der Begriff – abgeleitet vom Wortstamm „Teil“ – als Stoffportion aufgefasst; die Verwendung der Verniedlichungsform „chen“ verleitet einige Kinder dazu, eine geringe Größe zu postulieren.

Viele Kinder bringen jedoch bislang keine Vorstellungen zu dem Begriff mit. Interessanterweise gibt es nur wenige Veröffentlichungen, die sich mit dem Teilchenbegriff an sich bzw. Vorstellungen zu diesem auseinandersetzen. Benedict und Bolte (2008), die im Rahmen eines außerschulischen Projektes mit 39 Grundschulkindern erhoben, inwiefern diese ohne vorherige Intervention Lösungsvorgänge unter Zuhilfenahme eines Teilchenmodells erklärten, berichten, dass auf Nachfrage hin nur neun Kinder (23 %) angaben noch nie etwas von Teilchen gehört zu haben.³³ Die zahlreichen Vorstellungen zum Teilchenbegriff führen Benedict und Bolte auf zahlreiche Medien sowie außerschulische Angebote wie „Kinder-Universitäten“ zurück.

In der vorliegenden Untersuchung waren es hingegen nur drei Kinder (23 %), die über die Assoziation zu Backwaren hinaus, etwas mit dem Begriff verbanden. Damit ist der Anteil deutlich geringer.

Die beschriebenen Vorstellungen spiegeln damit eher die makrophysikalische Sicht als die – im Chemieunterricht forcierte – mikrophysikalische Sicht wider, was aufgrund der größeren Alltagsnähe des Begriffes nicht verwunderlich ist (vgl. hierzu auch den Exkurs Teilchen, S. 81). Durch den Einbezug des Begriffes in das *concept map* wird jedoch offensichtlich, dass einige wenige Kinder bereits einen diskontinuierlichen Aufbau des Lehms postulieren, auch wenn an dieser Stelle keine Aussagen über die Vorstellung zu den Eigenschaften der einzelnen Teilchen getroffen werden können. Wie demgegenüber die Ergebnisse des ersten Kurses zeigen, ist dies selbst zum Ende des Kurses häufig nicht der Fall (vgl. Kapitel 5.3.3). Dies lässt den Schluss zu, dass entweder im zweiten Kurs mehr Kinder von einem diskontinuierlichen Aufbau ausgehen oder aber durch den Teilchenbegriff eine Möglichkeit erhalten, ihre Vorstellungen zu formulieren.

So spricht Anja beispielsweise auch von „kleinen braunen Teilchen“ (s.o.). Aufgrund der in Exkurs 2 angeführten Überlegungen (s. Seite 81) wird diese Äußerung nicht als kritisch im Sinne der Gefahr „hausgemachter“ Fehlvorstellungen in Bezug auf den mikrophysikalischen Teilchenbegriff

³³Vier Kinder argumentierten von sich aus mit einem Teilchenkonzept; 24 zogen nach Nachfrage, ob sie bereits etwas von Teilchen gehört hätten, diese in ihre Erklärung mit ein. Zwei bejahten die Frage nach den Teilchen, zogen diese anschließend jedoch nicht zur Deutung des Phänomens hinzu.

angesehen. Wie in einer von Bäumer et al. (2009) ausgearbeiteten Einheit zur Einführung des Teilchenkonzeptes sollen die Kinder erkennen, „dass viele Stoffe des Alltags bei genauem Hinsehen aus kleinen Bestandteilen bestehen“ (ebd., S. 36). Darüber hinaus können sie möglicherweise erkennen, dass der Aufbau eines Stoffes ein Erklärungspotential zur Deutung der Eigenschaften eines Stoffes bietet. Damit kann einem bekannten Problem des Chemieunterrichtes entgegenge- wirkt werden: Auch wenn das Teilchenkonzept eingeführt wurde, wird es von den Schüler_innen allenfalls den bestehenden Erklärungsmustern hinzugefügt, da eine Deutung mit Hilfe von Teil- chenmodellen für die Schüler_innen nicht unbedingt einen Mehrwert darstellt (Duit, 2015).

Zusammenfassung

- Der Begriff Teilchen ruft zu Beginn des Kurses kaum konkrete Assoziationen hervor. Er wird teilweise als Partikel oder als Stoffportion aufgefasst. Häufig ist der Begriff lediglich in Bezug auf das Gebäckstück bekannt.
- Der Begriff Teilchen wird am Ende des Kurses von den Kindern als Begriff für die Bestand- teile der einzelnen Bodenarten angewendet.

Begriff Sand

Tabelle 6.4.: Kategorien zum Begriff Sand

Kategorie	Interview I2-1 (<i>cm1</i>)	Interview I2-6 (<i>cm2</i>)
Ähnlichkeit: Verwendung als Baustoff	DIN	
Ähnlichkeit: Eigenschaft kleben	MLN	
Unterschiede: Eigenschaften (Verhalten beim Trocknen, Härte, Formbarkeit)	ALM, DIN	
Vorkommen	ALM, JAHM, MLN	MLN
Sand als Bestandteil des Lehms	ALM, JAHM	DIN, JAHM, MLN
Besteht aus Steinchen	JAHM	JAHM

Die Kategorien zum Begriff Sand (vgl. 6.4) zeigen, dass dieser zunächst hauptsächlich über ähnliche oder unterschiedliche Eigenschaften zum Lehm eingegrenzt wird. Ähnlichkeiten sehen die Kinder in der Verwendung und der Eigenschaft, mit Wasser zusammenzuhalten („zu kleben“); Unterschiede werden bezüglich des Verhaltens beim Trocknen, bei der Härte und der Formbar- keit konstatiert. Auffällig ist, dass viele Kinder das Vorkommen des Sandes aufgreifen, wobei der

Sand für sie augenscheinlich direkt in Verbindung mit Strand steht. So wird bei zwei Gruppen Sand als Bestandteil von Lehm postuliert; als Gegenargument wird interessanterweise in beiden Fällen das Vorkommen angeführt. Beispielsweise wendet Helena ein, dass Lehm in der Erde, Sand hingegen am Strand sei und daher keine Vermischung möglich ist (JAHM - I2-1, 128). Ähnlich wird auch in der Gruppe ALM argumentiert, da Sand nicht unter der Erde vermutet wird (M: *„Also ich glaube eher nicht, weil Sand - wie soll der Sand denn darein kommen? Weil unter der Erde ist doch erst Lehm und nicht Sand.“* (ALM – I2-1, 68)). Die Assoziation zum Strand wird auch von Marian angeführt, woraufhin Niklas weiterführt, dass Sand auch am See vorkommen könne, wo sie ja auch den Lehm gefunden hätten (MLN - I2-1, 106ff). Am Ende des Kurses wird Sand als Bestandteil des Lehms bei allen Gruppen aufgegriffen (in der Gruppe ALM wurde diese Aussage bereits durch den Interviewenden in einem anderen Kontext vorgegeben)

Bewertung Sand wird - basierend auf Erfahrungen wie Strandurlaub oder dem Sand im Sandkasten – mit einer gewissen Menge von Sandkörnern assoziiert, die nicht isoliert auftreten. Sand wird damit nicht als Bezeichnung für ein Korn bestimmter Größe eingesetzt. Auch hier kann das enge Begriffsverständnis als eine Schwierigkeit bei der Erarbeitung der Zusammensetzung von Lehm angesehen werden. Ergänzend sei erwähnt, dass im Zuge der Intervention „Verwitterung“ bei den Kindern die Frage aufkam, woher der Sand komme. Hier zeigte sich – ähnlich wie beim Ton – dass einige Kinder der Auffassung waren, Sand müsse käuflich erworben werden. Dies wurde auch für den Sand am Strand postuliert.

Zusammenfassung

- Die Beziehung zwischen Sand und Lehm wird zunächst in erster Linie in ähnlichen Eigenschaften gesehen. Am Ende des Kurses wird Sand als ein Bestandteil von Lehm genannt.
- Die Vorkommen von Sand bzw. Lehm unterscheiden sich in den Augen der Kinder, was für sie gegen Sand als Bestandteil von Lehm spricht. Sand geht dabei vermutlich mit einer Vielzahl von Sandkörnern einher.

Begriff Boden

Tabelle 6.5.: Kategorien zum Begriff Boden

Kategorie	Interview I2-1 (<i>cm1</i>)	Interview I2-6 (<i>cm2</i>)
Lehm ist im Boden/Lehm kommt aus dem Boden (aber Lehm \neq Boden)	ALM, DIN, JAHM	JAHM
Lehm ist Boden		DIN
Zweidimensionale Oberfläche	DIN, JAHM	DIN

Die Kategorien zum Begriff Boden (vgl. Tabelle 6.5), zeigen, dass die Kinder hiermit häufig eine zweidimensionale Oberfläche (Erdoberfläche, Fußboden) sehen. Teilweise wird der Boden zwar als Schicht angesehen, der Lehm ist dann aber ein Zusatz im Boden und bildet diesen nicht. Nur in einem Interview (DIN I2-6) wird auch von „Lehmboden“ gesprochen. Die Konzepte unterscheiden sich zu Beginn und am Ende des Kurses kaum.

Bewertung Die Äußerungen der Kinder während der Erarbeitung des *concept maps* deuten auf Vorstellungen hin, die sich mit in Kapitel 2.3.4 beschriebenen Forschungsergebnissen decken, wonach Boden häufig als Oberfläche und seltener als Schicht begriffen wird. Weiterhin wird Lehm teilweise nicht als Bestandteil des Bodens begriffen, sondern vielmehr als Zusatz – auch dieses Phänomen wurde für andere Bodenbestandteile (z.B. Steine) bereits beschrieben (Russell et al., 1993, 73ff). Ergänzend sei an dieser Stelle auf weitere Ergebnisse dieser Arbeit verwiesen, wonach Lehm von den Kindern häufig als kontinuierliche Masse aufgefasst wird (vgl. Kapitel 5.3.3, 6.3.4, 6.3.5), was vor dem Hintergrund, dass Boden häufig als homogene Substanz postuliert wird (vgl. Kapitel 2.3.4), wenig verwunderlich erscheint.

Zusammenfassende Bewertung des *concept maps*

Die Äußerungen, welche im Verlauf der Bearbeitung des *concept maps* aufgezeichnet wurden, zeigen zum einen, inwiefern die Kinder Zusammenhänge zwischen den einzelnen Begriffen und Lehm sehen, zum anderen offenbaren sich teilweise Aussagen über die Konzepte zu den jeweiligen Begriffen. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Kinder vielfältige Assoziationen zu den einzelnen Begriffen mitbringen. Hier wird offensichtlich, dass viele dieser Assoziationen – wie bereits in den unter Kapitel 2.3.4 aufgeführten Veröffentlichungen beschrieben – durch die Alltagssprache geprägt sind und häufig nicht der geowissenschaftlichen Definition entsprechen. Weiterhin können einige Vorstellungen aufgedeckt werden, welche als lernhinderlich eingestuft werden können, wie beispielsweise die örtliche Beschränkung des Sandvorkommens.

Die Abgrenzung der Begriffe (hier insbesondere Sand, Steine und Ton) zum Oberbegriff „Lehm“

erfolgt zumeist über eine Beschreibung gleicher oder unterschiedlicher Eigenschaften. Die Kinder klassifizieren die Stoffe demnach zunächst über ihre Eigenschaften, was im Sinne chemischen Lernens positiv zu bewerten ist. Dass sich die Wahl der Adjektive möglicherweise unterschiedlich auf die Konzepterweiterung bezüglich der Formbarkeit von Lehm auswirkt, wird im folgenden Kapitel (Ergebnisse der Feinanalyse) näher beleuchtet. Beziehungen zwischen dem Aufbau bzw. der Zusammensetzung der Stoffe werden, wenn überhaupt, zumeist erst am Ende des Kurses aufgestellt.

6.3. Ergebnisse der Feinanalyse

In einem weiteren Schritt konnten durch die Feinanalyse weitere, für die Rekonstruktion des Lerngegenstandes relevante Aspekte herausgearbeitet werden. Diese wurden durch eine Untersuchung der qualitativen Unterschiede innerhalb von Subkategorien, der Analyse von Zusammenhängen zwischen einzelnen Kategorien sowie dem Vergleich der Äußerungen zu unterschiedlichen Erhebungszeitpunkten nach dem in Kapitel 5.3.2 beschriebenen Vorgehen aufgedeckt. In die Analyse flossen somit die Daten beider Kurse ein. Konkret lassen sich diese Erkenntnisse unter folgenden Stichpunkten zusammenfassen:

- a) Die Ausbaufähigkeit intuitiver Konzepte
- b) Die Phänomenabhängigkeit der Deutung
- c) Der Beitrag des *teaching experiments* zur Konzepterweiterung/-änderung
- d) Die Bedeutung der Gefügebene
- e) Auftretende Schwierigkeiten und Fehlvorstellungen

Im Folgenden sollen die einzelnen Punkte konkretisiert und anhand von Beispielen expliziert werden. Zudem wird jeweils eine erste Bewertung der Befunde aus fachwissenschaftlicher und/oder fachdidaktischer Sicht gegeben.

6.3.1. Die Ausbaufähigkeit intuitiver Konzepte

Es fällt auf, dass einige der zu Beginn bei den Kindern vorhandenen Konzepte stärker erweitert werden können als andere. Konkret werden hier zwei Faktoren angeführt: die qualitativen Unterschiede innerhalb der Subkategorie „Eigenschaften: Lehm“ sowie die Bedeutung des Einbezuges der Sand-Bestandteile zu Beginn des Kurses für die weitere Konzeptentwicklung.

Wie die kategoriengestützte Analyse zeigt, begründen die Kinder die Werkstoffeigenschaft der plastischen Verformbarkeit häufig über andere Eigenschaften, welche sie dem Material zuschreiben. Diese Adjektive sind im Wesentlichen: matschig, pampig, hart/weich, stabil und klebrig. Bei der detaillierteren Analyse der Interviews unter Zuhilfenahme der *summaries* zeigt sich, dass einige der gewählten Adjektive einen Aufbau chemisch anschlussfähiger Konzepte stärker

zu begünstigen scheinen als andere. Besonders deutlich wird dies im Falle der Eigenschaftszuschreibung „klebrig“. Kinder, die dieses Adjektiv wählten, konnten bei der letzten Befragung ihr Konzept zumeist erweitern und das „Kleben“ des Lehms genauer begründen.

Beispielsweise begründen Dominik und Nico die plastische Eigenschaft über die Klebrigkeit (Dominik) und die Stabilität (Nico). Während sie im ersten Interview zur Formbarkeit (I1-4) diese Eigenschaften nicht genauer begründen können, erkennt Nico im späteren Interview (I1-5), dass Lehm und Wasser interagieren müssen, um eine Art Kleber zu ergeben (s. u.). Der ausschlaggebende Faktor für die Klebrigkeit ist demnach das Wasser, welches in den vorherigen Argumentationen für ihn keine Rolle spielte.³⁴

DN-I1-4, 33

I: Und warum habt ihr jetzt den Lehm genommen? Warum meint ihr das geht nur mit Lehm?

D: Weil der besser klebt.

I: Mhm.

N: Weil der stabiler ist.

I: Ja.

D: Und mehr klebt.

N: Ja.

,50

I: Und du sagtest eben, der Lehm ist so stabil. Was macht ihn denn so stabil?

N: Was macht ihn so stabil?

D: Keine Ahnung. (unv.)

N: Keine Ahnung. Nein.

,62

I: Warum ist er denn klebriger als der Sand hier?

D: Keine Ahnung.

DN-I1-5, 137

I2: Und warum klebt Lehm? Du hast ja eben gesagt, er klebt.

N: Wegen dem Wasser da drin.

I2: Und das Wasser klebt?

N: Ja das mischt sich dann so mit dem Lehm zusammen. Und das gibt dann so eigentlich wie so ein Kleber.

Die Bestandteile des Lehms sind für Nico jedoch auch am Ende nicht von Bedeutung; Lehm scheint auch hier eher als eine kontinuierliche Masse aufgefasst zu werden. Beide Kinder begründen auch im letzten Interview weiterhin mit den bereits zu Beginn gewählten Adjektiven stabil und klebrig; zwar nennt Nico „kleine Kristalle“ (DN - I1-5, 151) als Bestandteile des Lehms, misst diesen augenscheinlich aber keine Bedeutung für die Formbarkeit zu.

Kinder, die ihre Konzepte auch hinsichtlich der Bestandteile des Lehms erweitern können, verwenden nicht nur das Kleben zur Beschreibung des Lehms, sondern richten ihre Aufmerksamkeit

³⁴Das Wasser wurde von Nico in den vorherigen Interviews nur auf konkrete Nachfrage hin erwähnt.

zu Beginn der Kurse auch auf die Bestandteile des Sandes: Johannes beschreibt den Lehm zu Beginn als klebrig und spricht von einem Klebstoff, den der Lehm beinhalte, um andere Materialien zu verbinden. Bezogen auf Sand macht er das Wasser für die Haftung verantwortlich (DJ - I1-4, 98). Zudem sieht er beim Sand die darin enthaltenen Steine als ursächlich für die schlechtere Formbarkeit an (s. u.).³⁵ Später klassifiziert er diesen Klebstoff als den Ton, den der Lehm enthalte und argumentiert über die Bestandteile bzw. Stoffe, die der Lehm enthalte (s. u.). Den Ton beschreibt er als „mikroskopisch kleine Dinger, die im Lehm sind“ (DJ-I1-5, 45).

DJ-I1-2, 43

I: Warum kann das- geht das jetzt mit dem Lehm so gut? Das andere wie ging das?

Ging das-

J: Weil das klebrig ist.

,176

I: Mh. Und beim Sand?

J: Beim Sand, den kann man nicht formen, weil die Steine dann nicht aneinander haften.

DJ-I1-5, 117

I: Und warum geht das jetzt beim Lehm so viel besser als mit dem Sand?

D: Weil der Sand sofort auseinander fällt.// J: Weil der Sand keine Haftdinger hat. Der bleibt nicht haften.

D: Der fällt sofort auseinander// J: Die Steine (?)

I: Was meinst du denn mit Haftdingern, Johannes? (..) Welche Haftdinger hat der Lehm?

J: Naja, feste Sachen. (...). Ja, Ton ist fest

[. . .]

I: Aber Sand ist doch auch fest, oder?

J: Ja, aber das haftet nicht. Hat keine Klebstoffe.

[. . .]

I: Und was sind das für Klebstoffe?

J: Ton. Und etwas Erde.

Dem Wasser wird von Johannes und Dennis bereits zu Beginn eine Funktion zugesprochen (*J: Weil die Feuchtigkeit den Halt gibt* (DJ - I1-4, 153)); hier erfolgt bei dem letzten Interview keine Konkretisierung. Die Beispiele verdeutlichen, dass zu Beginn das Wasser, später der Ton als „Klebstoff“ im Lehm identifiziert wird. Damit sind Johannes zwei Faktoren, die Bestandteile

³⁵Inwiefern Johannes die Steine als alleinige Bestandteile des Sandes oder als Zusatz betrachtet, wurde im Rahmen der explizierenden Analyse zu klären versucht. Es scheint, als bestünde für ihn der grobe Sand aus Steinen – erst auf Nachfrage hin bezeichnet er den feinen Sand auch als aus noch kleineren Steinen bestehend.

des Lehms und das Wasser, bewusst.

Moritz, der insgesamt über viel Vorwissen verfügt, führt beide der in den zuvor genannten Fällen angeführten Zusammenhänge (Wasser bzw. Ton als Klebstoff) an und kann diese auch verknüpfen. Zu Beginn begründet auch er mit der Eigenschaft des Klebens (I2-2) und grenzt den Lehm dadurch vom Sand ab. Beim Sand hingegen bezieht er die Sandkörner mit ein und sagt, diese können nicht zusammenhalten. Ohne den Impuls „feinen Sand“ einzusetzen (dieser erfolgte im zweiten Kurs erst später) bezieht er diesen von sich aus mit ein, indem er den „Sandkastensand“ (JAHM I2-2, 51, 77) welchen er von zu Hause aus kennt, erwähnt und nennt dessen günstigeres Verhalten gegenüber dem Wasser aufgrund der geringeren Korngröße sogar als Grund für die bessere Formbarkeit (s. u.).

In den weiteren Interviews kann Moritz sein Konzept stetig ausbauen. Im letzten Interview – in Bezug auf den Begriff „Klebstoff“ beim *concept map* – beschreibt er das Kleben auf unterschiedlichen Ebenen. Zunächst bezieht er den Begriff auf Lehmklumpen, welche zusammenkleben, wobei er bereits betont, dass diese nass sein müssen. Anschließend wechselt er zu den einzelnen Schluffteilchen, welche seines Erachtens aneinander haften; schließlich bezieht er (auf Nachfrage) das Wasser in seine Argumentation mit ein. Er sieht somit beide Faktoren – einzelne Bestandteile des Lehms und das Wasser als ursächlich für die Eigenschaft des Klebens bzw. der Formbarkeit an.

JAHM - I2-2, 32

M: Mit dem Sand hat nichts gebracht. (Ada knetet und versucht aus Lehm zu formen.)

M: Auch mit Wasser. Das klebt einfach nicht.

,132

I: Mhm. (...) Warum könnte das so sein?

M: Der Lehm klebt ja auch. Also, der Lehm, wenn man den jetzt Lehm und Lehm aneinander, dann klebt der Lehm. Aber Sand nicht.

,49

M: Der Sand, der saugt das Wasser nicht ein.

I: (Aber welcher Sand?) saugt das Wasser denn ein?

M: Der Sand aus dem Sandkasten.

I: Und was ist in dem Sandkastensand anders?

M: Das ist eher weißer Sand. Nicht so Körnchen, so große. Das ist ganz feiner Sand manchmal.

JAHM - I2-6, 76

M: Klebstoff kann aber auch schon ein bisschen sein, weil wenn ich jetzt zwei Lehm -

6. Ergebnisse

nasse Lehm, dann nehme ich jetzt einen Klumpen vom nassen Lehm und mache nur ganz leicht auf den anderen Lehmklumpen und dann klebt das schon.

,83

I: Der Moritz hat gerade gesagt, wenn man zwei Lehmstücke nimmt und die aufeinander tut, dann bleiben die aneinander kleben. Und was klebt dann da?

M: Der Schluff und der Ton?

,87

I: Würden die denn auch kleben wenn der Lehm trocken wär? Wenn ich zwei trockene Lehmklumpen nehme.

M: Nein, weil das Wasser raus ist. Das Wasser hilft sozusagen beim Tragen.

I: Das Wasser hilft beim Tragen, okay.

M: Also das Wasser hilft zum Zusammenkleben.

Niklas stellt zwar das Kleben nicht in den Mittelpunkt (er äußert lediglich, dass Lehm an der Haut klebt und führt in diesem Zuge Wasser als notwendiges Kriterium an (MLN - I2-1, 84)), fokussiert aber zu Beginn sehr stark auf die Bestandteile des Sandes. Außerdem spricht er bereits in dem zweiten Interview (I2-2) dem Wasser eine Funktion zu, sowohl für die Formbarkeit des Sandes als auch für die des Lehms. Als Bestandteile des Sandes nennt er kleine Partikel bzw. Teilchen, deren Existenz er als hinreichend für den schlechten Zusammenhalt des Sandes ansieht (s. auch unter 6.3.3). Am Ende werden die Faktoren Ton, Schluff und Wasser nacheinander von den Gruppenmitgliedern als „Klebstoff“ im Lehm angeführt. Auf eine kurze Frage nach den Gründen für die geringere Formbarkeit des Sandes nennt er zunächst dessen Größe (vermutlich also die Größe der Bestandteile).

MLN - I2-2, 24

N: Also Lehm, also oder Sand hat kleine Teilchen, also kleine Partikel, also die können nicht so richtig fest werden. Aber durch das Wasser kann das wenigstens so ein bisschen Stand halten. Und (unv.)

,57

I: Jetzt habt ihr ja auch zu dem Sand auch Wasser zugetan. Warum?

N: Weil ohne würde das gar nicht gehen. Dann würde das vielleicht einen Haufen geben, aber das würde alles wieder runterlaufen. Und mit dem Wasser gibt das irgendwie so-//

[. . .]

I: Was macht denn das Wasser?

N: Das tut irgendwie die Teile zueinander bringen und festhalten, dass das so ein bisschen - (...)

,82

I: Jetzt ist es wieder formbar.

N: Das lässt sich dann so formen, weil die Feuchtigkeit, die irgendwie entzieht die die Härte. Kann man so sagen.

MLN - I2-6, 118

L: Ich würde noch Klebstoff dabei tun, weil Lehm klebt ja auch, ein bisschen. Aber nur ein ganz kleines bisschen. [...] L: Der Ton eigentlich. I: Der Ton. M: Der Schluff. N: Das Wasser.

,32

I: Man tut Wasser dazu; geht das denn mit Sand zum Beispiel auch so gut? N: Nee. (alle schütteln den Kopf) Mit Sand - weil das auch so größer ist.

Bewertung aus fachwissenschaftlicher bzw. fachdidaktischer Sicht

Dem Kleben liegt allgemein das Prinzip der Adhäsion zugrunde. Ein Klebstoff ist nach DIN EN 923 definiert als ein „nichtmetallischer Stoff, der Füge­teile durch Flächenhaftung und innere Festigkeit (Adhäsion und Kohäsion) verbinden kann“ (Habenicht, 2009, 3). Die demnach für das Kleben wichtigen Adhäsions- und Kohäsionskräfte sind auch wichtige Faktoren in Bezug auf die Formbarkeit des Lehms. Auf der einen Seite haften die einzelnen Tonminerale untereinander ebenso wie die Wassermoleküle über Wasserstoffbrücken aneinander (Kohäsion), andererseits halten Tonminerale und Wassermoleküle über Wasserstoffbrücken oder elektrostatische Wechselwirkungen zusammen (Adhäsion) (vgl. Kapitel 3.2.2). Damit werden beide Kräfte benötigt, um das Kleben zu bewirken. Die Fokussierung des „Klebens“ scheint also bereits anzudeuten, dass die Kinder die Wechselwirkung zwischen fester und flüssiger Materie als bedeutsam für die Formbarkeit erachten. Dieses Konzept wird somit auch aus fachwissenschaftlicher Sicht als anschlussfähig erachtet.

Der Einbezug der Bestandteile des Sandes in den ersten Interviews zur Formbarkeit führt wie beschrieben bei vielen Kindern zu einer Weiterentwicklung der Konzepte hinsichtlich der Bestandteile des Lehms. Möglicherweise ist dies darauf zurückzuführen, dass diese Kinder bereits zu Beginn intuitiv die Ursache für die Eigenschaften eines Stoffes in dessen Zusammensetzung oder Aufbau sehen. Die Kinder führen also, im Sinne des Struktur-Eigenschaftskonzeptes (s. Kapitel 4.3.2), die Eigenschaften des Stoffes Sand bereits auf dessen Zusammensetzung – dessen Struktur – zurück. In diesem Fall ist die Struktur des Sandes („körnig“) bzw. dessen Bestandteile („Steine“) hinderlich für das Formen, während Lehm, dem keine partikuläre Struktur zugebilligt wird, eine hohe Plastizität aufweist. Auch wenn diese Kinder zu Beginn den Lehm häufig als eine „Masse“ ansehen, nutzen sie ihr im Kurs erworbenes Wissen zu den Bestandteilen des Lehms aber, um anschließend die Plastizität des Werkstoffes ebenfalls über dessen Zusammensetzung zu begründen. Damit wird auch die Vorstellung „partikulär → nicht formbar“ revidiert.

Dass generell eher die Bestandteile des Sandes als die des Lehmes von den Kindern angeführt werden, lässt sich auch mit Bezug auf chemiedidaktische Forschungsergebnisse erklären. Studien zur Teilchenvorstellung bei Schüler_innen zeigen, dass körnigen oder pulvrigen Materialien eher eine Teilchenstruktur zugeschrieben wird als dies beispielsweise bei festen Stoffen der Fall ist (vgl. z.B. Nakhleh et al., 2005, 606, 608). Diese Erkenntnisse sind auf die Makroebene übertragbar: bei dem körnigen Sand werden die Bestandteile als bedeutsam erachtet, wohingegen diese (zu Beginn) beim Lehm keine Rolle spielen und vermutlich gar nicht wahrgenommen bzw. einzelne

Teilchen nicht vermutet werden.

6.3.2. Die Phänomenabhängigkeit der Deutung

Bereits die zuvor beschriebenen Ergebnisse zeigen verschiedenartige Begründungen für die Formbarkeit der beiden Bodenarten Lehm und Sand. Aber nicht nur in Bezug auf verschiedene Stoffe werden jeweils unterschiedliche Erklärungsansätze gewählt. Einige der interviewten Kinder, die den Bestandteilen des Lehms keine Bedeutung für die Formbarkeit zuschreiben, ziehen diese aber zur Erklärung anderer Phänomene hinzu. Ob die Struktur des Stoffes Lehm für dessen Eigenschaften aus Sicht der Kinder relevant ist, hängt daher mit dem betrachteten Phänomen zusammen.

Beispielsweise scheint Constantin die Bestandteile des Lehms für die Formbarkeit als nicht relevant zu erachten; zumindest zieht er sie auch am Ende des Kurses nicht zur Begründung hinzu. Vielmehr begründet er über „spezielle Fähigkeiten“, die der Lehm besitze. Im letzten Interview erinnert er sich aber auch an ein Experiment zum Wasseraufnahmevermögen, bei welchem er beobachtete, dass Lehm deutlich mehr Wasser aufnehmen kann als Sand. Seine Erklärung für dieses Phänomen zielt auf die unterschiedliche Zusammensetzung von Sand und Lehm; zudem nennt er auf Nachfrage Ton als wichtigen Faktor:

MC - I1-5, 33-57

C: Zum Beispiel das mit dem Wasser abkippen. Als wir da Wasser reingekippt haben und eine Stunde gewartet haben und dann es wieder rausgenommen.

I: Ah, und was habt ihr da gesehen?

C: Dass der Lehm oder der Sand- der Lehm sehr viel Wasser aufgenommen hatte.

I: Mhm.

M: Und die Erde, nein, der Lehm- und das der Sand nicht so viel aufgenommen hatte.

I: Wisst ihr denn noch- .Wieso kann denn der Sand nicht so viel Wasser aufnehmen wie der Lehm?

M: Weil, das sind ja nur so einzelne Mini-Steinchen.

C:Ja, das sind so etwas Steine und der Lehm lässt dann mehr durch.

M: Weil der-

C: Er ist zwar nicht wasserdurchlässig, aber trotzdem kann- der saugt Wasser auf.

I: Mhm//C: Das macht Sand nicht.

I: Hm, und wie kommt das?

C: Mh//I: Dass der das besser aufsaugt als der Sand.

C: Ähm, wahrscheinlich wegen der Stoffe, die da drin sind.

I: Mh, was sind denn da für Stoffe drin?

L: Ich denke mal so besondere Erde, Ton; ganz kleine Tonteile.

[. . .]

I: Wie macht der Ton das denn, dass der Lehm das Wasser aufsaugt?

L: Mh, ich denke mal der hat so eine ja - ja eine spezielle Fähigkeit, die das erlaubt.

Im letzten Satz greift er aber auch wieder auf die Begründung zurück, welche er für die Formbarkeit anführt: Lehm (Ton) hat eine „spezielle Fähigkeit“ oder im Falle der Formbarkeit auch eine „Beständigkeit“. Obwohl Constantin die Zusammensetzung des Lehms zumindest teilweise

also bewusst ist (vgl. auch MC - I1-5, 63-64: „*Also Lehm ist ein- ist ein Stoff, der aus kleinen Tonkristallen besteht*“), sieht er diese für die Plastizität nicht als relevant an – allerdings gilt dies nicht zwangsläufig für die Erklärungskonzepte anderer Eigenschaften.

Andererseits gibt es aber auch ein Beispiel, bei welchem konsequent mit Bestandteilen argumentiert wird. So führt Niklas im letzten Interview sowohl die gute Formbarkeit als auch das hohe Wasseraufnahmevermögen und die geringe Wasserdurchlässigkeit auf die Korngröße der Bestandteile des Lehms zurück.

MLN - I2-4, 194-195

I: Guckt euch das nochmal an. Woran könnte das liegen, dass das (*Schluff und Ton*) besonders gut geht, das (*Kies*) besonders schlecht.

N: Weil das hier (*Schluff und Ton*) kleiner ist. So feiner und das (*Kies*) sind große. Die Steine können ja gar nicht richtig halten, weil (unv.) aneinander sind. Das wird so schwer. Und das Wasser kann ja eigentlich gar nichts ausrichten. Bei dem hier (*Schluff und Ton*) wird das alles feucht, das wird klebriger und kann Stand halten oder so.

MLN - I2-6 ,71

I: Auf unserem Teich dahinten, da ist auch unten Lehm. Was wäre denn, wenn auf unserem Boden da kein Lehm sondern Sand wäre?

[. . .]

N: Das fließt wieder raus, weil der Sand ist ja etwas grober und da sind immer wieder Lücken zwischen, wo das Wasser rausfließen kann. Und Wasser ist ja richtig; so ganz kleine Partikelchen sind das ja. // I: Ahso, das-// N: also flüssig.

I: Und beim Lehm, wie ist das da?

N: Lehm ist, ich glaube dicht wie Knete.

L: Aber auch nur wenn man es gebrannt hat.

N: Ich glaub auch wenn man das nicht gebrannt hat, dann ist das glaube ich auch dicht. (.)

[. . .]

I: Ja, ihr habt beide ein bisschen recht. Wie ist das? Du hattest ja richtig gesagt, beim Sand sind ganz viele Lücken, da fließt das Wasser durch. Und beim Lehm?

N: Nicht. Eigentlich.

I: Warum sind da weniger Lücken?

N: Weil Ton ist ja auch klein und da wird das ja alles so zusammen; Ton schließt ja die Lücken zum Sand. //L: Sand, Ton und Schluff, das ist ja alles zusammen; dann ist das halt alles mehr zusammen.//N :Und Ton und Schluff kann ja auch die Lücken vom Sand schließen.

Im Zuge der Explikation fällt eine weitere Erklärung auf, welche Nico beim gemeinsamen Experimentieren zum Versuch des unterschiedlichen Wasseraufnahmevermögens anführt:³⁶ N: „*Da ist der Lehm drin und der ist dünner – also kleiner, kleinere Partikelchen, die sich zusammensetzen. So geht das Wasser zwar in die Partikelchen rein, aber(.) nicht außenrum hier unten (zeigt auf Becherglas) rein. Und beim Sand sind das so größere Teilchen, deswegen werden dazwischen immer so Lückchen gefunden, wo das Wasser durchfließen kann.*“.

³⁶Das gemeinsame Experimentieren wurde zwar aufgezeichnet, jedoch nicht transkribiert und nur zur Explikation verwendet (s. S. 49).

Niklas scheint demnach die Eigenschaften des Lehms generell auf dessen Struktur bzw. Bestandteile zurückzuführen, was bereits in der Interpretation unter Abschnitt 6.3.1, als „intuitives Struktur-Eigenschaftskonzept“ bezeichnet wurde.

Es fällt auf, dass während des Experimentes zum Wasseraufnahmevermögen in allen Gruppen mit den Bestandteilen argumentiert wird, wobei Niklas am deutlichsten die unterschiedliche Größe der einzelnen Partikel hervorhebt. Hierbei muss bedacht werden, dass das Experiment im Anschluss an das *teaching experiment* durchgeführt wurde, was auch einen Grund darstellen könnte, dass die Bestandteile und die Korngröße den Kindern präsent waren. Die aufgezeigten Ergebnisse weisen darauf hin, dass Versuche zum Wasseraufnahmevermögen zu einem Nachdenken über die Bestandteile der Stoffe anregen können.

Bewertung aus fachwissenschaftlicher bzw. fachdidaktischer Sicht

Ähnlich wie in der hier vorliegenden Untersuchung ist in der chemiedidaktischen Literatur häufig beschrieben worden, dass Schüler_innen insbesondere in Bezug auf das Materiekonzept nicht konsequent argumentieren, sondern je nach vorliegendem Phänomen/Stoff unterschiedliche Konzepte auftreten. So zeigen beispielsweise Renström et al. (1990), dass Jugendliche (13-16 J.) je nach präsentem Stoff (z.B. Kochsalz, Wasser, Holz, Öl, Luft) Teilchenvorstellungen unterschiedlichen Niveaus oder lediglich Kontinuumsvorstellungen äußern. Nur einer der 20 an der qualitativen Studie teilnehmenden Schüler_innen argumentiert dabei konsequent mit dem Teilchenkonzept. Die Autoren konstatieren: „After all, the understanding of matter is always an understanding of matter in a particular context and hence the differing understanding observed should be seen as relations between individual and phenomenon.“ (ebd., S. 567). Nakhleh et al. (2005) zeigten in einer Studie mit Mittelstufenschüler_innen, dass auch bezogen auf Eigenschaften unterschiedlich argumentiert wird. So wird beispielsweise bei der Erklärung von Löslichkeitsprozessen eher auf Teilchenmodelle zurückgegriffen als dies bezogen auf das unterschiedliche Fließverhalten von Stoffen oder deren Formbarkeit der Fall ist. Keine_r der befragten Schüler_innen verfügte über eine rein makroskopische oder submikroskopische Auffassung.

In der hier vorliegenden Studie scheint die Zusammensetzung des Lehms für manche Kinder in Bezug auf einige zu erklärende Phänomene von Bedeutung, während bei anderen Lehm wiederum eher als ein einheitlicher, kontinuierlicher Stoff aufgefasst wird. Die Konsequenzen, die sich für den Lerngegenstand aus dieser Beobachtung ableiten lassen, werden in Kapitel 7 diskutiert.

6.3.3. Der Beitrag des teaching experiments zur Konzepterweiterung/-änderung

Das *teaching experiment* zur Formbarkeit von Bodenarten unterschiedlicher Korngrößen stellt einen ersten Ansatz dar, um sowohl vorhandene Konzepte zu eruieren und deren Entwicklung nachvollziehen zu können, als auch durch eine gezielte Intervention eine Konzepterweiterung zu ermöglichen. An dieser Stelle soll näher analysiert werden, inwiefern durch die Auswertung

der Interviews I2-4 Rückschlüsse auf Konzeptentwicklungen gezogen werden können. Die Daten stammen ausschließlich aus dem zweiten Kurs, da das *teaching experiment* im ersten so nicht durchgeführt wurde.

Wie bereits durch die Ergebnisse des ersten Analyseschrittes (Kapitel 6.1) angedeutet, konnten in allen vier Gruppen Kinder ihre Konzepte – ausgehend von und aufbauend auf ihren vorherigen Vorstellungen – im Laufe des *teaching experiments* erweitern. Der Hauptfokus des *teaching experiments* lag auf dem die Formbarkeit beeinflussenden Faktor „Teilchengröße“. Die kategorienbasierte Auswertung (vgl. Kapitel 6.1) zeigt bereits, dass deutlich mehr Aussagen mit Bezug zur Teilchengröße erkennbar sind, als dies in den übrigen Interviews der Fall ist. Bis auf die Gruppe DIN werden in allen Gruppen sowohl die Bestandteile des Lehms als auch der Zusammenhang zur Teilchengröße aufgegriffen. Auch ein allgemeiner Zusammenhang von Teilchengröße und Formbarkeit wird formuliert, auch wenn hierbei unterschiedlich stark durch den Interviewenden angeleitet werden muss:

JAHM - I2-4 , 83

I: Was würdet ihr denn sagen? Ihr hattet jetzt gesagt, das kann man gar nicht formen (*Kies*), das geht so ein bisschen (*grober Sand*), das geht noch besser (*feiner Sand*) und das geht am allerbesten (*Ton*). Warum denn? Moritz, warum denn?

M: Weil das Größte da sind auch immer ganz viele Löcher drin, das fällt dann immer leichter auseinander.

I: Aha.

M: Umso feiner, umso besser.

MLN - I2-4, 194

I: Guckt euch das nochmal an. Woran könnte das liegen, dass das (*Schluff und Ton*) besonders gut geht, das (*Kies*) besonders schlecht.

N: Weil das hier (*Schluff und Ton*) kleiner ist. So feiner und das (*Kies*) sind große. Die Steine können ja gar nicht richtig halten, weil (unv.) aneinander sind. Das wird so schwer. Und das Wasser kann ja eigentlich gar nichts ausrichten. Bei dem hier (*Schluff und Ton*) wird das alles feucht, das wird klebriger und kann Stand halten oder so.

ALM - I2-4, 74

I: Also wovon hängt das ab wie gut sich das formen lässt?

M: Wie klein.

A: Wie klein, aus was das besteht und - //M. (Wie groß es ist?)

I: und, je kleiner es ist, desto?

A: Besser

M: Kann man es kneten.

Weiterhin zeigte bereits die kategorienbasierte Auswertung, dass „Wasser“ vermehrt aufgegriffen wird (vgl. Abbildung 6.2, S. 92). So beziehen die Kinder der Gruppe ALM dieses zum ersten Mal überhaupt in die Argumentation mit ein, bei MLN, die das Wasser in den vorherigen Interviews bereits erwähnen, wird nun näher auf die Wechselwirkungen mit dem jeweiligen Material eingegangen (s.o., MLN - I2-4, 194). Durch die Verwendung der getrockneten Proben wird das

Wasser vermutlich stärker in den Blickpunkt gerückt.

Die Kinder argumentieren natürlich immer vor dem Hintergrund ihrer zuvor formulierten Konzepte und können diese dementsprechend unterschiedlich ausbauen. Beispielsweise stellt Moritz, der bereits in den Interviews zuvor die Zusammensetzung und die Teilchengröße in Bezug auf Sand aufgriff (s. S. 108), in diesem Interview direkt einen allgemeinen Zusammenhang zwischen Korngröße und Formbarkeit her (s. Zitat S. 114) und beschreibt zudem im Verlauf des Interviews die Beziehung zwischen den einzelnen Bestandteilen und Lehm als Kohärengefüge:

JAHM - I2-4 ,105

M: Ich glaube die feineren Teilchen, die setzen sich zu dem großen Teil zusammen.

I: Aha.

M: Und dann kann man das formen. Das ist genau als wenn ich das (unv.) (*zeigt in Richtung des Ton-Schälchens*) mit Wasser, ist das das gleiche wie das hier (*trockener Lehmklumpen*). Nur das ist jetzt trocken.

Demgegenüber entwickeln Anja und Maja ein Konzept, wonach Lehm und Ton als Prototyp der guten Formbarkeit aufgefasst wird. Zuvor argumentierten sie vorrangig auf der Gefügeebe (*„[Im] Sand sind viele einzelne Körner. Im Gegenteil zu Lehm“* (ALM – I2-2, 31). Jetzt stellen sie jeweils einen Vergleich der Stoffe zu dem ihnen vertrauten Lehm an und beurteilen so deren Formbarkeit (je nachdem wieviel es *„damit zu tun hat“*). Auch im letzten Interview behalten sie ihre im *teaching experiment* erstmals auftretende Argumentation bei:

ALM - I2-4 ,44

I: Und warum habt ihr euch so entschieden?

A: Weil, wie ich ja eben gesagt habe, weil man hiermit (Kies) (unv.) //M: Und weil es am wenigsten damit zu tun hat.

A: Weil wenn ich da jetzt Wasser reintun würde, dann wäre das eher Wasser mit Steinchen. Und damit kann ich nicht formen. Und umso matschiger, umso mehr formen. [...] Und hier das bröckelt auseinander (*grober Sand*), so Bröckel-Sand.

L: Wir haben ja mal so einen Schneemann gemacht // M: Da wo das klebrig ist und hängenbleibt. //A: Da (*feiner Sand*) wird das glaube ich auch so klebrig weil das selbst so ganz fein ist. Und hier (*Ton*) würde es eher gehen, und weil da ja auch Schluff, und in Lehm ist ja auch Schluff und Ton drin und deswegen würde das damit gehen.

ALM - I2-6 ,211

I: Also, wenn ich Lehm habe, in dem ganz viel Sand, aber nur wenig von Ton ist, also viel von den großen Teilen und wenig von den kleinen.

A: Weil, wenn da viel Sand - Sand kann man ja nicht gut drücken, kneten. Wenn da so viel Sand ist und wenig Ton und da Wasser und so zutut, dann kann man den nicht so richtig gut kneten, weil Sand sind diese Körner und die kann man nicht so gut kneten mit Wasser, haben wir schon ausprobiert. Und Ton kann man richtig kneten und wenn da nur Sand ist und nur ein bisschen Ton, dann kann man das vielleicht ein bisschen kneten, aber wird immer auseinanderfallen halt.

Sie rücken dabei die Zusammensetzung auf Ebene der Bestandteile Ton und Schluff zwar in

den Vordergrund - die Korngröße ist dabei jedoch weniger von Belang. Den allgemeinen Zusammenhang zur Korngröße stellen sie auch her, benötigen dazu aber gezielter Anleitung (s.o.). Grund hierfür ist vermutlich, dass sich ihr Konzept als nützlich und für die Argumentation sinnvoll erweist.

Ilja, der bei dem Vergleich der Formbarkeit von Lehm und Sand über die Eigenschaften der Steinchen argumentiert, welche in trockenem Zustand überhaupt nicht aneinander haften, sieht schließlich beim *teaching experiment* den relevanten Unterschied zwischen den Sanden in der Korngröße. Seine Interviewpartnerin Nora hingegen, die zu Beginn andere Eigenschaften zur Begründung hinzuzieht (weich/hart), äußert dies schließlich nur wiederholend und mit starker Anleitung des Interviewers:

DIN - I2-6: 51

D: Oh, mit dem Sand (*grober Sand*) ist es schwer.

I: Mit dem Sand ist schwer. Warum ist das schwer mit dem Sand, Dustin? (..)

IL: Das ist auch Sand (*feiner Sand*).

I: Das ist auch Sand, genau.

IL: Aber das ist - (unv.) Sand, der ist am besten. //N: Der beste Sand der Welt//.

I: //Was ist denn daran besser?//

IL: Der ist kleiner.

,61

I: Was war jetzt der Unterschied noch zwischen dem Sand (*feiner Sand*) -

N: Der ist fein.

I: Der ist fein. Und zum Formen?

N: //Besser//. IL://Besser//

I: Und der? (*grober Sand*)

IL://Schlechter//. N: //Geht so//

I: Das liegt daran- woran? (*Dustin ist die ganze Zeit konzentriert mit einer der Proben beschäftigt*).

N: Weil da //größere Steine sind.//. IL: //Größe!//.

Bewertung aus fachlicher bzw. fachdidaktischer Sicht

Durch das *teaching experiment* sollte den Kindern ein Beispiel für die Bedeutung des Aufbaus eines Stoffes für seine Eigenschaften aufgezeigt werden und dabei der Fokus auf die Korngröße gelegt werden.

Der Zusammenhang zwischen Aufbau und Eigenschaften ist eine für das Lernen chemischer Inhalte zentrale Erkenntnis (vgl. Kapitel 4.3.1). Ebenso wie die Formbarkeit können weitere Eigenschaften des Lehms dazu genutzt werden, diesen Zusammenhang zu verdeutlichen (s. z. B. das Wasseraufnahmevermögen (S. 111)). Die geringe Korngröße der Tonfraktion stellt nur einen Grund für die ausgeprägte Plastizität dar und, wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, tragen weitere Faktoren hierzu bei. Diese beziehen sich insbesondere auf die molekulare Struktur und die dadurch ermöglichten Wechselwirkungen. Auch wenn durch das hier gewählte Vorgehen damit eine Reduktion der fachlichen Grundlagen vorgenommen wird, so stellt die Beziehung zwischen Korngröße und Formbarkeit doch den Ausgangspunkt dar, auf welchem aufbauend weitere Fak-

toren wie der Zusammenhang zur spezifischen Oberfläche und die Wechselwirkungen auf Ebene der Tonminerale erarbeitet werden können. Dies wird ausführlicher in Kapitel 7 diskutiert.

6.3.4. Die Bedeutung der Gefügebene

Wie unter Kapitel 5.3.3 beschrieben, wurde zur Beschreibung einer Argumentationsstruktur der Kinder die Kategorie „Gefügebene“ dem Kategoriensystem hinzugefügt. Kinder, die entsprechend argumentieren, greifen zwar nicht direkt die Bestandteile auf, sondern beschreiben vielmehr den Stoff an sich; rekurren dabei aber indirekt auf die Bestandteile. So implizieren Aussagen wie „das ist alles einzeln“ (ALM-I2-2, 47) bezogen auf Sand oder „da hängt alles zusammen“ bezogen auf Lehm (EL-I1-4, 90) ein Vorhandensein einzelner Bestandteile ohne diese explizit zu benennen. Während beim Sand häufig die Bestandteile als „einzelne Körner“ oder „einzelne Steine“ aufgegriffen werden, steht beim Lehm die Tatsache im Vordergrund, dass „alles zusammenhält“. Die Aussagen deuten dennoch darauf hin, dass es einzelne Bestandteile geben muss, die miteinander verbunden sind. Sie werden daher als Zwischenstufe zwischen einer rein stofflichen Beschreibung („Lehm klebt“), bei welcher Lehm zumeist als kontinuierliche Masse aufgefasst wird, und einer Erklärung über die Bestandteile (bspw. „die Tonteilchen halten zusammen“) angesehen.

Insgesamt wird die Kategorie Gefügebene von sieben der insgesamt 12 Gruppen aus beiden Kursen in mindestens einem Interview aufgegriffen, was als ein Hinweis angesehen werden kann, dass sie für die Kinder ein relativ hohes Erklärungspotential bietet.

Im Folgenden werden die Beschreibungen von Lars sowie von Lennie näher betrachtet, um aufzuzeigen, dass die Gefügebene teilweise Ausgangspunkt der Erklärungen war, in anderen Fällen wiederum erst im Verlauf der Interviews entwickelt wurde.

Lars führt die Formbarkeit zunächst auf die Bestandteile des Sandes und deren Korngröße zurück (eine „günstige“ Voraussetzung, vgl. Kapitel 6.3.1), beim Lehm argumentiert er auf der einen Seite mit weiteren Adjektiven („matschiger“), auf der anderen Seite betont er, dass dort „alles zusammen ist“, was einen Hinweis auf die Gefügebene darstellt. Am Ende des Kurses argumentiert er sowohl mit den Bestandteilen des Sandes als auch mit denen des Lehms; beim Lehm ist er somit von einer Argumentation auf Stoffebene zu einer Begründung auf Ebene der Bestandteile übergegangen. Dass die unterschiedlichen Argumentationsebenen Lars aber teilweise auch Schwierigkeiten bereiten, wird im folgenden Kapitel erkennbar.

EL - I1-4, 56

I: Und warum wird er [der Schneemann] schlechter?

L: Weil der hier so viele Steine hat.

I: Mhm.

I: Und der Sand? // E: Und weil der da ist ein bisschen härter und hält mehr. (*nicht eindeutiger Fingerzeig auf den feinen Sand*) // L: Der hat zwar mehr Steine aber die sind kleiner. (*feiner Sand*)

,68

I: Du hast ja gesagt das hier geht besser, weil hier kleinere Steine drin sind. Und beim Lehm?

L: Geht das besser, weil der matschiger ist.

,77

I: Irgendwie weiß ich immer noch nicht warum das mit dem Lehm besser geht als mit dem Sand.

E: Ich weiß es. // L: Weil der - // E: Weil der Lehm härter ist und er hält besser. //

L: Weil er matschig ist und der (Sand) hat Steine.

I: Mhm, der Sand hat Steine. Und du meintest? // L: Weil da alle zusammen ist und da (nicht so?) - // E: Weil der hier ein bisschen härter ist und der klebt.

[...]

I: Und du sagtest gerade, weil in dem Lehm so vieles drin ist. Oder was hast du gerade gesagt?

L: Weil in dem Lehm das alles zusammen- [...]

I: Was ist denn da alles zusammen?

L: Ja da hängt alles zusammen.

EL - I1-5, 159

L: Weil es klebrig ist. So wird Kleber reingesetzt von der Natur aus.

I: Und was ist der Kleber da drin, in dem Lehm?

L: Der Ton.

I: Der Ton.

L: Und die Kristalle.

,170

I: Emil fällt dir noch was ein, warum man den Sand jetzt nicht so gut formen kann wie den Lehm?

L: Guck.

E: Ja. Weil der Sand ist so hart. // L: Nein, weil der Sand, der hat Steine- // E: Ist hart. Und der ist deswegen hart. // L: Und die können nicht kleben. // E: Der ist deswegen hart.[...]

L: Und die Steine können nicht in einander kleben, weil die sind zu dick.[...]

L: Die Steine sind rund- // I: Die sind rund. // L: und runde Sachen rutschen runter.

I: Ah. Und der beim Lehm?

L: Bei Lehm sind Kristalle, die eckig sind.

I: Ah und das geht dann besser?

L: Ja.

Lennie argumentiert im Interview I1-4 auf der einen Seite zunächst über weitere Eigenschaften des Lehms und des Sandes, auf der anderen Seite benennt er für beide Stoffe Begriffe, welche auf die Gefügebene hindeuten. Im Interview I1-5 argumentiert er dann über die Bestandteile des Sandes („Steine“), welche nicht aneinander haften. Zwar wirft sein Interviewpartner Levi ein, dass Lehm ja auch aus Einzelteilen bestehe, allerdings forciert Lennie weiterhin die „Masse Lehm“ (wobei der Begriff „Masse“ erstmals von Levi genutzt wird). Insgesamt deuten viele Textpassagen in Richtung Gefügebene, was deren Bedeutung unterstreicht. Sie scheint für ihn zudem eine befriedigende Erklärung darzustellen; schließlich wird auch zum Ende des Kurses auf diese Weise argumentiert. Ihm scheint auch nicht – oder zumindest vordergründig nicht –

bewusst zu sein, dass Lehm sich ebenfalls aus Einzelteilen zusammensetzt. Als Levi ihn darauf hinweist („Klar, da ist doch Ton-“) räumt Lennie zwar ein, dass er recht habe; betont allerdings weiterhin, dass der zentrale Faktor das „Zusammenhaften“ darstellt. Im Gegensatz zu Moritz (s. vorheriges Kapitel), der Bestandteile und Gefüge miteinander verknüpfen kann („Ich glaube die feineren Teilchen, die setzen sich zu dem großen Teil zusammen“; JAHM-I2-4, 105), beschreibt Lennie diesen Zusammenhang nicht. Für Sand scheint er das Material („Steine“) dafür verantwortlich zu machen, dass dieser nicht haftet. Möglicherweise ist auch die Tatsache, dass er dem Wasser kaum Bedeutung beimisst, ausschlaggebend dafür, dass er keine Verbindung zwischen einzelnen Bestandteilen und Gefüge herstellen kann.

Lennie, Lasse – I1-4,34

I: Habt ihr eine Idee, warum das beim Lasse nicht so gut klappt?

Le: Weil das Sand ist. // I: Mhm. // Le: Der zerbröselt.

,38

I: Warum zerbröselt der denn so und der Lehm nicht?

Le: Auch, wenn der pampig ist. Der (grober Sand) ist viel leichter. [...]

Le: Der ist nicht stabil.

,85

I: Achso. Und beim Lehm?

Le: Ja-

Le: Das ist Pampe so gesagt. Da hält sich alles zusammen.

*Lennie, Levi - I1-5 , 30*³⁷

I: Und wieso glaubt ihr geht das besser als mit dem Sand?

Le: Weil der Sand aus einzelnen, kleinen, ganz winzig kleinen Steinen besteht. Und deswegen fällt das auseinander. Weil die haften nicht aneinander. Lehm schon. Das ist sorgesagt (Pampe?).

I: Aha, und was haftet da beim Lehm aneinander? Du sagtest beim Sand sind kleine Steine drin und beim Lehm?

Levi: Da ist mehr eine Masse.

Le: Ja.

I: Eine Masse. Mh.

Le: Also so gesagt arbeitet das alles zusammen. Sand nicht. (Eins?) besteht aus Einzelteilen.

I: Ah, und Lehm?

Levi: Auch.

Le: Nein, der besteht nicht aus Einzelteilen.

Levi: Klar, da ist doch Ton -

Le: Ja, schon, aber Sand hat - besteht aus Einzelteilen, weil (unv.) verschiedene Steine sind. Im Lehm nicht. Der haftet zusammen. Das meine ich.

,44

Le: Ja, er hat ja schon recht, der besteht aus einzelnen Teilen, also ja, aber ich meine jetzt so: hier haftet alles zusammen, aber der Sand nicht. Der Sand besteht eigentlich

³⁷Die Gruppen sind hier aufgrund von Fehltagen einzelner Kinder unterschiedliche zusammengesetzt. Zumeist war Lasse Lennies Interviewpartner; er war allerdings sehr zurückhaltend, so dass die Aussagen fast ausschließlich von Lennie stammen.

nur aus den - ja eigentlich nur aus den Steinen und die haften nicht zusammen. Vielleicht ein bisschen wenns klebt. Dann kleben sie auf jeden Fall an der Haut. (...) Lehm auch.

,48

I2: Ich weiß nicht, ob der Lennie das nochmal erklären mag. Du hast gesagt, die Bestandteile im Lehm arbeiten zusammen. Wie stellst du dir das denn vor?

Le: (...) Ja weil - Ich meine, die arbeiten so zusammen, weil - (5 sek) Weil Sand der, der besteht aus kleinen Teilen, also nur aus Steinen, die haften nicht zusammen. Lehm nicht, der - also der ist eine Masse. Der gehört zusammen. So gesagt. Arbeitet zusammen. Damit er nicht auseinander fällt zum Beispiel.

I: Mhm. Wer arbeitet denn da mit wem zusammen?

Le: Lehm mit Lehm.

I: Lehm mit Lehm?

Levi: Alles mit allem.

Le: Ja, weil die Zu- also die Sachen woraus der Lehm besteht, die arbeiten zusammen damit der so haftet. Der Sand nicht, der haftet nicht, weil der hat andere Sachen wo er raus besteht.

Nicht zuletzt begründet auch Niklas zu Beginn über die Gefügeebe; das Konzept wird später Richtung Bestandteile des Lehms ausgebaut (s.o.).

MLN - I2-2, 34

M: Also, ja der ist hier so, ja, Erde und Sand besteht ja aus so kleinen Teilchen, die nicht so gut zusammenhalten. [...]

I: Und warum hält das jetzt beim Lehm so gut zusammen? [...]

N: Das findet sich zueinander, weil es ein Teil ist, irgendwie so.

Bewertung aus fachlicher bzw. fachdidaktischer Sicht

In der Bodenkunde wird eine Beschreibung der Gefügestruktur des Bodens vorgenommen, um beispielsweise Aussagen über Durchwurzelbarkeit und Porengrößenverteilung zu gewinnen (vgl. S. 70). Für die Beurteilung der Fruchtbarkeit der Böden oder der Anfälligkeit gegenüber Erosion ist eine Kenntnis des Bodengefüges unerlässlich. Scheffer et al. (2010) nennen das Gefüge neben der Körnung und der Farbe des Bodens als übergeordnete Eigenschaft, aus deren Beschreibung sich weitere Eigenschaften eines Bodens (wie Durchwurzelbarkeit und Festigkeit etc.) ableiten lassen (S. 171). Damit kommt der Beschreibung des Gefüges in der Bodenkunde eine ähnliche Bedeutung zu wie der Beschreibung chemischer Strukturen in der Chemie: sie dient unter anderem dazu, ausgehend von einer bestimmten Struktur³⁸ Aussagen über Eigenschaften und das Verhalten eines Stoffes treffen zu können. Damit beschreiben die Kinder auf einer Ebene, die durchaus schlüssig Aussagen über die Eigenschaften zulässt. Ob bzw. inwiefern dies

³⁸Das Bodengefüge wird auch als eine Eigenschaft des Bodens bezeichnet (Scheffer et al., 2010, 171). Zugleich wird das Bodengefüge aber auch mit dem Begriff Bodenstruktur gleichgesetzt (vgl. z.B. (Schroeder und Blum, 1992)(Gisi, 1990).

auch hinsichtlich des chemischen Lernens gewinnbringend sein kann wird in Kapitel 7 betrachtet.

6.3.5. Auftretende Schwierigkeiten und Fehlvorstellungen

Die Auswertung der Interviews offenbarte auch einige Schwierigkeiten begrifflicher und konzeptueller Art. Ein Problem bezieht sich auf die unterschiedlichen Erklärungsebenen der Kinder. Beispielsweise scheint Lars im letzten Interview zwischen dem Stoff Lehm und seinen Bestandteilen hin- und herzuspringen, ohne diese klar voneinander abzugrenzen. Der folgende Transkriptausschnitt zeigt die entsprechenden Äußerungen. Im Anschluss wird eine Interpretation versucht.

EL - I1-5, 56

I: Warum ist das so? Warum kannst du das denn so gut kneten? [...]

L: Und weil bei Steinen es immer meistens eine gerade Fläche, also dass das nicht Zacken sind. Und beim Lehm sind Zacken und deswegen, also ist die Schicht nicht so- wie soll ich das jetzt sagen. (...) Ist die Schicht nicht so (...) rau.

I: Achso, du meinst bei dem Lehm sind da so Hubbel quasi, so Zacken. Und die verhaken sich dann. (*deutet dies mit der Hand an*) // L: Ja da ist sie rau.

L: Ja und deswegen verhaken die sich.

I: Mhm.

L: Und da bleibt das zusammen. Aber die sind nicht so hart zusammen, wenn die nass sind, nämlich erst hängt zusammen, wenn man, wenn man den richtig hart gekriegt hat. Und sonst kann man den auseinanderreißen. [...]

L: Da sieht man auch die Zacken, wenn man so macht. (..)

I: Auf dem Tisch oder wo?

L: Ja.

E: Das klebt auch an mir. (*scheint den Lehmklumpen zu seinem Oberkörper zu führen (auf Video nicht vollständig sichtbar)*) (..) [...]

I: Und hier meinst du sieht man die Zacken? (*deutet auf den Lehmklumpen, welcher gerade vom Tische 'abgezogen' wurde*)

L: Ja, da. // E: Da. (*gehen mit dem Gesicht nah an den Lehm ran und zeigen auf die unebene Oberfläche (Rillen)*)

I: Mhm.

E: Jetzt sind sie weg. (*streicht mit der Hand über den Lehmklumpen um die Oberfläche zu glätten*)

L: Nein. Da sind (noch immer?) welche. Die sind so klitzeklein, die sind kleiner als ein Floh.(..)

L: Hier der ist grau. (*nimmt einen kleinen "Lehmkrümel" vom Tisch*)(...)

E: Gleich sind die weg, wenn ich die weg gedrückt habe. (*klopft mit der Faust auf den Lehm*)

I: Und wo sind die dann hin die Zacken?

E: Da drin. // L: Dann sind die gerade gemacht. (*breitet die Arme aus, um eine Ebene anzudeuten*)

E: Dann sind das platte Zacken.

E: Dann ist das wie ein Blatt Papier. Ganz-

I: Aber haften tut das ja immer noch.

L: Ja. //E: Ja.

L (überlegend): Meine Methode war falsch.

6. Ergebnisse

- I: War eigentlich schon gar nicht so schlecht.
E: Guck jetzt ist er ganz gerade. // L: Weil es klebrig ist. So wird Kleber reingesetzt von der Natur aus.
I: Und was ist der Kleber da drin, in dem Lehm.
L: Der Ton.
I: Der Ton.
L: Und die Kristalle. Weil die Kristalle sind nie eben. (..) Die kann man nicht gerade machen. Außer wenn man die schleift.(.) Und dann verhaken die sich. // E: Endlich habe ich dich (E holt erneut Lehmklumpen aus dem Becherglas). (4 sek)
E: Jetzt gleich ist er ganz flach. Wollen wir wetten? (*reibt den sehr feuchten Lehm weiter über den Tisch*) [...]
I: Emil fällt dir noch was ein, warum man den Sand jetzt nicht so gut formen kann wie den Lehm?
L: Guck.
E: Ja. Weil der Sand ist so hart. // L: Nein, weil der Sand, der hat Steine- // E: Ist hart. Und der ist deswegen hart. // L: Und die können nicht kleben. // E: Der ist deswegen hart.
I: Mhm.
L: Junge. Lass ich will ausreden. // E: Nein. // L: Und die Steine können nicht in einander kleben, weil die sind zu dick.
E: Die werden zu dick?
L: Oder eher gesagt, die sind so- // E: Gleich ist der ganz platt.
I: Ok, die Steine sind zu dick, deswegen kleben die nicht aneinander?
L: Nein, habe ich mich geirrt.
I: Nein ist ja gut. // L: Die Steine sind rund- // I: Die sind rund. // L: und runde Sachen rutschen runter.
I: Ah. Und der beim Lehm?
L: Bei Lehm sind Kristalle, die eckig sind.
I: Ah und das geht dann besser?
L: Ja.

Lars spricht dem Lehm auf der einen Seite Zacken zu, welche er auch auf dem Tisch, von welchem er einen feuchten Lehmklumpen „abzieht“, auch sieht und zeigt. Auf der anderen Seite behauptet er, nachdem sein Interviewpartner Emil die Zacken mit der Hand glattgestrichen hat, diese seien immer noch da, man könne sie nur nicht sehen. Dennoch äußert er keine Einwände als Emil diese mit der Faust glättet – und behauptet schließlich selber, diese seien nun „gerade gemacht“. Auf den Einwand des Interviewenden, dass der Lehm immer noch klebe kommt er zu dem Schluss, dass seine Erklärung mit den Zacken falsch sein müsse. Dies kann als kognitiver Konflikt gewertet werden; offensichtlich kommt er mit seinen bisherigen Erklärungen nicht weiter. Im Anschluss kommt er von sich aus noch einmal auf das Kleben zu sprechen. Auf Nachfrage, was denn dieser von ihm genannte „Kleber“ darstelle, nennt er Ton und Kristalle (wobei er diese nicht als dasselbe anzusehen scheint). Anschließend zieht er auch Form und Oberfläche der einzelnen Bestandteile hinzu: Da diese „eckig“ und „nie eben“ sind, verhaken sie sich und können besser halten als die runden Sandkörner. Hier spielt also auch seine Vorstellung von Kristallen eine Rolle. Er scheint somit zunächst auf der Ebene des Stoffes Lehm und anschließend auf der der

Bestandteile zu argumentieren. Da er beide Ebenen nicht klar voneinander trennt und erscheint seine Argumentation insgesamt inkonsistent und schwer nachvollziehbar. Lars postuliert damit gleiche Strukturen auf unterschiedlichen Ebenen.

Einige Kinder schienen demgegenüber Schwierigkeiten zu haben, sich überhaupt auf die Ebene der einzelnen Bestandteile zu begeben. So wurde bei Max keine Aussage unter einer Bestandteil-Kategorie codiert. Zudem deuten viele weitere Interviewpassagen darauf hin, dass er den Bestandteilen des Stoffes keine Bedeutung beimisst. So erfolgt die Unterscheidung zwischen grobem und feinem Sand in I1-4 von Max und Constantin beispielsweise ausschließlich über dessen Farbe und Weichheit.

MC – I1-4, 12

I: Wie unterscheiden die sich denn?

M: Der eine ist weiß und der andere ist nicht weiß. [...]

I: Das ist (unv.): Gibt es sonst noch Unterschiede?// C: der fühlt sich irgendwie- ja, nicht so rau an. Der fühlt sich rauer an, finde ich.

I: Aha, Max, guck mal. Siehst du noch weitere Unterschiede? M: Der ist weicher als der hier.

Offensichtlich wird dies auch bei den Zeichnungen, welche Max während der Interviews anfertigen möchte, um seine Ideen zu den Unterschieden zwischen beiden Sanden darzustellen. Die Interviewerin geht zunächst davon aus, dass Max zwei einzelne Sandkörner darstellt; auf Nachfrage hin stellt sich allerdings heraus, dass er die Sand“haufen“ zeichnet und die Füllhöhe in den Bechergläsern die Größe der Darstellung bedingt und nicht etwa die Korngröße.

MC – I1-4, 43

M: Also, jetzt mal ich erst-(6 sek) Also das ist der W für Weiße Sand und das ist der B für bunte Sand.

I: Mh.(...)Aha. (8 sek)

I: Und wie unterscheiden sich deine beiden Sande jetzt? Ich sehe-// M: Wegen der Farbe.

I: Wegen der Farbe. Aber-// C: Und wegen dem ja- Gefühl irgendwie.

I: Aber, dein bunter Sand ist ja auch viel größer als dein weißer Sand?

C: Ja-// M: Ohja, stimmt, warte.

C: Das ist jetzt größer. Ja, das ist so ziemlich gleich.

M: (Unv.)

I: Wie ist das denn? Sind die beide gleich groß?

C: Na, hier ist weniger drin. (*zeigt auf Becher mit feinem Sand*)

I: Weniger?

C: Mhm.

M: Ja, da ist weniger (*Zeig auf feinen Sand*) und da (*Zeig auf groben Sand*) ist mehr.

C: Aber wahrscheinlich nur (unv.) Sand abfüllen (Unv.)// I: Mh. (..)

I: Achso, ist das der ganze Becher hier? (*Deutet auf Gemaltes*)

M: Ja// C: Mh, ich weiß nicht wie der das gemalt hat. Das ist sein Gemaltes nicht meins.// M: Das ist ein Haufen.

6. Ergebnisse

Auch im letzten Interview finden sich keine Hinweise auf einen Wechsel zu anderen Erklärungsebenen. Lediglich an einer Stelle – bezogen auf das Wasseraufnahmevermögen – spricht er davon, dass Sand nur aus „einzelnen Mini-Steinchen“ – bestehe (MC-I1-5, 39).

Es scheint also keineswegs selbstverständlich, dass die Thematisierung und Untersuchung der Bestandteile während des Kurses auch einen Erklärungswert für die Kinder beinhaltet. Dies lässt sich insbesondere im ersten Kurs feststellen, in welchem das *teaching experiment* nicht durchgeführt wurde und der Schwerpunkt stärker auf der Erhebung der intuitiven Konzepte lag. Auf der anderen Seite zeigen die Ergebnisse im Allgemeinen, dass vielen Kindern der Erklärungswert der stofflichen Zusammensetzung klar wurde (vgl. Kapitel 5.3.3 und 6.1) und die hier beschriebenen Schwierigkeiten vielmehr auf einzelne mögliche Probleme hindeuten.

Ein weiteres Problem, welches insbesondere die Auswertung der Interviewtranskripte erschwerte, lag in begrifflichen Unklarheiten bzw. Doppeldeutigkeiten. Dieses Problem wurde in Hinblick auf einige geowissenschaftliche Begriffe bereits beschrieben (vgl. Kapitel 5.3.4); im Zuge der Analyse der Transkripte des zweiten Kurses sowie der Feinanalyse konnte dies auch in Bezug auf einige Adjektive festgestellt werden. So scheint insbesondere das Adjektiv „fein“ von den Kindern in verschiedener Weise gebraucht zu werden. Zum einen meint „fein“ eine gewisse Korngröße; das heißt die Größe der einzelnen Bestandteile steht im Vordergrund (und entsprechende Äußerungen fielen unter die Kategorie „Einbezug der Teilchengröße“). Zum anderen scheint „fein“ auch als feinkörnig aufgefasst zu werden, wobei hier eher die Körnigkeit an sich, also das einzelne Vorliegen der Bestandteile, fokussiert wird. Entsprechende Äußerungen werden dann eher unter die Kategorie Gefügebene gefasst. Für die Argumentation zur Formbarkeit ist dieser Unterschied erheblich: in ersterem Fall lässt sich beispielsweise Sand schlechter formen, da er nicht so fein ist wie Lehm – im zweiten liegt die Begründung für die schlechtere Formbarkeit in der Tatsache, dass er feiner ist.

Levi, Jessica - I1-4, 44

(L greift zunächst zum Lehm, packt dann kurz in das Becherglas mit grobem Sand, um anschließend direkt wieder den Lehm zu nehmen. J nimmt den feinen Sand und versucht kurz eine Kugel zu formen.)

J: Das geht nicht. Es ist zu fein. Also mit Lehm, da kann man was bauen.

gegenüber

JAHM - I2-4, 28

I: Und was unterscheidet den Sand von dem Sand?

H: Das ist ganz feiner und das hier ist ganz grober. [...]

M: Und das ist der allergrößte. [...]

J: Das ist das allerschönste (*Ton*).

I: Allerschönste oder? Ihr habt gesagt das allergrößte, das ist grober Sand, das ist feiner Sand //und das hier//

J: //Das (*Ton*) ist das allerfeinste.//

Dominik und Nico fällt der Konflikt zwischen beiden Konnotationen auf:

DN - I1-5 ,143

I: Und warum klebt der so viel besser als meinetwegen Sand klebt?

D: Weil der Sand feiner ist.

N: Der Lehm ist doch feiner.

D: Nein der Sand. Oh doch der Lehm.

Ähnliches scheint für das Adjektiv klein zu gelten: einerseits kann es sich auf die Korngröße beziehen, andererseits wird auch dieser Begriff mit der Konnotation „einzeln“ in Verbindung gebracht, wie beispielsweise Niklas' Aussage „*Sand ist durch die kleinen Teile nicht so feste wie Lehm*“ (MLN - I2-2, 26) nahelegt.

Bewertung aus fachlicher bzw. fachdidaktischer Sicht

Die Äußerungen von Lars können als eine Art Hybridkonzept interpretiert werden (vgl. Kapitel 2.3.2). Lars versucht das im Kurs erworbene Wissen mit seinen bisherigen Vorstellungen, bei denen die Erklärungen bezogen auf Lehm auf makroskopischer Ebene stattfanden (s.o.), in Einklang zu bringen, was zu einer zum Teil schwer verständlichen Mischung der Konzepte führt. Das Auftreten von Mischkonzepten beim Erlernen chemischer Fachkonzepte ist ein vielfach beschriebenes Phänomen, welches insbesondere in Bezug auf das Teilchenkonzept auftritt. Wie unter Kapitel 2.3.3 dargestellt, werden Kontinuums- und Diskontinuumsvorstellungen häufig vermischt. Duit (1992b, 206) interpretiert dies als einen Versuch „das Neue (hier das Teilchenmodell) im Rahmen des bereits Bekannten (hier ihres Kontinuumsmodells) zu sehen“. Analog werden in dem hier geschilderten Fall unterschiedliche Ebenen (die des Stoffgemisches Lehm und die der Bestandteile (der Tonminerale)) miteinander vermischt.

Solche Mischkonzepte können einen Zwischenschritt auf dem Weg zu einer fachlich angemessenen Deutung darstellen (vgl. Talanquer, 2009). Diesbezüglich kommt Schmidt (2010) nach einer Untersuchung zur Veränderung von Konzepten zum Aufbau von Stoffen durch ein kontextorientiertes Unterrichtsangebot zu dem Schluss, dass eine eindeutige Bewertung solcher Hybridvorstellungen schwierig ist. Sie könnten, müssten aber nicht einen Übergang zum Diskontinuum darstellen - ebenso können sie sich verfestigen und zu fachlich unangemessenen Vorstellungen führen (ebd., S. 293). Die folgende Zusammenfassung umfasst alle zentralen Ergebnisse der Feinanalyse:

Zusammenfassung

- Die Wahl des Adjektivs „kleben“ zur Erklärung des Phänomens Formbarkeit scheint ebenso wie eine Argumentation über die Bestandteile des Sandes einen Konzeptausbau zu begünstigen.

6. Ergebnisse

- Ob der Aufbau eines Stoffes für dessen Eigenschaften aus Sicht der Kinder bedeutsam ist, unterscheidet sich einerseits in Bezug auf den Stoff (Sand oder Lehm), andererseits scheint dies abhängig von dem gewählten Phänomen (Formbarkeit vs. Wasseraufnahmevermögen) zu sein.
- Die Gefügebene scheint für die Kinder ein hohes Erklärungspotential zu beinhalten und wird als fachlich ausbaufähig erachtet.
- Das gewählte Vorgehen im Rahmen des *teaching experiments* scheint sowohl die Teilchengröße als auch das Wasser für Kinder bedeutsamer werden zu lassen.
- Es können auch lernhinderliche Vorstellungen und Konzepte identifiziert werden, welche insbesondere Begriffsdefinitionen betreffen. Auch kommt es teilweise zur Vermischung der Stoff- und Bestandteilebene und zur Ausbildung von Hybridkonzepten.

7. Diskussion

Die Ergebnisse der vorgestellten Untersuchung wurden einzeln bereits in den vorherigen Kapiteln bewertet. In diesem Kapitel werden diese nun zusammenhängend betrachtet und diskutiert. Dazu wird zunächst eine (Neu-)Gruppierung zu verschiedenen Diskussionsbereichen vorgenommen, welche im Anschluss weiter ausgeführt werden. Ergebnisse, die für mehrere Bereiche von Relevanz sind, werden wiederholt genannt. Die folgende Auflistung gibt in diesem Sinne einen Überblick über die Ergebnisse aus den Zusammenfassungen der vorherigen Kapitel. Die Kapitel, in denen diese Ergebnisse beschrieben wurden, sind umrandet.

1 Ergebnisse zu intuitiven Konzepten zur Formbarkeit und zu ausgewählten Begriffen → *Diskussion Kapitel 7.1*

- a) Die Formbarkeit von Lehm wird über den Wassergehalt sowie über besondere Eigenschaften des Lehms begründet. 5.3.3
- b) Beim Sand spielen neben dem Wasser auch die Bestandteile eine wichtige Rolle. 5.3.3
- c) Die Zusammensetzung des Lehms spielt keine oder nur eine untergeordnete Rolle. Dies ändert sich zum Teil durch die intensive Auseinandersetzung mit dem Lehm. 5.3.3
- d) Unter Berücksichtigung der unter der Kategorie „Gefügeebe“ fallenden Textpassagen kann vermutet werden, dass Lehm von einigen Kindern eher als kontinuierliche Masse aufgefasst wird, während Sand für sie eine körnige Struktur besitzt und damit aus Einzelteilen zusammengesetzt ist. 5.3.3
- e) Ob der Aufbau bzw. die Zusammensetzung eines Stoffes für dessen Eigenschaften aus Sicht der Kinder bedeutsam ist, unterscheidet sich einerseits in Bezug auf den Stoff (Sand oder Lehm), andererseits scheint dies abhängig von dem gewählten Phänomen (Formbarkeit vs. Wasserspeicherkapazität) zu sein. 6.3
- f) Der Begriff Ton ist den Kindern zu Beginn des Kurses bereits vertraut und mit konkreten Vorstellungen belegt. 6.2
- g) Der Bezug zwischen Lehm und Ton wird über Ähnlichkeiten oder Unterschiede in den Eigenschaften beider Stoffe hergestellt. 6.2

- h) Ähnlich wie der Begriff Ton ist der Begriff Stein auch mit konkreten Vorstellungen belegt; eine Beziehung zum Lehm wird aber deutlich seltener hergestellt.

6.2

- i) Die Vorkommen von Sand bzw. Lehm unterscheiden sich in den Augen der Kinder, was für sie gegen Sand als Bestandteil von Lehm spricht. Sand geht dabei vermutlich mit einer Vielzahl von Sandkörnern einher.

6.2

- j) Der Begriff Teilchen ruft zu Beginn des Kurses kaum konkrete Assoziationen hervor. Er wird teilweise als Partikel oder als Stoffportion aufgefasst. Häufig ist der Begriff lediglich in Bezug auf das Gebäckstück bekannt.

6.2

2 Ergebnisse zum Struktur-Eigenschaftskonzept → *Diskussion Kapitel 7.2.*

- a) Die Zusammensetzung des Lehms spielt keine oder nur eine untergeordnete Rolle. Dies ändert sich zum Teil durch die intensive Auseinandersetzung mit dem Lehm.

5.3.3

- b) Die Beziehung zwischen Sand und Lehm wird zunächst in erster Linie in ähnlichen Eigenschaften gesehen. Am Ende des Kurses wird Sand als ein Bestandteil von Lehm genannt.

6.2

- c) Die Gefügebene scheint für die Kinder ein hohes Erklärungspotenzial zu beinhalten und wird als fachlich ausbaufähig erachtet.

6.3

- d) Unter Berücksichtigung der unter die Kategorie „Gefügebene“ fallenden Textpassagen kann vermutet werden, dass Lehm von den Kindern eher als kontinuierliche Masse aufgefasst wird, während Sand eine körnige Struktur besitzt und damit aus Einzelteilen zusammengesetzt ist.

5.3.3

- e) Die Wahl des Adjektivs „kleben“ zur Erklärung des Phänomens Formbarkeit scheint ebenso wie eine Argumentation über die Bestandteile des Sandes einen Konzeptausbau zu begünstigen.

6.3

- f) Die Bestandteile und die Korngrößen des Lehms werden ebenso wie der Faktor Wasser am Ende des Kurses aufgegriffen.

6.1

- g) Die Ergebnisse der kategorienbasierten Auswertung des zweiten Kurses stützen die des vorherigen. Das Kategoriensystem wurde um die Kategorien „Wasser: Andeutung einer Wechselwirkung“ sowie „Teilchengröße: Allgemeiner Zusammenhang“ erweitert.

6.1

3 Weitere Ergebnisse → *Berücksichtigung bei der Neustrukturierung des Lerngegenstandes in Kapitel 7.3*

- a) Durch das gewählte Design im *teaching experiment* kann die Bedeutung der Korngröße für die Formbarkeit – auch in Bezug auf Lehm – verdeutlicht werden.

6.1

- b) Das gewählte Vorgehen im Rahmen des *teaching experiments* scheint sowohl die Teilchengröße als auch das Wasser für Kinder bedeutsamer für die Deutung der Eigenschaft „Formbarkeit“ werden zu lassen. 6.3
- c) Inwiefern der Begriff Stein eine Korngröße impliziert oder mit einem gewissen Material verbunden wird, kann nicht abschließend geklärt werden bzw. ist bei den einzelnen Kindern unterschiedlich. 6.2
- d) Es können auch lernhinderliche Vorstellungen und Konzepte identifiziert werden, welche insbesondere Begriffsdefinitionen betreffen. Auch kommt es teilweise zur Vermischung der Stoff- und Bestandteilebene und zur Ausbildung von Hybridkonzepten. 6.3
- e) Die vorhandenen Vorstellungen zum Tonbegriff können eine Lernhürde bei der Vermittlung von Ton als Bestandteil des Lehms darstellen, insbesondere wenn Ton als „Masse“ aufgefasst wird.. 6.2
- f) Eine Klärung von Begriffen kann zur Konzepterweiterung beitragen. 6.2
- g) Der Begriff Teilchen wird am Ende des Kurses von den meisten Kindern als Begriff für die Bestandteile der einzelnen Bodenarten angewendet. 6.2

7.1. Diskussion der Ergebnisse zu intuitiven Konzepten

Wie im fachlichen Teil der Arbeit dargestellt, beruht die Plastizität des Lehms auf dessen stofflicher Zusammensetzung sowie der Form und Größe der Tonminerale. Weiterhin ist die Wechselwirkung der einzelnen Bestandteile mit dem Wasser von Bedeutung.

Die inhaltsanalytische Auswertung der Interviews legt die Vermutung nahe, dass die Kinder intuitiv einige fachlich relevante Aspekte zur Erklärung des Phänomens hinzuziehen, darüber hinaus aber auch alternative Vorstellungen existieren. Häufig sehen die Kinder das Wasser als relevant an. Die Zusammensetzung des Lehms hingegen scheint in den Augen der Kinder zunächst weniger bedeutsam; vielmehr begreifen sie Lehm offenbar als kontinuierlichen Stoff und begründen die Formbarkeit mit Hilfe weiterer Eigenschaften wie der Klebrigkeit (vergleiche → Ergebnisse 1a 1c, 1d). In diesem Zuge werden weitere Stoffeigenschaften von den Kindern benannt. Dabei wird zum Teil von den Kindern bereits diskutiert, inwiefern einzelne Eigenschaftszuschreibungen (beispielsweise das Adjektiv „fein“; vgl. hierzu Kapitel 6.3.5) den Stoff zutreffend beschreiben.

Diese Ergebnisse weisen insbesondere in Bezug auf die geringe Bedeutung, die den Bestandteilen des Lehms zugesprochen wird, deutliche Parallelen zu Befunden auf, welche in Bezug auf andere Kontexte bereits in der Literatur beschrieben wurden.

So wurde gezeigt, dass die Frage nach dem Aufbau eines Stoffes insbesondere für Kinder und Jugendliche kaum Relevanz besitzt. Strunk (1999) konstatiert nach einer Zusammenstellung von

Forschungsergebnissen zu Teilchenvorstellungen: „Es ist also fraglich, ob man Grundschulern vermitteln kann, daß etwas, das so völlig homogen aussieht, trotzdem aus getrennten Einzelteilen besteht.“ (ebd., S. 126). Auch Nakhleh et al. (2005) sehen in der homogenen Erscheinung eines Stoffes ein zentrales Problem für die Schüler_innen: “Our data also indicate that it was difficult for students to view solid, nongranular matter as being composed of particulate or molecular matter“ (ebd., S. 608). Beide Zitate verdeutlichen auch die Abhängigkeit der Deutung von dem jeweils untersuchten Stoff – wie auch hier die Ergebnisse zu Lehm und Sand zeigen (→ Ergebnis 1b, 1e). Strunk vermutet, dass „die Frage nach einer diskontinuierlichen oder kontinuierlichen Materiestruktur für Grundschüler keinerlei Bedeutung besitzt“ (Strunk, 1999). In ähnlicher Weise berichten Renström et al. (1990), dass die Frage nach der Zusammensetzung eines Stoffes selbst einigen Schüler_innen der Mittelstufe überhaupt nicht sinnvoll erscheint (S. 560).

Auch Spägeles Einschätzungen weisen in dieselbe Richtung wie die hier gewonnenen Erkenntnisse zum Lehm: Er konstatiert für Schulanfänger, im äußeren Eindruck eines Gegenstandes ein höheres Erklärungspotenzial für naturwissenschaftliche Phänomene zu sehen als in dessen innerem Aufbau (Spägele, 2008, 246) (→ Ergebnis 1a-1c). Es scheint auch in der vorliegenden Untersuchung der äußere Eindruck zu sein, der zu den unterschiedlichen Erklärungen in Bezug auf Lehm oder Sand führt, nicht die Betrachtung des Aufbaues beider Stoffe. Dass zur Erklärung der Formbarkeit häufig andere Eigenschaften des Stoffes hinzugezogen werden (→ Ergebnis 1a), ist eine Beobachtung, die auch Nakhleh et al. (2005) bezogen auf die Formbarkeit anderer Stoffe (z.B. Zuckerwürfel, Wasser und Kupferdraht) beschreiben.

Die Studien zeigen, dass bereits vor der Einführung der „klassischen“ Teilchenvorstellung im Sinne von Atomen oder Molekülen Probleme mit der Einsicht eines diskontinuierlichen Aufbaus von Stoffen bestehen – eben wie Strunk es beschreibt, in der Erkenntnis, dass „etwas, das so völlig homogen aussieht, trotzdem aus getrennten Einzelteilen besteht“ (Strunk, 1999, 126).

Vor diesem Hintergrund scheint die Auseinandersetzung mit Lehm, so wie in den hier beschriebenen Kursen erfolgt, einen Beitrag zur Konzepterweiterung leisten zu können. Wie in dieser Arbeit gezeigt wird, greifen die Kinder nach der intensiven Auseinandersetzung mit Lehm und dessen Zusammensetzung am Ende der Kurse auf die Frage nach der Formbarkeit des Lehms deutlich häufiger dessen Bestandteilen auf und ändern in diesem Zuge zum Teil die Auffassung von der Kontinuität des Stoffes (→ Ergebnis 1c).

Als Bindeglied zwischen der Auffassung von Lehm als eine kontinuierliche Masse und der Beschreibung der einzelnen Bestandteile kann die Gefügebene angesehen werden. Hier zeigt sich, dass die Kinder teilweise einen diskontinuierlichen Aufbau annehmen, auch wenn sie zu den einzelnen Bestandteilen keine konkreten Aussagen treffen (→ Ergebnis 1d). Denkbar ist, dass über die Gefügebene ein Weg angebahnt werden kann, dem Aufbau der Stoffe und den einzelnen Bestandteilen verstärkt Beachtung zu schenken. In diesem Sinne bezeichnet Talanquer (2009) die Auffassung, dass Stoffe zwar aus einzelnen Partikeln aufgebaut sind, diese aber aus dem Stoff an sich bestehen oder als Partikel im Kontinuum aufgefasst werden, als „Granular-Hypothese“. Diese stelle wiederum - wie hier auch postuliert - einen Weg von der reinen Kontinuumsvorstellung hin

zur adäquaten Teilchenvorstellung.

Auch wenn in Abhängigkeit vom spezifischen Kontext oder der Aufgabenstellung verschiedene Lernwege auftreten, so zeigen viele Studien, dass solche Zwischenebenen bei vielen Schüler_innen existieren und ausbaufähig sind (vgl. Hadenfeldt et al., 2016). Der Weg zum Teilchenkonzept findet demnach selten von einer rein makroskopischen zur submikroskopischen Sicht statt. Die Wahrnehmung eines kontinuierlich erscheinenden Stoffes als partikulär - wie hier in Bezug auf Lehm gezeigt - kann in diesem Sinn einen ersten Schritt darstellen.

Von Bedeutung sind außerdem die Konzepte zu einzelnen Begriffen. Im Chemieunterricht stellt das Erlernen der chemischen Fachsprache für Schüler_innen eine Hürde dar, ist aber zugleich unerlässlich für das Verstehen chemischer Inhalte. Insbesondere die unterschiedliche Bedeutung im Alltag und im Fach Chemie führt dabei zu Problemen (vgl. z. B. Markic und Abels, 2013, Stäudel et al., 2008, s. auch Kapitel 2.3.3). Beim Lernen chemischer Inhalte anhand des Lerngegenstandes Lehm kommt erschwerend hinzu, dass nicht nur chemische und alltägliche, sondern auch geowissenschaftliche Begriffsauffassungen eine Rolle spielen und unterschiedliche Definitionen zu einigen Begriffen vorliegen. Besonders deutlich wird dies in Bezug auf den Begriff Ton, welcher den Kindern zumeist durch den Modellerton aus dem Kunstunterricht bekannt ist (→ Ergebnis 1f). Bereits in Kapitel 3.2.2 wurde auf die unterschiedlichen Schwerpunkte in der fachwissenschaftlichen Definition des Begriffes in verschiedenen Disziplinen verwiesen. Im Verlauf der Kurse kristallisierte sich diese Diskrepanz als besondere Schwierigkeit heraus; daraus folgende Konsequenzen werden in Kapitel 7.3 dargelegt.

Interessant sind auch die weiteren Ergebnisse aus der Analyse der *concept maps*. Viele geowissenschaftliche Begriffe scheinen durch die Alltagssprache mit anderen Vorstellungen als der fachwissenschaftlichen verknüpft zu sein. So konnte gezeigt werden, dass der Begriff „Sand“ für die Kinder häufig mit großen Mengen einhergeht und Sandkörner eher nicht „einzeln“ auftreten (→ Ergebnis 1i). Es kann als ein Desiderat der geographiedidaktischen Forschung angesehen werden, zugehörige Schülervorstellungen umfassender zu untersuchen (vgl. Kapitel 2.3.4).

7.2. Interpretation der Ergebnisse in Hinblick auf das Struktur-Eigenschaftskonzept

Die unter dem Punkt „Ergebnisse zum Struktur-Eigenschaftskonzept“ zusammengefassten Ergebnisse zeigen, dass die Kinder im Laufe des Kurses die Eigenschaft Formbarkeit zunehmend mit der Zusammensetzung des Lehms - und damit der Struktur - begründen. Es deutet sich damit eine zunehmende Argumentation im Sinne des Struktur-Eigenschaftskonzeptes an. Da sich dieses Konzept im Zuge der Auswertung als zentral herauskristallisierte, wird es an dieser Stelle erneut aufgegriffen und ausführlicher als in Kapitel 4 dargestellt. Im Anschluss werden die Ergebnisse direkt zu den Ausführungen in Beziehung gesetzt.

7.2.1. Das Struktur-Eigenschaftskonzept

Das Struktur-Eigenschaftskonzept kann als zentrale Leitlinie der Chemie bzw. des Chemieunterrichts angesehen werden. Scheffel (2010), der in seiner Dissertation eine didaktische Rekonstruktion des Konzeptes vornimmt, betont, dass dieses, bevor es Bestandteil der Bildungsstandards wurde, bereits in zahlreichen früheren didaktischen Ansätzen als besonders bedeutsam hervorgehoben wurde und damit „eine traditionsreiche Idee des Chemieunterrichts“ darstellt (ebd., S. 13). Er zitiert hier unter anderem Christen, der bereits 1975 konstatiert, dass „der Verknüpfung von Stoffeigenschaften und Strukturen (im weitesten Sinn) [...] besondere Bedeutung“ (Christen, 1975, 58) zukomme. Ebendiese Verknüpfung kann möglicherweise auch dem oben beschriebenen Problem der Bedeutungslosigkeit des Aufbaues von Stoffen aus Sicht der Lernenden entgegenwirken, da so der Betrachtung von Teilchen überhaupt erst eine Bedeutung zukommt. Dazu bedarf es der immer wiederkehrenden Erklärung von Eigenschaften mit Hilfe des Aufbaus der Stoffe (vgl. auch Nakhleh et al., 2005).

Um zu erfassen, was hinter dem Konzept steht, ist es notwendig die beiden zentralen Begriffe „Struktur“ und „Eigenschaften“ näher zu beleuchten. Diesbezüglich kritisiert Scheffel, dass in den Bildungsstandards beide Begriffe kaum mit Inhalt gefüllt werden (Scheffel, 2010, 10). Er weist auf unterschiedliche Konnotationen in verschiedenen fachwissenschaftlichen Disziplinen, wie der organischen und anorganischen Chemie hin (ebd., S. 14ff) und kommt zu dem Schluss, dass der Begriff der Struktur „für die Verwendung im schulischen Kontext eine räumliche und inhaltliche Unschärfe aufweisen“ müsse, da im Unterricht vielfältige Phänomene unterschiedlicher Fachausrichtungen behandelt würden (ebd., S. 19).

Insbesondere bezogen auf den Begriff „Struktur“ wird offensichtlich, dass dieser nicht nur die molekulare oder atomare Zusammensetzung umfassen kann, betrachtet man den Begriff in verschiedenen chemischen Perspektiven. Beispielsweise sind im Bereich der Nanowissenschaften, die zunehmend an Bedeutung gewinnen und auch in den Chemieunterricht Einzug halten, Molekül- oder Atomverbände im Nanometerbereich von Bedeutung. Die Eigenschaften von Nanomaterialien unterscheiden sich häufig stark von den Materialien mit gleicher Zusammensetzung, aber größerer Skalierung. Aus dem Alltag bekannt ist beispielsweise nanoskaliertes Titandioxid, welches in Sonnenmilch Verwendung findet. Gegenüber der mikroskalierten Form ist es transparent und bietet einen deutlich besseren Schutz vor UV-Strahlung.

Die Eigenschaften von Nanomaterialien resultieren unter anderem aus der geringen Größe der Bestandteile und der damit verbundenen größeren Oberfläche und ließen sich allein aus dem atomaren Aufbau nicht erklären (z.B. Paschen et al., 2006).

Eine Betrachtung von Strukturen und Eigenschaften kann und sollte daher auf unterschiedlichen Ebenen erfolgen, wie Scheffel mit Bezug auf die Arbeiten von Marijn Meijer u.a. der Universität Utrecht bemerkt. Meijers Ansatz wird im Folgenden ausführlicher beschrieben.

7.2.2. Ebenen des Struktur-Eigenschaftskonzeptes

Meijer, Bulte et al. (Meijer, 2011, Meijer et al., 2009, Meijer et al., 2013a, Meijer et al., 2013b) fassen die Begriffe der Struktur und der Eigenschaften weiter, indem sie nicht nur die submikroskopischen Teilchen und deren Verknüpfung sowie die chemischen Stoffeigenschaften hinzuziehen. Sie definieren beide Begriffe wie folgt:

‘Structure’ can be defined as the spatial distribution of the components in a system.

‘Properties’ can be defined as physical or chemical characteristics of a system (material): e.g. the elasticity of walls of gas holes or the capacity of gluten to absorb water.

(Meijer et al., 2013b, 420)

Die Tatsache, dass viele Schüler_innen Probleme haben, eine fachlich angemessene Vorstellung vom Aufbau der Materie zu entwickeln, sieht Meijer zum einen in der großen Diskrepanz zwischen ihren intuitiven Vorstellungen und den fachwissenschaftlichen, submikroskopischen Konzepten, zum anderen in der enormen, kaum vorstellbaren Größendifferenz zwischen makroskopischer und submikroskopischer Ebene (Meijer, 2011, 27). Weiterhin besitze der Stoffaufbau für viele Lernenden keine Relevanz (ebd., S. 127).

Diese Kluft sei auch der Ausrichtung der Schulchemie auf die Verknüpfung der drei bei Johnstone (Johnstone, 1991) beschriebenen Repräsentationsebenen geschuldet (Meijer, 2011, 26). Nach Johnstone sind für den Chemieunterricht drei Ebenen von Bedeutung, welche aufeinander bezogen werden: die makroskopische, die submikroskopische und die symbolische Ebene (Johnstone, 1991). Die makroskopische Ebene umfasst alle erfahrbaren makroskopischen Phänomene, die submikroskopische Ebene beinhaltet die Betrachtung von Atomen, Molekülen und Ionen, während Strukturformeln etc. die symbolische Ebene repräsentieren. Insbesondere die Abgrenzung zwischen den Ebenen bereitet Schüler_innen Probleme und makroskopische Eigenschaften werden häufig auf die submikroskopischen Einheiten übertragen. Auch die Emergenz der Stoffeigenschaften aus den Wechselwirkungen der submikroskopischen Teilchen zu verstehen fällt den Lernenden schwer (Meijer, 2011, 27f, vgl. auch Kapitel 2.3.3).

Den aus der beschriebenen Kluft zwischen submikroskopischer und makroskopischer Ebene resultierenden Problemen versuchen Meijer et al. durch den Einbezug von „Mesoebenen“ zu begegnen. Dieser Ansatz wurde bereits von Millar (1990) verfolgt: “We do not have to go straight from the observable to the atomic/molecular level; there are steps in between.” (S.289). Von Meijer et. al. wird dieses Vorgehen unter anderem anhand des Kontextes „Brot“ konkretisiert.

In Abbildung 7.1 ist dargestellt, wie die Eigenschaft der Elastizität (“*resilience*“) des Brotes mit Strukturen auf unterschiedlichen Ebenen erklärt werden kann. Die Eigenschaften auf einer Ebene sind dabei jeweils auf eine tieferliegende Struktur zurückzuführen: So ist die gute Konsistenz des Brotes auf die lockere Struktur zurückzuführen, die sich aus den luftgefüllten Hohlräumen ergibt. Diese wiederum bilden sich beim Aufgehen des Teiges, da das entstehende Kohlenstoffdioxid von Wänden mit elastischen Eigenschaften zurückgehalten wird. Diese Elastizität beruht auf einem Netzwerk aus dem Proteingemisch Gluten, welches die Stärke-Matrix zusammenhält. Das Netz-

werk selbst ist elastisch, da die Glutenketten sich innerhalb des Netzwerkes frei bewegen können, wobei der Zusammenhalt wiederum auf Disulfidbrücken zwischen den Polypeptidketten zurückzuführen ist. Die Ausbildung von Disulfidbrücken ist abhängig von der Aminosäuresequenz. Meijer schreibt dieser letzten Stufe jedoch keinen Mehrwert für die Erklärung der Elastizität des Teiges zu, so dass auf diese auch verzichtet werden kann (Meijer, 2011, S. 213).

Bezeichnet wird das an dem Beispiel Brot illustrierte Vorgehen auch als „*stepwise zooming in*“ (ebd., S. 212). Licht- und elektronenmikroskopische Aufnahmen können dabei eingesetzt werden, um Strukturen der Mesoebene zu visualisieren. Die Beziehungen zwischen den Strukturen und den Eigenschaften lassen sich über *wenn...dann..*-Formulierungen darstellen (z.B. „If the gluten network is formed, then the matrix will capture the produced gases“ (Meijer, 2011, 40)).

Meijer geht über die theoretische Modellierung hinaus und untersucht in einem im Sinne des *De-*

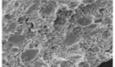
Maßstab (m)	Struktur	Eigenschaften
10^{-1}		<i>Lockeres, elastisches Brot</i>
$10^{-1} - 10^{-2}$		<i>Fähigkeit des Teiges, entstehendes Gas zurückzuhalten</i>
10^{-4}		<i>Elastische Wände der „Zellen“</i>
10^{-5}		<i>Elastisches Glutennetzwerk der Wände</i>
10^{-6}		<i>Flexible Polypeptidketten des Glutennetzwerkes</i>
10^{-8}		

Abbildung 7.1.: **Struktur-Eigenschaftsbeziehungen anhand des Kontextes „Brot“** (verändert nach Meijer (2011), Meijer et al. (2013b), Meijer et al. (2009)).

sign Research konzipierten Projektkurses unter anderem, ob 17-jährige Schüler_innen in einer realen Klassenraumsituation anhand dieses Kontextes ihre Konzepte zum „macro-micro-thinking“ erweitern können. Ausgangspunkt für die Schüler_innen ist die Herstellung eines glutenfreien Brotes aus Mais für Menschen mit Zöliakie. Beim Backen eines Maisbrotes zeigt sich, dass die Verwendung von Mehl aus Mais in einem qualitativ minderwertigen Brot resultiert. Aus dieser Beobachtung wird die Frage nach den Ursachen für die guten Backeigenschaften des Weizenbrotes aufgeworfen. Anhand von Fachartikeln erarbeiten die Schüler_innen schließlich jene Ebenen, welche die Elastizität des Weizenbrotes erklären. Ausgehend von den gewonnen Erkenntnissen über die Struktur und die Eigenschaften des Gluten-Netzwerkes, wird nach alternativen Zusatzstoffen (Hydrokolloiden) für die Herstellung glutenfreier Produkte gesucht.

Der Autor gelangt zu dem Schluss, dass die Begründung von Eigenschaften über Strukturen auf Mesoebene und die Entwicklung von konzeptuellen Schemata - wie in Abbildung 7.1 dargestellt - den Schüler_innen zumeist gelingt. Zudem werden den Subsystemen andere Eigenschaften

zugeschrieben als dem gesamten System, was Meijer als Hinweis auf das Vorhandensein einer Vorstellung von der Emergenz von Eigenschaften deutet (ebd., S. 152). Der umgekehrte Weg, die Vorhersage von Eigenschaften aus einer gegebenen Struktur, bereitet hingegen häufiger Probleme (Meijer, 2011, 204). Letzteres stand jedoch nicht im Zentrum der Erhebung und bedarf daher noch weiterer Studien (ebd., S. 216).

Als weitere Kontexte, für die mehrere Mesoebenen beschrieben werden, sind die Entwicklung kugelsicherer Westen, die Herstellung unzerbrechlicher Tassen sowie die Festigkeit und Steifigkeit von Fahrradreifen/-felgen angeführt (Meijer, 2011, Meijer et al., 2013b, Meijer et al., 2009). In Bezug auf die Herstellung der Tassen wird - wie in der vorliegenden Arbeit bezogen auf die Formbarkeit - die Korngröße der keramischen Rohstoffe als eine wichtige Zwischenebene herausgearbeitet. Gerade die Betrachtung alltäglicher Kontexte - deren Thematisierung im Unterricht schon aus motivationalen Gründen gefordert wird - bedarf häufig einer Deutung auf anderen Ebenen als der submikroskopischen (wobei es natürlich ebenso Phänomene gibt, die sich ausschließlich auf dieser Ebene erklären lassen wie z.B. das Lösen von Salz in Wasser). Dies wurde auch in der Expertenbefragung, welche Meijer neben einer Literaturrecherche zur Rekonstruktion der Ebenen bezogen auf die Kontexte „Brot“, „kugelsichere Westen“ und „unzerbrechliche Tassen“ durchführte, deutlich: Nur drei der 22 von Experten aufgestellten Struktur-Eigenschafts-Beziehungen bezogen sich auf die submikroskopische Ebene (Meijer, 2011, 50).

Der hier beschriebene Ansatz weist Parallelen zu dem von Buck et al. (2004) vorgeschlagenen Vorgehen auf, wonach Stoffe oder Dinge als Systeme betrachtet werden, welche sich aus verschiedenen Komponenten zusammensetzen. Die Eigenschaften eines Systems sind dabei auf die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten zurückzuführen (Emergenz), wobei die Komponenten wiederum Eigenschaften aufweisen, welche das System nicht besitzt (ebd., S. 20). Dieser Punkt ist essentiell wenn es schließlich um den „Sprung zu den Atomen“ (Buck et al., 2004) geht, da gerade hier die Gefahr besteht, makroskopische Eigenschaften auf die Ebene der Atome zu übertragen (vgl. Kapitel 2.3.3). Buck et al. (2004) weisen in diesem Zusammenhang auch auf die Bedeutung (elektronen-)mikroskopischer Aufnahmen zur Erkenntnisgewinnung und die Abgrenzung von Vergrößerungen, virtuellen Bildern und schließlich Modellen hin (ebd., S. 21). Jedes System ist zudem zugleich Komponente eines anderen Systems - bezogen auf das Beispiel Brot stellt beispielsweise die Hefe einerseits eine Komponente des Systems Brot dar, auf der anderen Seite ist sie selber ein aus zahlreichen Komponenten (beispielsweise den Zellorganellen) bestehendes System.

Der Systembegriff wird ebenso wie die von Buck umschriebene Emergenz der Eigenschaften von Meijer et al. aufgegriffen. In Abbildung 7.1 werden die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Systemkomponenten jedoch nicht angeführt. Allenfalls auf der Ebene der Disulfidbrücken wird von einer Wechselwirkung zwischen den Polypeptidketten ausgegangen. Da Meijer den einzelnen Aminosäuren jedoch keinen zusätzlichen Erklärungswert beimisst (s.o.), bleibt die Betrachtung von Wechselwirkungen relativ unkonkret. Die Emergenz von Eigenschaften aus den Wechselwirkungen von Systemkomponenten wird zwar allgemein thematisiert (vgl. z.B. Meijer et al., 2013b,

422, Meijer, 2011, 28, 129), allerdings in Bezug auf die konkreten Beispiele kaum expliziert. Parchmann et al. greifen Meijers Ansatz auf und stellen darauf aufbauend ein Stufenmodell vor, in welchem verallgemeinert eine schrittweise Erweiterung des Struktur-Eigenschaftskonzeptes beschrieben wird (vgl. Abbildung 7.2). Zusätzlich zu den obenstehenden Ausführungen von Meijer et. al., bei welchen verschiedene Meso-Strukturen (bei Parchmann et al. die Stufe „Bausteine“) ins Zentrum gestellt werden, halten Parchmann et al. (2010) in einem ersten Schritt die Abgrenzung der Eigenschaften von Dingen zu denen der Stoffe, aus denen sie bestehen, für bedeutsam. Die Differenzierung von Gegenstand und Stoff stellt insbesondere für jüngere Schüler_innen ein Problem dar (Strunk, 1999, Schmidt, 2010; vgl. Kapitel 2.3.3). Weiterhin wird nicht nur die Struktur des Stoffes auf unterschiedlichen Ebenen beachtet, sondern auf der fünften Stufe auch die „Umgebung“ mit einbezogen. Das den Stoff umgebende System beeinflusst dessen Eigenschaften, da es die Wechselwirkungen zwischen den Verbindungen verändern kann (Herzog et al., 2015, 33). Mit den beiden zuletzt beschriebenen Stufen („Strukturen“ und „Systeme in Umgebungen“) versuchen Parchmann et al. die in Meijers Abbildungen kaum beachteten Wechselwirkungen innerhalb eines Systems (Bindungen) und zwischen System und Umgebung mit einzubeziehen. Allerdings resultiert dieses Vorgehen meines Erachtens in einem Bruch in der Abfolge der Stufen. Bis einschließlich der vierten Stufe entspricht das Vorgehen dem bei Meijer vorgestellten *stepwise zooming in* - durch den Einbezug der Umgebung, wird der Blick jedoch wieder auf eine übergeordnete Ebene gerichtet. Das Modell befindet sich in weiterer Entwicklung, z.B. fügen Schwarzer et al. (2013) in Bezug auf Nanostrukturen mit den „größenabhängigen Eigenschaften“ der Abbildung 7.2 eine weitere Stufe hinzu. Eine Kompetenz im Umgang mit dem

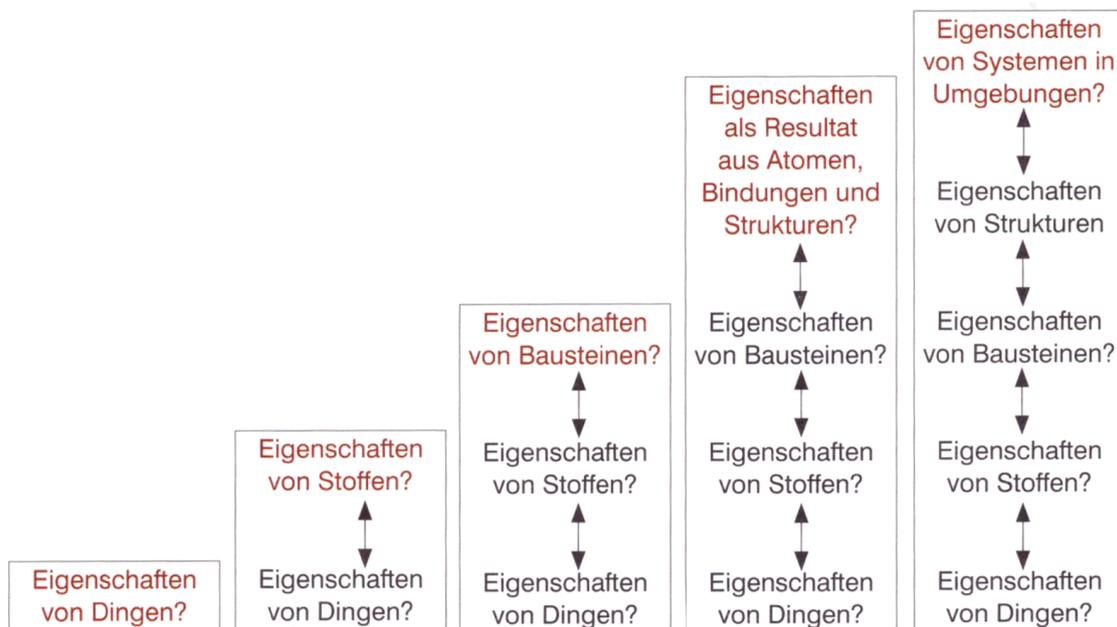


Abbildung 7.2.: **Postulierte Struktur des Struktur-Eigenschaftskonzeptes** (verändert nach Herzog et al., 2015, Herzog und Parchmann, 2016)

Struktur-Eigenschaftskonzept besteht nach Parchmann et al. (2010) auch darin, jene Ebenen zu

identifizieren, zwischen denen eine Beziehung das höchste Potenzial bietet eine bestimmte Eigenschaft zu deuten. So müssen bezogen auf ein, bestimmtes Phänomen nicht zwangsläufig alle Stufen Beachtung finden (Parchmann et al., 2010, 9).

Inwiefern die hier aufgeführten Überlegungen weitere Interpretationsmöglichkeiten für die Ergebnisse ergeben und welche Folgerungen hinsichtlich Eignung des Phänomens Formbarkeit von Lehm für chemisches Lernen abgeleitet werden können, wird nachfolgend erörtert.

7.2.3. Struktur-Eigenschaftsbeziehungen bezogen auf die Formbarkeit von Lehm

Wie bereits bei der Diskussion zu den intuitiven Konzepten dargelegt (Kapitel 7.1), scheint bei den teilnehmenden Kindern der AG ein Übergang von der Sicht auf Lehm als kontinuierliche Masse zu der Wahrnehmung eines partikulären Aufbaus stattzufinden. Da es sich bei den Äußerungen, aus denen diese Vorstellungen abgeleitet wurden, stets um Erklärungen zur Eigenschaft Formbarkeit handelt, wird so zugleich offenbar, dass zu Beginn kaum ein Zusammenhang zwischen der Eigenschaft und dem Aufbau des Stoffes hergestellt wird (\rightarrow Ergebnisse 2a, 2b) (in Bezug auf Sand war dies teilweise der Fall (vgl. auch Kapitel 6.3.1)). Betont wurde bereits die Bedeutung, die der Betrachtung des Gefüges Lehm in diesem Zusammenhang womöglich zukommt (\rightarrow Ergebnisse 2c, 2d). Die Kinder argumentieren somit auf verschiedenen Ebenen: Der Ebene des Stoffes, der des Gefüges und der der Bestandteile.

Unter Berücksichtigung der vorstehenden Ausführungen zu den Ebenen des Struktur-Eigenschafts-Konzeptes und unter Einbezug der Vorstellungen der Kinder erscheint eine Formulierung verschiedener Betrachtungsebenen für das Phänomen Formbarkeit aus didaktischer Sicht als überaus vielversprechend.

In Abbildung 7.3 sind auf Basis der fachlichen wie kindlichen Perspektive potenziell relevante Ebenen dargestellt.³⁹ So ist die Formbarkeit des Lehms darauf zurückzuführen, dass dessen Bestandteile aneinander kleben und sich zugleich gegeneinander verschieben lassen. Diese Ebene spiegelt die hier unter dem Begriff *Gefüge* gefasste Auffassung wider. Auf einer abstrakteren Ebene wird das Kleben durch ein Verbinden der größeren Bestandteile über die Tonminerale erklärt (Partikelebene). Die Tonminerale zeichnet eine geringe Korngröße und eine plättchenförmige Struktur aus, Eigenschaften, die die Ausbildung eines dichten Gefüges ermöglichen (Tonmineralebene - Schichtpaketstöße). Die plättchenförmige Struktur der Tonmineralteilchen ist wiederum auf Wechselwirkungen zwischen den Schichtpaketen (Tonmineralebene - Schichtpakete) und letztlich auf die Struktur der Silikatschichten und die einhergehende Oberflächenladung zurückzuführen (Schichtebene).

In Form von *wenn...dann*-Formulierungen (vgl. Meijer, 2011, 40, Scheffel et al., 2010) lassen

³⁹Während die ersten Stufen auf den Untersuchungsergebnissen beruhen, sind die weiterführenden, zunehmend abstrakteren Ebenen Resultat der fachlichen Klärung. Diese erscheinen für den Primarbereich noch nicht relevant. Die hier vorgestellten Überlegungen können aber die Grundlage für weitere Studien darstellen. Beispielsweise könnte untersucht werden, inwiefern ältere Schüler_innen in der Lage sind, die Formbarkeit auf die hier aufgezeigten Strukturen zurückzuführen oder ob gegebenenfalls aus der Lernendenperspektive heraus weitere relevante Mesoebenen formuliert werden können.

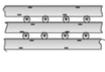
Maßstab (m)	Struktur	Eigenschaften	Ebene
		<i>Formbar</i>	Stoff
10^{-2}		<i>Kleben der Bestandteile aneinander</i>	Gefüge
$10^{-2}-10^{-6}$		<i>Verbinden der Sandpartikel über Tonbestandteile</i>	Partikel
10^{-6}		<i>Geringe Größe und plättchenförmige Struktur der Tonminerale</i>	Tonmineral (Schichtpaketstoß)
$10^{-6}-10^{-9}$		<i>Wechselwirkende Schichtpakete</i>	Tonmineral (Schichtpaket)
10^{-9}		<i>Schichtartiger Aufbau/geladene Oberflächen</i>	Schichtstruktur

Abbildung 7.3.: **Struktur-Eigenschaftsbeziehungen anhand der Formbarkeit von Lehm** auf verschiedenen Ebenen.

sich Beziehungen zwischen den Strukturen und den entsprechenden Eigenschaften ausdrücken. Beispielhafte Aussagen könnten lauten: „Wenn der Lehm besonders viel Ton enthält, ist er gut formbar“ (Ebenen Bestandteile(Partikel)-Stoff) oder „Wenn die Tonminerale eine geringe Größe und eine plättchenförmige Struktur aufweisen, haften sie gut aneinander und lassen sich gegeneinander verschieben“ (Ebenen Tonminerale-Gefüge).

Die Kinder argumentieren dabei zunächst häufig auf der ersten Ebene (der des Stoffes) und wählen alternative Eigenschaften anstelle einer Struktur zur Erklärung der plastischen Eigenschaft (→ Ergebnis 1a). Damit kann zunächst nicht von einem Struktur-Eigenschaftskonzept gesprochen werden. Teilweise wird entweder bereits zu Beginn oder später im Verlauf des Kurses jedoch die zweite Ebene fokussiert, wie Äußerungen der Kategorie „Gefügebene“ zeigen. Da das „Kleben“ eine Eigenschaft auf einer Ebene höheren Abstraktionsniveaus darstellt, kann dies auch einen Grund für die Ausbaufähigkeit dieses Konzeptes darstellen (→ Ergebnis 2e). Durch den Kurs argumentieren am Ende deutlich mehr Kinder mit den Bestandteilen an sich, zum Teil wird auch die Korngröße mit einbezogen (→ Ergebnis 2f). Das Phänomen lässt sich damit auf unterschiedlichen Ebenen erklären und - wie durch die vorliegende Untersuchung gezeigt - werden diese auch seitens der Kinder aufgegriffen.

Analog den von Meijer und Bulte entwickelten Darstellungen sind in Abbildung 7.3 zunächst nur die Ebenen der Struktur des Stoffes aufgeführt; nicht berücksichtigt sind in diesem ersten Schritt die Wechselwirkungen mit dem Wasser. Diese spielen jedoch aus fachlicher wie kindlicher Perspektive eine bedeutende Rolle (vgl. Kapitel 3.2.2 und Ergebnisse 1a, 2g,2f). Weiterhin wird ein Verständnis der Emergenz von Eigenschaften durch Wechselwirkungen der einzelnen Komponenten auch aus didaktischer Hinsicht als relevant erachtet (s.o.). Insbesondere die Wechselwirkungen zwischen Wasser und den Lehmbestandteilen sind von Bedeutung.

7. Diskussion

Wie in Abbildung 7.4 dargestellt können auch die Lehm-Wasser-Wechselwirkungen auf verschiedenen Ebenen formuliert werden. Diese reichen von der makroskopischen, stofflichen Ebene (Lehm ist nur formbar, wenn Wasser hinzugegeben wird) bis zur submikroskopischen Ebene, auf welcher verschiedene Bindungstypen (z.B. elektrostatische Wechselwirkungen, Wasserstoffbrückenbindungen) relevant sind. Während bei einer ausschließlichen Betrachtung des Lehms (Abbildung 7.3) ein Einbezug weiterer abstrakterer Ebenen (wie bei Meijer, 2011, s.o.) kein zusätzliches Erklärungspotenzial bietet, so ist es in Hinblick auf die Wechselwirkungen durchaus sinnvoll, auch die Struktur der Tonminerale auf atomarer Ebene zu berücksichtigen. So können an die Sauerstoffionen der Tonmineraloberflächen Wassermoleküle über Wasserstoffbrückenbindungen angelagert werden. Hier spiegelt sich die makroskopische Lehm-Wasser-Bindung auf atomarer Ebene wider. Damit sind auch die makroskopisch wahrnehmbaren Zusammenhänge auf die atomare Ebene ohne Bruch übertragbar. Über die atomare Ebene wird auch die Ladung der Tonmineraloberflächen erklärbar, welche wiederum in der Ein- bzw. Anlagerung von Kationen resultiert (vgl. Kapitel 3.2.2). Die Hydratation der Kationen trägt maßgeblich zur Wasserbindung bei.

Es wird deutlich, dass die in den Abbildungen 7.3 und 7.4 dargestellten Zusammenhänge wechselseitig aufeinander bezogen werden müssen, um die Formbarkeit vollständig zu erfassen.

Es wird deutlich, dass die in den Abbildungen 7.3 und 7.4 dargestellten Zusammenhänge wech-

Struktur	Eigenschaften
Lehm – Wasser	<i>Lehm ist mit Wasser formbar.</i>
Bestandteile – Wasser	<i>Die Bestandteile kleben mit Wasser aneinander.</i>
Ton – Wasser	<i>Ton kann viel Wasser aufnehmen.</i>
Tonmineraloberfläche – Wasser(moleküle)	<i>Wasserummantelte Oberflächen lassen sich leicht gegeneinander verschieben.</i>
Negativ geladene Oberfläche – Kationen – Wassermoleküle	<i>Wassermoleküle werden an der Tonmineraloberfläche adsorbiert.</i>

Abbildung 7.4.: **Wechselwirkungen und emergierende Eigenschaften anhand der Formbarkeit von Lehm** auf verschiedenen Ebenen

selseitig aufeinander bezogen werden müssen, um die Formbarkeit vollständig zu erfassen.

Die Bedeutung des Wassers ist den Kindern bereits zu Beginn des Kurses bewusst (→ Ergebnis 1a). Es wird als für die Formbarkeit notwendig erachtet; die entsprechenden Aussagen werden von den Kindern jedoch zumeist nicht weiter spezifiziert. Das Auftauchen der Kategorie „Andeutung einer Wechselwirkung“ im zweiten Kurs (→ Ergebnis 2g) zeigt, dass das Erkennen und auch das Formulieren einer Wechselwirkung durchaus möglich ist. Allerdings lag der Fokus während der

Kurse rückblickend zu wenig auf dem Herausarbeiten dieser Wechselwirkungen. Da das Wasser bereits zu Beginn der Kurse im Fokus der Kinder lag, wurden während der Kurse keine Interventionen durchgeführt, durch welche die Bedeutung des Wassers *explizit* in den Vordergrund gestellt wurde (eine Ausnahme stellt hier das Modellexperiment mit Hilfe der Glasplättchen im ersten Kurs dar). Als Folge bleibt es bei den Aussagen der Kinder zumeist bei der Beschreibung der Notwendigkeit der Wasserzugabe, ohne die Beziehung zum Lehm zu konkretisieren.

Die Betrachtung der Wechselwirkungen hat bezogen auf Lehm den Vorteil, dass auch diese auf verschiedenen Ebenen erfolgen kann, allerdings lässt sie sich deutlich schlechter abbilden. Können bei der ausschließlichen Betrachtung der Bestandteile des Lehms, wie in Abbildung 7.3 geschehen, (elektronen)mikroskopische Aufnahmen zur Veranschaulichung eingesetzt werden, so ist dies für die Wechselwirkungen zwischen Wasser und den Bestandteilen nicht möglich. Hier muss Modellen ein größerer Raum eingeräumt werden (s.u.).

Unter Rückbezug auf die Überlegungen von Parchmann et al., die die Umgebung von Systemen mit einbeziehen, kann Wasser auch als ein äußerer Faktor aufgefasst werden. Die Ergebnisse zeigen, dass Kinder diese externe Bedingung (das Vorhandensein von Wasser) intuitiv benennen. Wie aus Abbildung 7.4 in Bezug auf Lehm offensichtlich, ist diese Umgebung jedoch auf verschiedenen Ebenen von Bedeutung und muss nicht - wie bei Parchmann et al. vorgeschlagen - erst im Anschluss an die Betrachtung submikroskopischer Strukturen erfolgen.

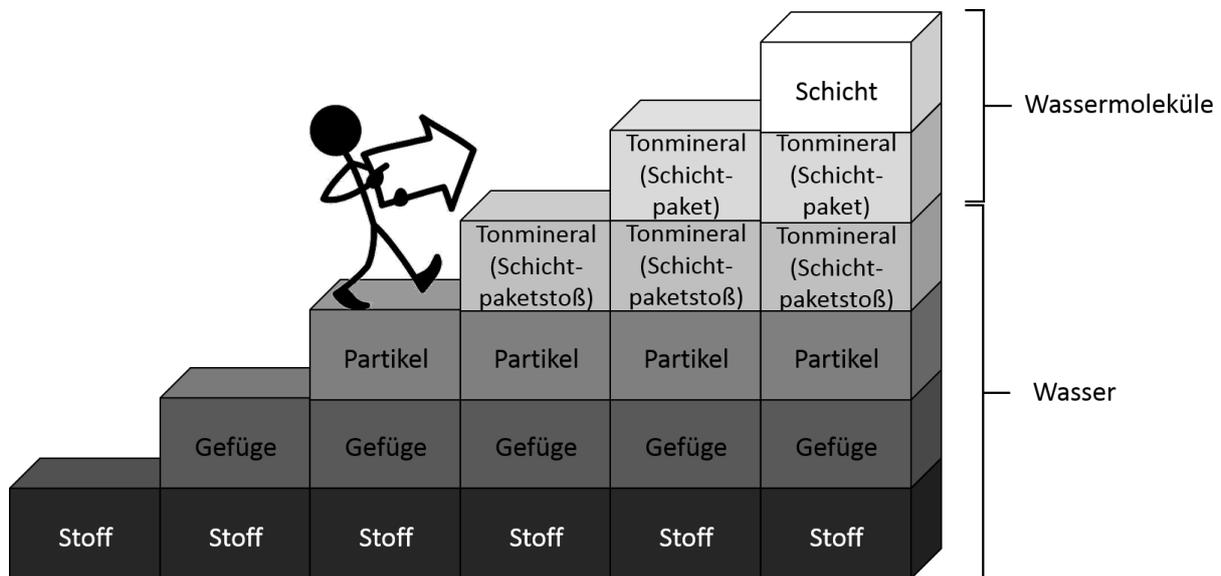


Abbildung 7.5.: **Strukturen und Wechselwirkungen auf unterschiedlichen Ebenen**

In Abbildung 7.5 werden in Anlehnung an Parchmann et al. die Ebenen aus 7.3 in einem Stufenmodell dargestellt. Die Wechselwirkungen mit dem Wasser sind dabei auf jeder Stufe von Bedeutung, wobei bei der Betrachtung der submikroskopischen Strukturen schließlich auch eine Betrachtung der Wassermoleküle anstelle des Stoffes erfolgt. Dies zeigt, dass zwar bezogen auf die Struktur des Lehms ein kontinuierliches „Hereinzoomen“ möglich ist, beim Wasser hingegen

ein Sprung zur molekularen Ebene erfolgen muss. Dieser muss allerdings erst dann stattfinden, wenn beim Lehm die Schichtpakete der Tonminerale betrachtet werden.

Ein Aspekt, der bei Parchmann in der ersten Stufe aufgegriffen wird, ist die Abgrenzung von Gegenständen und Stoffen (vgl. Abbildung 7.2). In der vorliegenden Untersuchung konnten keine Hinweise darauf gefunden werden, dass dies den Kindern Schwierigkeiten bereitete. Möglicherweise kann durch das Formen mit dem Lehm einer Vermischung dieser Ebenen sogar entgegengewirkt werden: aus einem Stoff können ganz offensichtlich unterschiedliche Gegenstände entstehen.

7.2.4. Schlussfolgerungen zum Struktur-Eigenschaftskonzept

Die vorstehenden Überlegungen weisen auf das Potenzial des Lerngegenstandes für das Anbahnen eines ersten Struktur-Eigenschaftskonzeptes hin. Besonders vielversprechend in Hinblick auf das Lernen chemischer Inhalte im Primarbereich ist die Möglichkeit, die Eigenschaft der Plastizität auf verschiedenen Ebenen erklären zu können. Damit können in der Grundschule zunächst Ebenen, welche ohne atomare oder molekulare Betrachtungen auskommen, gewählt werden. Später, im Sekundarbereich, ist es problemlos möglich an diese Erklärungskonzepte anzuknüpfen und auf eine abstraktere Ebene vorzudringen, ohne bereits erworbenes Wissen revidieren zu müssen. Durch dieses Vorgehen kann einem häufig auftretenden Problem entgegengewirkt werden: werden bereits früh Atome als kleinste Bestandteile zur Erklärung von Phänomenen eingeführt, so besteht die Gefahr, Fehlvorstellungen zu erzeugen. Die „Andersartigkeit“ der Atome kann kaum verstanden werden; ebenso wenig kann eine Differenzierung der Teilchen in Atome, Ionen oder Moleküle erfolgen. So besteht die Gefahr der Ausbildung hausgemachter Fehlvorstellungen, wie zum Beispiel der Übertragung makroskopischer Eigenschaften auf die Atome (vgl. Kapitel 2.3.3; Barke, 2006). Ein rein phänomenorientierter Sachunterricht kann allerdings ebenso wenig eine Lösung sein, wird doch gefordert, anschlussfähiges Wissen zu generieren und belastbare Vorstellungen und Konzepte zu entwickeln (Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU), 2013, 10). Dabei geht es nicht darum, Inhalte der Sekundarstufe in die Grundschule vorzuverlegen. Vielmehr sollen Voraussetzungen geschaffen werden, die das Lernen später erleichtern (Stern und Möller, 2004). Vor diesem Hintergrund erscheint es sinnvoll, ein zentrales Prinzip der Chemie in den Blickpunkt zu rücken: Eigenschaften sind auf Strukturen zurückzuführen. Da sich durch ein Verständnis dieses Konzeptes zugleich die Frage nach dem „Sinn“ des Teilchenkonzeptes (der sich, wie unter 7.1 beschrieben, Schüler_innen häufig nicht erschließt) erübrigt, kann dieses Vorgehen auch das Erlernen des Teilchenkonzeptes, wie in der Sekundarstufe I gefordert, erleichtern. Damit ist zu überlegen, ob nicht das Struktur-Eigenschaftskonzept unter Einbezug von Mesostrukturen verstärkt unter der naturwissenschaftlichen Perspektive des Sachunterrichts berücksichtigt werden sollte. Die Formbarkeit von Lehm kann hier *ein* Beispiel darstellen; mehrere exemplarische Phänomene müssten erarbeitet werden, um ein solches Konzept anbahnen zu können. Diese könnten Inhalte ablösen, welche häufiger im Sachunterricht behandelt werden, aber einer submikroskopischen Deutung bedürfen (z. B. das Lösen von Salz oder das Verdunsten

von Wasser⁴⁰ (vgl. Wodzinski, 2011a)).

Eine weitere Überlegung betrifft die Basiskonzepte im Chemieunterricht. Interessanterweise wird für den Biologie-, Physik- sowie den Geographieunterricht das Basiskonzept „System“ als zentral angesehen. Obwohl über Basiskonzepte auch eine fachübergreifende Vernetzung stattfinden soll, ist dieses Konzept für den Chemieunterricht nicht formuliert worden. Grund hierfür ist möglicherweise die starke Ausrichtung der Schulchemie auf submikroskopische Entitäten. Auch in Hinblick auf die Bedeutung von Strukturen auf Makro- oder Mesoebene in der Anwendungswissenschaft Chemie und in Kontexten des Alltags macht aber ein Einbezug mehrerer Ebenen und damit ein System-Ansatz Sinn.

7.3. Neustrukturierung des Lerngegenstandes

Im Rahmen der theoretischen Bezugnahme auf das Dortmunder Modell fachdidaktischer Entwicklungsforschung (Kapitel 2.1) wurde eine schülerorientierte erste Strukturierung des Lerngegenstandes mit Fokus auf chemisches Lernen als Ziel der Arbeit gesetzt. In diesem Kapitel wurde bereits eine erste Strukturierung des Phänomens Formbarkeit auf Basis von fachlichen Überlegungen und den Konzepten der Schüler_innen vorgenommen. Darauf aufbauend sollen nun, unter Einbezug praktischer Erfahrungen aus den Kursen, Vorschläge für eine praktische Umsetzung entwickelt werden. Im Sinne des Dortmunder Modells fachdidaktischer Entwicklungsforschung (vgl. Kapitel 2.1) ist diese Struktur nicht als Endergebnis zu betrachten, sondern stellt als Teil des zyklischen Prozesses ein erstes Design dar, welches in weiteren Untersuchungen zu evaluieren und gegebenenfalls zu überarbeiten ist.

Die Abbildungen 7.3 und 7.4 stellen durch den stufenweisen Aufbau einen geeigneten Rahmen dar, um für die jeweiligen Ebenen Aktivitäten/Interventionen zu formulieren, welche zu einer Konzepterweiterung beitragen können. *Konzepterweiterung* impliziert hier die Formulierung einer Erklärung der Formbarkeit auf - den in Abbildung 7.5 dargestellten - zunehmend höheren Stufen. In Abbildung 7.6 sind zu jeder Stufe Interventionen aufgezeigt, die in diesem Sinne geeignet erscheinen und im Folgenden näher beschrieben werden. Viele der aufgeführten Aktivitäten wurden bereits in den Kursen erprobt, aber noch nicht systematisch evaluiert. Die Tonmineralebene wurde aufgrund des Alters der Probanden in der praktischen Umsetzung nicht berücksichtigt. Basierend auf den vorgestellten Ergebnissen erscheint es möglich, in der Grundschule bis zur Partikelebene und gegebenenfalls bis zur Ebene der Schichtpaketstöcke vorzudringen. Die weiteren Ebenen können darauf aufbauend in der weiterführenden Schule aufgegriffen werden. Inwiefern sich diese hier vorgeschlagenen Aktivitäten in der praktischen Umsetzung bewähren, bleibt zu untersuchen. Der Beitrag, den diese zur Konzepterweiterung leisten können, sowie die Analyse potenziell auftretender Schwierigkeiten steht daher noch aus. Wenn in Bezug auf einzelne Aktivitäten bereits Aussagen getroffen werden können, so werden diese im Zuge der untenstehenden

⁴⁰Unter der Prämisse, dass eine Erklärung der Phänomene im Fokus steht und nicht beispielsweise der Wasserkreislauf auf makroskopischer Ebene.

Beschreibung erwähnt.

Zudem sind bezogen auf die Ebenen...

- zentrale Erkenntnisse (*zE*),
- halbquantitative Beziehungen zwischen einer Struktur oder einer Wechselwirkung und einer übergeordneten Eigenschaft (*SE*) und
- halbquantitative Beziehungen zwischen der Struktur und der Wechselwirkung auf einer Ebene (*SW*)

formuliert, welche mit den Schüler_innen erarbeitet werden können.

In Abbildung 7.6 sind die Strukturebenen und die Wechselwirkungen analog dem zuvor gewählten Vorgehen getrennt aufgeführt. Selbstverständlich ist das Wasser bei vielen Aktivitäten, welche die Struktur betreffen, ebenfalls von Bedeutung. Die Zuordnung erfolgte nach dem Lernziel-Schwerpunkt: Bei den in der linken Spalte aufgeführten Aktivitäten steht also die Untersuchung der Zusammensetzung des Lehms im Vordergrund, während die Wechselwirkung von Lehm (bzw. dessen Bestandteilen) und Wasser bei den in der rechten Spalte aufgeführten Aspekten den Schwerpunkt darstellt.

Stoffebene

Auf der Stoffebene steht zunächst die praktische Erfahrung der Plastizität im Vordergrund. Dabei können kleine Skulptur- und Bauprojekte realisiert werden. Lehm wird ausgegraben, aufbereitet und verarbeitet. Im Tun erkennen die Kinder, dass Lehm nur im feuchten Zustand plastisch verformbar ist. Zugleich wird beim Formen implizit vermittelt, dass aus einem Stoff verschiedene Dinge entstehen können (Übergang Ding-Stoffebene, s.o.). Ein Experiment, welches bereits auf dieser Ebene vorbereitend die unterschiedliche Wechselwirkung der Bodenarten mit Wasser verdeutlichen kann, ist die Bestimmung des Wassergehaltes von Bodenproben. Dabei wird der Masseverlust erdfeuchter Bodenproben bei einer Trocknung bei 105 °C bestimmt.⁴¹

Zentrale Erkenntnisse und Zusammenhänge dieser Ebene lassen sich somit wie folgt formulieren:

- Wenn ich Wasser zu trockenem Lehm gebe, dann kann ich diesen formen. (*SE*)
- Erdfeuchter Lehmboden enthält mehr Wasser als erdfeuchter Sandboden. (*zE*)

Gefügebene

Über eine Beschreibung verschiedener Bodenproben kann im Anschluss eine Unterteilung der Gefügeformen erfolgen. Boden kann von Kindern beschrieben werden: einzeln, bröckelig, zusammenhängend.

Auch eine Lupe oder ein Stereomikroskop können bei der genauen Betrachtung des Bodens hilfreich sein, um zu erkennen, dass auch ein scheinbar einheitliches Kohärentgefüge aus unterschiedlichen Bestandteilen besteht. Zudem bietet sich eine Fingerprobe an, bei welcher die Bodenart

⁴¹Im ersten Kurs wurde dieses Experiment ebenfalls durchgeführt (vgl. S. 56), da jedoch kein Trockenschrank vor Ort vorhanden war, erfolgt die Trocknung über zwei Wochen bei Raumtemperatur. Es fiel den Kindern im Kurs nicht schwer, die Massendifferenz auf den Wasserverlust zurückzuführen.

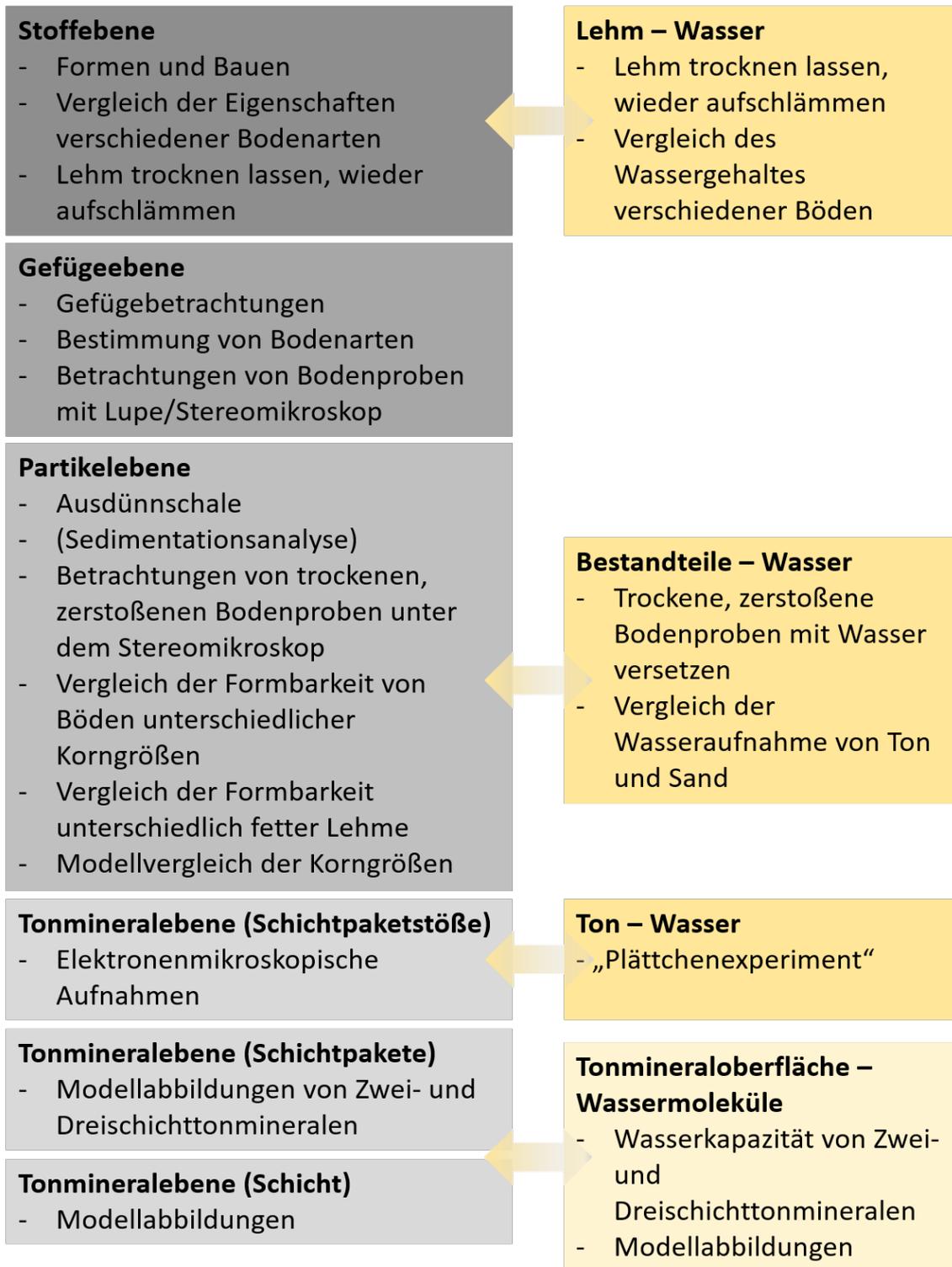


Abbildung 7.6.: **Aktivitäten zur Erarbeitung des Struktur-Eigenschafts-Konzeptes anhand der Formbarkeit von Lehm.** Grau hinterlegt: Zusammensetzung des Lehms steht im Vordergrund. Gelb hinterlegt: Wechselwirkung Wasser-Lehm steht im Vordergrund

ohne weitere Hilfsmittel grob bestimmt werden kann. In diesem Zuge können die Bodenarten zunächst über die unterschiedlichen Eigenschaften und nicht über die Zusammensetzung definiert werden.

Dabei müssen die Vorstellungen der Kinder zu den Begriffen Ton und Sand berücksichtigt werden. Hier ist es sicherlich hilfreich, wenn möglich, weiter auszuholen, um die Konzepte der Lernenden zu erweitern. In Hinblick auf Ton stellt beispielsweise die Besichtigung einer Tongrube eine Option dar, um eine Brücke zwischen dem Naturprodukt Ton und dem den Kindern bekannten (reinen) Töpferton herzustellen. Auch könnten an dieser Stelle Verwitterungsvorgänge thematisiert werden, um die Entstehung und das Vorkommen von Sand und Ton aufzugreifen.

Wie durch die vorliegende Untersuchung gezeigt, ist dieser Schritt zusammen mit dem nächstfolgenden essentiell, um Lehm als partikulär zu begreifen und zudem die Zusammensetzung als relevant für die Formbarkeit zu verstehen.

Zentrale Erkenntnisse und Zusammenhänge dieser Ebene:

- Wenn ein Boden eine zusammenhängende Masse (ein Kohärentgefüge) bildet, ist er zumeist formbar. (SE)

Partikelebene

Der Übergang von der Gefüge- zur Partikelebene fiel den Kindern schwer; wenn möglich sollten daher mehrere Aktivitäten gewählt werden, die helfen können, den Übergang zur Partikelebene zu erleichtern. Ziel ist nun, Lehm als Stoffgemisch zu begreifen und die einzelnen Bestandteile stärker in den Blickpunkt zu rücken. Um den partikulären Charakter des Lehms herauszustellen, kann das auf Seite 78 beschriebene Vorgehen der „Ausdünnenschale“ genutzt werden. Dieses Vorgehen wurde im zweiten Kurs erprobt. Dieser scheinbar unspektakuläre Versuch regt die Kinder zu zahlreichen Äußerungen an und scheint ihnen den Aufbau des Lehms aus einzelnen Bestandteilen gut zu verdeutlichen. Auch können in diesem Zuge Hilfsmittel zur optischen Vergrößerung der Bestandteile eingesetzt werden. Insbesondere Lupen und Stereomikroskope können den partikulären Charakter und die unterschiedliche Größe der Bestandteile den Lernenden verdeutlichen. Die Kinder können zwar keine einzelnen Tonpartikel sondern lediglich Aggregate erkennen; dies wird jedoch im Sinne des *“stepwise zooming in“* nicht als kritisch erachtet. Schließlich geht es auch darum zu vermitteln, dass etwas, was zunächst homogen aussieht, doch aus unterschiedlichen Bestandteilen zusammengesetzt sein kann. In einem ersten Schritt wurde dieses „Prinzip“ auf das Stoffgemisch Lehm angewendet, in einem zweiten kann es bezogen auf die Partikel erfolgen. Während der hier durchgeführten Intervention wurde den Maßstäben kaum Beachtung geschenkt und die Tatsache, dass es sich um Aggregate handelt, vernachlässigt, da dies für Kinder im Grundschulalter schwer vorstellbar ist. Inwiefern Größenskalierungen (wie auch in Abbildung 7.3 dargestellt) bereits früh explizit gemacht werden können und sollen, bleibt zu untersuchen.⁴² Die Sedimentationsanalyse stellt eine Möglichkeit dar, Lehm hinsichtlich der Korngrößen aufzu-

⁴²Meijer (2011) kommt in seiner Studie zu dem Schluss, dass insbesondere Größenordnungen kleiner 10^{-5} auch für 17-jährige Schüler_innen schwierig zu erfassen sind (S. 153).

trennen. Im Vorhinein wurde vermutet, dass dieses Vorgehen die Zusammensetzung aus unterschiedlich großen Bestandteilen anschaulich zeigt (auch da dieses Vorgehen in Praxishandreichungen zum Thema Boden auch für die Grundschule vorgeschlagen wird (vgl. z.B. Hellberg-Rode und Dehn, 2005, Roch, 2010)). Bei der Durchführung wurde offensichtlich, dass dieser Versuch für die Kinder nicht zwangsläufig als Auftrennung der Bestandteile nach ihrer Größe wahrgenommen wird. Da hier viele widersprüchliche Aussagen auftraten, wurden die Vorstellungen von Kindern zur Sedimentationsanalyse im Rahmen einer Staatsarbeit an einer Grundschule im Rahmen eines *teaching experiments* näher untersucht (Vormberg, 2014). Es wurde unter anderem gezeigt, dass der Fokus während des Versuches häufig eher auf der Färbung des Wassers denn auf der Sinkgeschwindigkeit bzw. dem Sediment liegt. Zwar wird durch die fortschreitende Klärung des Wassers schließlich auf das Absetzen der Partikel geschlossen, jedoch steht dabei häufig nicht die Schichtung im Vordergrund. Weiterhin wurde in einem vorgeschalteten Versuch pulverisierter Lehm mit Wasser versetzt, um eine plastische Masse zu erhalten. Dieses Vorgehen erschwert das Verständnis der Sedimentationsanalyse: Die Kinder sehen Wasser stärker als Binde- denn als Dispersionsmittel an. Das Wasser trägt demnach aus Sicht der Kinder dazu bei, die Bestandteile zu verbinden anstatt diese aufzutrennen und die Partikel sinken ihrer Ansicht nach durch die Aggregation schneller zu Boden. Die Ergebnisse zeigen auch, dass vor dem Einsatz der Sedimentationsanalyse deren Funktion - die Trennung von Bestandteilen - stärker in den Fokus gerückt werden muss. In weiteren überarbeiteten *teaching experiments* müsste daher überprüft werden, inwiefern eine Abänderung des Vorgehens zu einem besseren Verständnis der Sedimentationsanalyse führen kann. Diese kann in höheren Jahrgangsstufe vermutlich ohne größere Verständnisschwierigkeiten eingesetzt werden.

Im Zuge der näheren Betrachtung der einzelnen Bestandteile können diese auch sprachlich von dem zuvor im Zentrum stehenden Stoff abgegrenzt werden. In der vorliegenden Untersuchung wurde der Begriff „Teilchen“ gewählt: Lehm besteht aus Sand-, Schluff- und Tonteilchen, welche sich in ihrer Größe unterscheiden und unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Alternativ wäre denkbar, von einzelnen „Partikeln“ zu sprechen, wobei fraglich ist, welche Vorstellungen Grundschüler_innen zu dem Begriff haben.

Unter Rückbezug auf das System-Konzept (s.o.) wird offensichtlich, dass die Komponenten eines Systems andere Eigenschaften aufweisen als das System an sich. So unterscheiden sich die Eigenschaften der Komponenten Sand und Ton beispielsweise in der Formbarkeit vom System Lehm. Auch die einzelnen Partikel weisen eigene Eigenschaften auf: als Beispiel sei die unterschiedliche Härte von Sand- und Tonteilchen genannt.

Zentral für einen Rückbezug zu der plastischen Eigenschaft des Lehms ist die unterschiedliche Korngröße der Bestandteile. Für das Erkennen der Struktur-Eigenschaftsbeziehung bietet sich ein Vergleich der Formbarkeit von Materialien/Bodenarten unterschiedlicher Korngröße an, wie im beschriebenen *teaching experiment* geschehen (S. 83). In einem weiteren Schritt könnte eine Übertragung auf Lehme mit unterschiedlichem Tonanteil (fettem wie magerem Lehm) erfolgen. Hier könnten Vorhersagen über die Ausprägung der Plastizität basierend auf (einfachen) Über-

legungen zur Zusammensetzung erfolgen.

Auch im Modell lassen sich die Korngrößenverhältnisse veranschaulichen: Symbolisiert eine Erbe ein Tonmineral, so ist ein Sandkorn in etwa bei der Größe eines Basketballs anzusiedeln. Ein Schluffkorn entspräche in etwa der Größe eines Tischtennisballs.

Zugleich muss auf dieser Ebene eine Betrachtung der Wechselwirkung zwischen den Bestandteilen und Wasser erfolgen. Dazu kann in einem ersten Schritt getrockneter Lehm zerbröseln werden, um im Anschluss die einzelnen Aggregate durch Wasserzugabe aneinander zu fügen (zu „kleben“).⁴³ Auch ist es sinnvoll, bei der Überprüfung der Formbarkeit verschiedener Korngrößen (s.o.), trockene Materialien zu verwenden, um die Auswirkungen der Wasserzugabe beobachten zu können. Dieser einfache Versuch lässt sich experimentell erweitern: zu einer bestimmten Menge trockener, grob zerstoßener Bodenproben (Sand- und Lehm-/Tonboden) wird soviel Wasser gegeben, bis der Boden gesättigt ist. Der Vergleich der aufgenommenen Wassermenge zeigt, dass Ton in der Lage ist, besonders viel Wasser aufzunehmen.⁴⁴

Zentrale Erkenntnisse und Zusammenhänge dieser Ebene:

- Lehm setzt sich aus Teilchen unterschiedlicher Korngröße zusammen. (*zE*)
- Je kleiner die Bestandteile, desto besser ist der Boden formbar. (*ES*)
und damit verbunden:
Je größer der Tonanteil im Lehm, desto besser lässt sich dieser formen. (*ES*)
- Wenn eine Bodenart sehr viel Wasser aufnehmen kann, ist sie gut formbar. (*SE*)
- Wenn die Bestandteile über Wasser verbunden werden, dann ist der Boden scheinbar ungegliedert. (*SE*)
- Wenn Ton-, Schluff- und Sandteilchen über Wasser verbunden werden, kann man den Lehm formen. (*SE*)

Tonmineralebene (Schichtpaketstöße)

Um auf die Ebene der einzelnen Tonminerale, die für die ausgeprägte Plastizität verantwortlich sind, überzugehen, erscheint die Verwendung elektronenmikroskopischer Aufnahmen sinnvoll.⁴⁵ Abbildung 7.7 zeigt, wie durch elektronenmikroskopische Aufnahmen eine schrittweise Annäherung an die Struktur der Tonminerale ermöglicht wird („*zooming in*“). Die Plättchenstruktur lässt sich auf Bildern, welche Tonminerale verschieden stark vergrößert abbilden, auf allen Ebenen erkennen. Zugleich wird deutlich, dass die aufgefächerte Struktur zu einer Vergrößerung der

⁴³Hier greift also das Konzept, welches die Kinder bei der Sedimentationsanalyse z.T. favorisierten.

⁴⁴In höheren Jahrgangsstufen kann hier mit Bezug zu der Strukturebene bereits ein Zusammenhang zwischen Korngröße und Oberfläche hergestellt werden. Die größere Oberfläche kann dann wiederum mit der Wasseraufnahme in Bezug gesetzt werden.

⁴⁵In den Kursen wurden diese auch eingesetzt, allerdings wurde nicht explizit untersucht, welche Vorstellungen die Kinder zu den Aufnahmen entwickelten. Generell wäre es in diesem Zusammenhang sicherlich sinnvoll gewesen, während der Interviews verstärkt nach der Herkunft der Vorstellungen zu fragen (bspw. könnten die von Emil aufgegriffenen „Zacken“ (Kapitel 6.3.5) möglicherweise auf die Verwendung der elektronenmikroskopischen Aufnahmen zurückgehen).

Oberfläche führt. Hier kann gegebenenfalls auch das Prinzip der Oberflächenvergrößerung (Verhältnisse bezogen auf platte oder kugelige Form) diskutiert werden. Um den Bezug zum Lehm herzustellen und den Abbildungsmaßstab zumindest relativ einordnen zu können, können Aufnahmen gezeigt werden, die sowohl ein Sandkorn als auch Tonminerale abbilden (vgl. Kapitel 5.3.1).

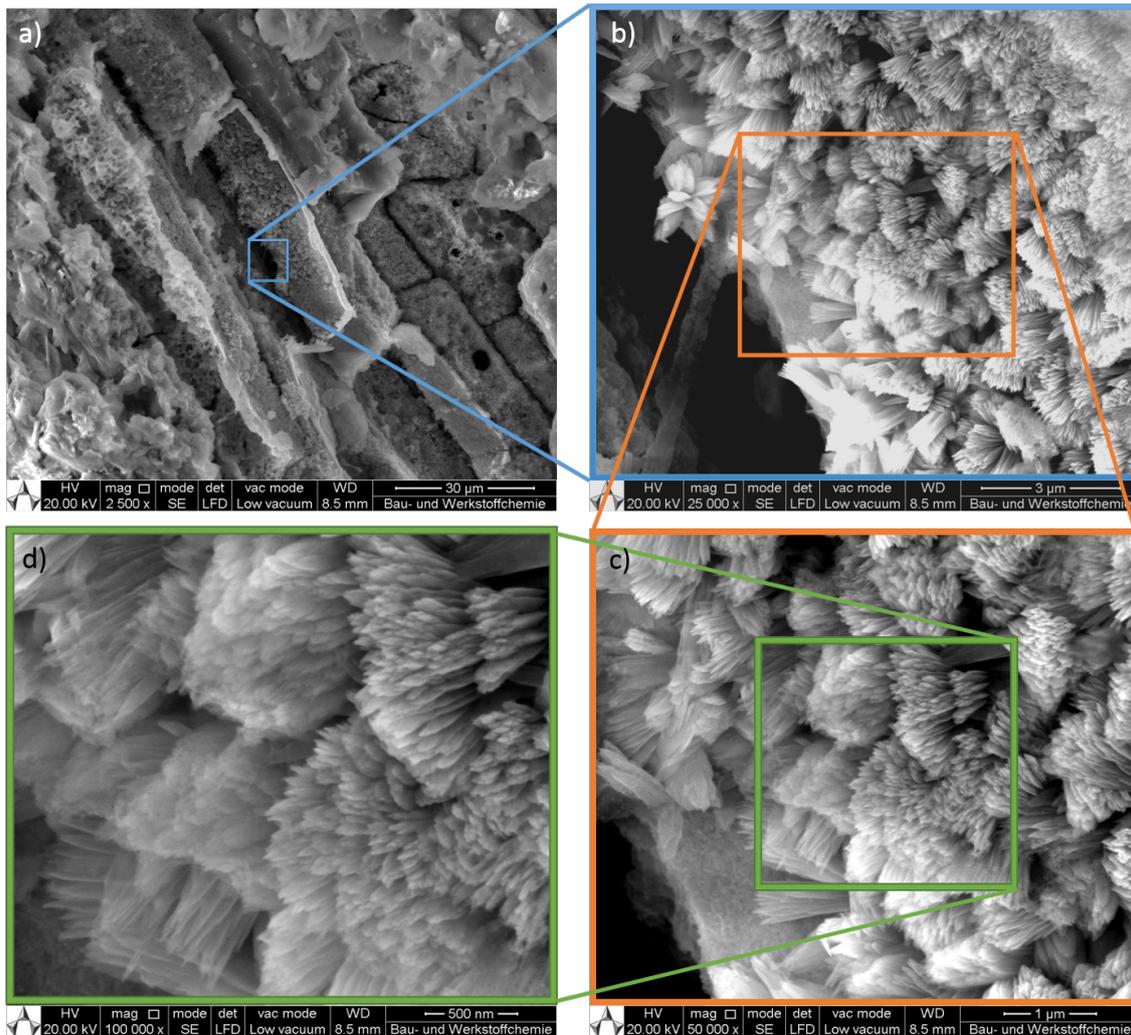


Abbildung 7.7.: **Elektronenmikroskopische Aufnahmen einer Lehmprobe.** Die Plättchenstruktur findet sich auf verschiedenen Vergrößerungsebenen. Von a) nach d) sind die markierten Ausschnitte jeweils vergrößert.

Aufnahmen angefertigt am Institut für Bau- und Werkstoffchemie der Universität Siegen (Mikroskop: Quanta 250 FEG – (ESEM))

Während die Struktur der Tonminerale über Abbildungen veranschaulicht werden kann, ist dies für die Wechselwirkung mit Wasser nicht leicht möglich. An dieser Stelle bietet sich gegebenenfalls das in Kapitel 5.3.1 auf Seite 57 beschriebene Modell mit Glasplättchen an. Durch dieses kann sowohl die Haftung als auch die Gleitfähigkeit der Tonminerale verdeutlicht werden. Wie generell beim Einsatz von Modellen sollte an dieser Stelle mit den Schüler_innen diskutiert werden, in welchen Punkten sich Modell und Wirklichkeit entsprechen und welche Grenzen das

Modell aufweist. Reflektiert werden sollte insbesondere die quadratische Form der Glasplättchen sowie die Tatsache, dass diese - im Gegensatz zu den Tonmineralen - nach dem Trocknen wieder auseinanderfallen. Bei den Tonmineralen ist das Zwischenschichtenwasser so fest gebunden, dass es bei Raumtemperatur nicht entweicht (vgl. Kapitel 3). Während beim Ton die Wasserbindung unter anderem über die Hydratation der Kationen erfolgt, liegen beim Glasmodell ausschließlich vergleichsweise schwache Wasserstoffbrückenbindungen und von-der-Waals-Bindungen vor. Zentrale Erkenntnisse und Zusammenhänge dieser Ebene:

- Tonteilchen haben (zumeist) eine plättchenförmige Struktur. (*zE*)
- Wenn die Tonteilchen eine plättchenförmige Struktur aufweisen, können sie viele Wassermoleküle (Wasserteilchen) anlagern. (*SW*)
- Wenn sich Wasserteilchen zwischen die Tonteilchen lagern, lassen sich diese gegeneinander verschieben. (*SE*)
- Wenn die Tonteilchen eine plättchenförmige Struktur aufweisen und Wasserteilchen zwischen die Tonteilchen angelagert werden, ist der Lehm gut formbar. (*SE*)

Tonmineralebene (Schichtpakete)

Auf der Ebene der einzelnen Schichtpakete wird eine Darstellung über mikroskopische Bilder schwierig. Hier muss auch auf der Strukturebene ein Übergang zu Modellen erfolgen. Dabei kann das bisher verfolgte stetige Vorgehen zu immer kleineren Strukturen insofern dienlich sein, als dass die Schüler_innen so möglicherweise eher davon ausgehen, dass der „sichtbaren“ Struktur der elektronenmikroskopischen Aufnahmen wiederum durch ein Elektronenmikroskop nicht sichtbare Strukturen zugrunde liegen.

Zunächst kann die plättchenförmige Struktur auf das Vorhandensein von verschiedenen Schichten zurückgeführt werden, deren Abfolge sich unterscheiden kann. Wenn bislang von den Tonteilchen gesprochen wurde, so wird jetzt erkennbar, dass auch diese nicht alle identisch sind, wie dies bereits beim Übergang von Lehm zu den einzelnen Partikeln sowie bei der Differenzierung der Partikel in Sand-, Schluff- und Tonteilchen der Fall war. Die Unterschiede zwischen Zwei- und Dreischichttonmineralen können durch Einbezug einfacher Strukturmodelle - welche zunächst ausschließlich die Schichtabfolge charakterisieren - aufgegriffen werden (ähnlich wie in Abbildung 3.4, S. 24 für die Dreischichttonminerale geschehen).

Die Wechselwirkungen auf dieser Ebene sollten daher erst dann aufgegriffen werden, wenn Atome, Ionen und Moleküle sowie die verschiedenen Bindungstypen den Lernenden bekannt sind. Auch die zwischen den Schichtpaketen auftretenden Bindungen bei Zwei- wie Dreischichtmineralen müssen bereits erarbeitet worden sein. Bei diesem Übergang kann dann wiederum ein experimentelles Vorgehen eingesetzt werden, bei welchem die unterschiedliche Wasserkapazität von Zweischicht- und Dreischichtmineralen ermittelt werden kann. Bei der Deutung des Experimentes kann - unter Rückbezug auf die strukturellen Unterschiede - die Gesamtoberflächengröße

mit einbezogen werden. Damit erfolgt auch diese Betrachtung auf verschiedenen Ebenen: in einem ersten Schritt (auf der Partikelebene) wird nur die äußere Oberfläche (Korngröße) beachtet, nun, auf der Ebene der Schichtpakete, werden auch die Zwischenschichten und damit die gesamte spezifische Oberfläche hinzugezogen. Zentrale Erkenntnisse und Zusammenhänge dieser Ebene:

- Wenn es sich um Dreischichttonminerale handelt, ist die spezifische Oberfläche besonders groß und es können viele Wassermoleküle gebunden werden. (*SW*)
- Wenn es zur Adhäsion zwischen den Tonmineralen und den Wassermolekülen kommt, kleben die Tonminerale aneinander/lagert sich viel Wasser ein. (*SE*)
- Wenn es sich bei den Tonmineralen um Schichtsilikate handelt, weisen sie eine plättchenförmige Struktur auf. (*SE*)

Schichtebene

Auf dieser Ebene kann auf Basis von Strukturmodellen der negative Ladungsüberschuss auf Substitution der Zentralionen zurückgeführt werden. Die Wechselwirkungen an der Oberfläche der Schicht mit den Kationen und bzw. oder den Wassermolekülen können erneut thematisiert werden; zudem kann eine Erweiterung um die Wirkung verschiedener Kationen auf die Plastizität erfolgen (vgl. Kapitel 3).

8. Zusammenfassung und Ausblick

Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit stellten Überlegungen zum naturnahen Chemieunterricht dar, welcher möglicherweise dazu beitragen kann, dem Antagonismus Chemie-Natur sowie der Unbeliebtheit des Schulfaches Chemie zu begegnen. Das Potenzial der Bodenart Lehm, in diesem Sinne in naturnaher Umgebung chemiebezogenes Lernen zu ermöglichen, stand im Zentrum der vorliegenden Arbeit. Als natürliches und weit verbreitetes Material ist Lehm Bestandteil der Lebenswelt von Kindern und seine Bedeutung für die Natur sowie die Nutzung als Bau- und Werkstoff lassen Lehm zu einem äußerst vielfältigen Lerngegenstand werden. Gerade für den Sachunterricht der Grundschule kann die Auseinandersetzung mit Lehm perspektivübergreifend vielfältige Lerngelegenheiten bieten. Ob darüber hinaus durch die intensive Auseinandersetzung mit dem Lerngegenstand ausbaufähiges, chemiebezogenes Lernen bei Kindern im Grundschulalter ermöglicht werden kann, wurde in der vorliegenden Arbeit untersucht.

Angelehnt an das Dortmunder Modell fachdidaktischer Entwicklungsforschung wurden zur ersten Spezifizierung und Strukturierung des Gegenstandes auf der fachlichen Klärung des Lerngegenstandes basierende Überlegungen zu möglichen Bildungsinhalten angestellt und zugleich die Perspektiven der Lernenden in den Blick genommen. Da bislang nur wenige Untersuchungen zum Thema vorliegen, wurde ein qualitatives Vorgehen gewählt. Die Erhebung wurde zudem breit angelegt, das heißt, alle potenziell für chemiebezogenes Lernen gewinnbringenden Phänomene flossen in die Untersuchung ein, um keine Vorab-Reduktion vorzunehmen, bei welcher die Perspektive der Kinder nicht berücksichtigt wird. Im Rahmen der Studie zu der Perspektive der Lernenden auf den Lerngegenstand wurden in zwei aufeinanderfolgenden Jahren problemzentrierte Interviews und *teaching experiments* zu Eigenschaften des Lehms mit Grundschulkindern durchgeführt. Während im ersten Kurs der Schwerpunkt auf der Untersuchung der vorhandenen oder beim Umgehen mit Lehm konstruierten Vorstellungen lag, wurden im zweiten Kurs - basierend auf der Analyse der Interviewtranskripte des ersten Erhebungszeitraums - verstärkt auch ein Ausbau der vorhandenen Vorstellungen (beispielsweise durch den Einsatz von *teaching experiments*) forciert. Die Erhebungen fanden jeweils im Rahmen von AGs im Freilandlabor FLEX statt.

Nach einer ersten Sichtung der Interviewdaten wurde eine genauere Betrachtung der Lernendenäußerungen zur Eigenschaft „Formbarkeit“ als besonders vielversprechend in Hinblick auf chemiebezogenes Lernen bewertet und die Daten einer qualitativen Inhaltsanalyse unterzogen.

Wie im fachlichen Teil dargelegt, beruht die Formbarkeit auf den Faktoren

- Korngröße bzw. spezifische Oberfläche der Teilchen,

- Teilchenform und -struktur *sowie*
- Wechselwirkungen der Teilchen mit Wasser

Die Eigenschaft Formbarkeit lässt sich damit auf die Bestandteile und deren Wechselwirkungen zurückführen. Aus fachdidaktischer Sicht, stellt sie damit ein Beispiel für das Basiskonzept „Struktur-Eigenschafts-Beziehung“ dar.

Um die ausgeprägte Plastizität des Lehms für die Kinder herauszustellen, wurde das nichtplastische Verhalten von Sand in den Interviews gegenübergestellt. Die kategorienbasierte Auswertung der Daten offenbarte, dass die Kinder die unterschiedlich ausgeprägte Formbarkeit in erster Linie

- über andere Eigenschaften der Stoffe (Sand und Lehm),
- über das Vorhandensein von Wasser *und*
- über die Bestandteilen des Sandes (Steine, Körner etc.)

begründen. Es wird deutlich, dass mit dem Wasser ein relevanter Aspekt genannt wird und die Kinder durch das Nachdenken über das Phänomen Formbarkeit auch weitere Stoffeigenschaften beschreiben, die Bestandteile des Lehms jedoch keine Rolle spielen. Beim Sand hingegen wird teilweise über diese argumentiert.

Es konnte gezeigt werden, dass am Ende des ersten Kurses, in welchem Eigenschaften und Bestandteile des Lehms thematisiert wurden, mehr Kinder auch die Bestandteile des Lehms aufgreifen, wobei die Argumentation über die Eigenschaften und das Wasser weiterhin überwiegt. Es scheint zudem, dass Kinder Lehm eher als homogene Masse denn als Stoffgemisch betrachten. Dies zeigt sich insbesondere in Äußerungen, welche unter der Kategorie „Gefügebene“ zusammengefasst sind. Demnach wird Sand über separate Teilchen definiert, während Lehm als einheitliche Masse angesehen wird. Dies zeigt auch, weshalb nur beim Sand die Bestandteile eine Rolle in der Argumentation der Kinder spielen.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde im darauffolgenden Jahr u.a. ein *teaching experiment* durchgeführt, durch welches die Bedeutung der Korngröße für die Formbarkeit herausgestellt werden sollte. Es beinhaltete einen Vergleich der Plastizität von Materialien unterschiedlicher Korngröße. Die Analyse der Interviewdaten mit Hilfe des im ersten Durchgang erstellten Kategoriensystems bestätigt die zuvor gewonnenen Erkenntnisse und weist darüber hinaus darauf hin, dass durch dieses Vorgehen häufig eine Erweiterung der ursprünglichen Vorstellungen zugunsten des Einbezugs der Lehmbestandteile stattfindet. Auch die Größe der Bestandteile wird häufiger aufgegriffen. Im Anschluss an die kategoriengestützte Analyse wurden in einem weiteren Schritt einzelne Aspekte, wie beispielsweise die Rolle des *teaching experiments* zur Konzepterweiterung oder die Ausbaufähigkeit des „Gefüge-Konzeptes“ im Rahmen einer auf fallbezogene Argumentationen gestützten Feinanalyse genauer untersucht.

Die Feinanalyse offenbarte zudem unter anderem, dass das Konzept „Gefüge“, das heißt die Fokussierung auf die „zusammenhängende Masse“ beim Lehm gegenüber einzelnen Bestandteilen

beim Sand, eine Zwischenebene darstellen kann und dass Kinder, die diesen Argumentationsweg wählen, anschließend häufig zur Ebene der Bestandteile übergehen.

Die Ergebnisse deuten damit darauf hin, dass die Thematisierung der Formbarkeit von Lehm eine Möglichkeit bietet, ein erstes Struktur-Eigenschaftskonzept bereits in der Primarstufe anzubahnen. Zur Stützung dieser These wurden Arbeiten von Meijer und Bulte et al. hinzugezogen, in welchen sich die Autoren für den Einbezug von Mesoebenen bei der Erarbeitung des Struktur-Eigenschaftskonzeptes aussprechen. Aufbauend auf diesen Überlegungen wurde ein auf Schüleräußerungen und fachlicher Analyse basierendes Stufenmodell zur Erarbeitung des Struktur-Eigenschafts-Konzeptes anhand der Formbarkeit von Lehm entwickelt. Dabei wird unterteilt in zunehmend abstraktere Betrachtungen der Struktur des Lehms einerseits und der Wechselwirkung zwischen Lehm und Wasser andererseits. So werden bezogen auf die Struktur die Ebenen des Stoffes, des Gefüges, der Partikel, der Tonmineral-Schichtpaketstöße, der Schichtpakete sowie der einzelnen Schicht beschrieben. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung legen nahe, dass Kinder im Grundschulalter in dem durchgeführten Kurs ihr Konzept zum Teil von der Ebene des Stoffes zur Ebene der Partikel erweitern konnten. Mit dem Übergang von der Stoff- zur Partikelebene ist auch ein erster Schritt auf dem Weg zu einem Teilchenmodell gelegt, ohne direkt die submikroskopische Teilchenebene einzubeziehen. Schließlich wird so einer zunächst als homogen erachteten Substanz eine Zusammensetzung aus einzelnen Partikeln zugesprochen. Der Übergang zu der Auffassung, dass auch diese Partikel aus kleineren Teilchen zusammengesetzt sind, dürfte so erleichtert werden.

Es wird davon ausgegangen, dass - auch in Bezug auf die Wechselwirkungen - eine Argumentation auf der Ebene der Bestandteile erreicht werden kann. Da dies in der Untersuchung nur randständig betrachtet wurde, kann dieser Aspekt als vielversprechend für weitere Untersuchungen angesehen werden.

Das Stufenmodell zeigt auch, dass die erworbenen Konzepte als ausbaufähig angesehen und daher stetig erweitert werden können. Die theoretischen Überlegungen werden ergänzt durch einen konkreten Vorschlag zur unterrichtlichen Umsetzung. Hier werden, bezogen auf die zuvor erarbeiteten Ebenen, Lernaktivitäten vorgestellt, welche - im Sinne eines spiralcurricularen Vorgehens - zur Erarbeitung des Struktur-Eigenschaftskonzeptes auf zunehmend abstrakteren Ebenen eingesetzt werden können.

Es wäre wünschenswert, die hier gewonnenen Ergebnisse durch weitere Untersuchungen zu verifizieren bzw. zu ergänzen. Um den Zusammenhang von Struktur und Eigenschaft in Bezug auf die Formbarkeit herzustellen, ist ein Verständnis der Struktur (beginnend bei der Zusammensetzung des Lehms) unabdingbar. In der vorliegenden Arbeit wurde zwar die Zusammensetzung des Lehms mit den Kindern thematisiert, jedoch erfolgte hier keine systematische Untersuchung einzelner Aktivitäten. Dies bleibt daher im Detail zu untersuchen. Dabei sollte insbesondere eine Reflexion einzelner Begriffe erfolgen, da einerseits, bezogen auf für den Lerngegenstand relevante Begriffe, das Begriffsverständnis der Kinder besonders stark vom Alltag geprägt ist und

8. Zusammenfassung und Ausblick

andererseits, als Resultat der Einflüsse aus unterschiedlichen fachlichen Perspektiven, auch von fachlicher Seite aus nicht immer einheitliche Definitionen vorliegen. In einem weiteren Schritt sollte analysiert werden, in welchem Maße ein Verständnis der Struktur-Eigenschaftsbeziehung bezogen auf die Formbarkeit in Zusammenhang mit dem Verständnis der Zusammensetzung des Lehms steht.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchung wurden mehr Interviewdaten erhoben als letztlich in die Inhaltsanalyse einfließen konnten. Daraus resultiert die Möglichkeit, in weiteren Forschungsprojekten Teile des vorhandenen Materials mit einem anderen Fokus zu analysieren. Insbesondere der Lehmbrand mit der Möglichkeit Stoffumwandlungen zu thematisieren, stellt einen weiteren vielversprechenden Auswertungsschwerpunkt dar.

Weiterhin können die vorgestellten Ergebnisse als Ausgangspunkt für weitere Arbeiten in Bezug auf das Phänomen Formbarkeit dienen. So sollten die vorgeschlagenen Aktivitäten im Sinne des Dortmunder Modells erprobt und hinsichtlich der hervorgerufenen Lernprozesse und deren Korrespondenz zu den intendierten Lernzielen überprüft werden. Hierzu ist (aufgrund des spiralcurricularen Aufbaus) auch ein Einbezug höherer Klassenstufen sinnvoll.

Literaturverzeichnis

- Andrade, F., Al-Qureshi, H., und Hotza, D. (2011). Measuring the plasticity of clays: A review. *Applied Clay Science*, 51(1-2):1–7.
- Baalmann, W., Frerichs, V., Weitzel, H., Gropengießer, H., und Kattmann, U. (2004). Schüler- vorstellungen zu Prozessen der Anpassung - Ergebnisse einer Interviewstudie im Rahmen der Didaktischen Rekonstruktion. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 10(p7-28):7–28.
- Bain, J. A. (1971). A Plasticity Chart as an Aid to the Identification and Assessment of Industrial Clays. *Clay Minerals*, 9(1):1–17.
- Barke, H. D. (2006). *Chemiedidaktik: Diagnose und Korrektur von Schülervorstellungen*. Springer, Berlin, 1. Auflage.
- Barke, H.-D., Harsch, G., Marohn, A., und Krees, S. (2015). *Chemiedidaktik kompakt: Lernprozesse in Theorie und Praxis*. Springer Spektrum, Berlin, 2. aufl.. Auflage.
- Barker, V. (2000). Beyond appearances: students' misconceptions about basic chemical ideas.
- Bäumer, M., Müller, E., Claussen, B., Meyer, K., und Carle, U. (2009). Atome schon im Sach- unterricht? Ein Plädoyer für die frühe Einführung der Arbeit mit Teilchenvorstellungen. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 20(114):33–37.
- Bender, W. (2011). Grundmaterial der Natur – sanfter Baustoff Lehm. *Restaurator im Handwerk*, 2011(2):14–21.
- Benedict, C. und Bolte, C. (2008). Erste Schritte der Analyse konzeptueller naturwissenschaftlicher Kompetenzen von Kindern im Grundschulalter. In Giest, H. und Wiesemann, J., Herausgeber, *Kind und Wissenschaft*, Band 18 in *Probleme und Perspektiven des Sachunterrichts*, Seiten 263–276. Klinhardt, Bad Heilbrunn.
- Bergaya, F., Theng, B. K. G., und Lagaly, G., Herausgeber (2006). *Handbook of clay science*. Elsevier, Amsterdam and London.
- Bernardo, E., Fiocco, L., Parciannello, G., Storti, E., und Colombo, P. (2014). Advanced Ceramics from Pre-ceramic Polymers Modified at the Nano-Scale: A Review. *Materials*, 7(3):1927–1956.
- Blume, H.-P., Herausgeber (2004). *Handbuch des Bodenschutzes: Bodenökologie und -belastung ; vorbeugende und abwehrende Schutzmaßnahmen*. ecomed-Biowissenschaften. Ecomed, Landsberg am Lech, 3. Auflage.
- Bochter, R. (1995a). *Boden und Bodenuntersuchungen: Für den Unterricht in Chemie, Biologie und Geographie*, Band 53 in *Praxis-Schriftenreihe. Abteilung Chemie*. Aulis Verlag Deubner, Köln.
- Bochter, R. (1995b). Kationen im Boden. Die unterschiedlichen Wirkungen von einfach und mehrfach geladenen Kationen. *Praxis der Naturwissenschaften. Chemie*, 44(3):11–19.

- Brämer, R. (2010). Was hat der naturwissenschaftliche Unterricht mit Natur zu tun? Empirische Antworten auf einen scheinbar dumme Frage.
- Brigatti, M. F., Galan, E., und Theng, B. K. G. (2006). Structure and Mineralogy of Clay Minerals. In Bergaya, F., Theng, B. K. G., und Lagaly, G., Herausgeber, *Handbook of clay science*, Seiten 21–82. Elsevier, Amsterdam and London.
- Brown, A. L. (1992). Design experiments: Theoretical and methodological challenges in creating complex interventions in classroom settings. *The Journal of the Learning Sciences*, 2(2):141–178.
- Buck, P., Rehm, M., und Seilnacht, T. (2004). *Der Sprung zu den Atomen*. Seilnacht, Bern, 1. Auflage.
- Bünder, W., Demuth, R., und Parchmann, I. (2003). Basiskonzepte: Welche chemischen Konzepte sollen Schüler kennen und nutzen? *Praxis der Naturwissenschaften - Chemie in der Schule*, 52(1):2–7.
- Bybee, R. W. (2006). The National Science Education Standards: Personal Reflections. *School Science and Mathematics*, 106(2):57–63.
- Christen, H. R. (1975). Gedanken zur Didaktik des Chemieunterrichts. *Chimica Didactica*, Seiten 57–66.
- Cobb, P., Confrey, J., diSessa, A., Lehrer, R., und Schauble, L. (2003). Design Experiments in Educational Research. *Educational Researcher*, 32(1):9–13.
- Collins, A. (1992). Toward a Design Science of Education. In Scanlon, E. und O’Shea, T., Herausgeber, *New Directions in Educational Technology*, Band 96 in *NATO ASI Series*, Seiten 15–22. Springer Berlin Heidelberg.
- Collins, A., Joseph, D., und Bielaczyc, K. (2004). Design research: Theoretical and methodological issues. *The Journal of the Learning Sciences*, 13(1):15–42.
- Confrey, J. (2006). The evolution of design studies as methodology. In Sawyer, R. K., Herausgeber, *The Cambridge handbook of the learning sciences*, Band 152, Seiten 135–151. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Dachverband Lehm e. V., Herausgeber (2009). *Lehmbau Regeln: Begriffe - Baustoffe - Bauteile*. Praxis. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 3., überarb. Aufl., Auflage.
- Demuth, R., Ralle, B., und Parchmann, I. (2005). Basiskonzepte - eine Herausforderung an den Chemieunterricht. *CHEMKON*, 12(2):55–60.
- Demuth, R. und Rieck, K. (2005). Sinus Transfer Grundschule - Naturwissenschaften: Modul G3- Schülervorstellungen aufgreifen- grundlegende Ideen entwickeln.
- Demuth, R., Rieck, K., und Kleinert, K. (2007). Die Bedeutung naturwissenschaftlicher Konzepte im Anfangsunterricht. *Sache, Wort, Zahl*, 35(83):56–59.
- Dove, J. E. (1998). Students’ alternative conceptions in Earth science: a review of research and implications for teaching and learning. *Research Papers in Education*, 13(2):183–201.
- Drieling, K. (2008). Erde oder Boden, Horizonte oder Schichten: Alltagsvorstellungen zum Aufbau des Bodens. *Geographie heute*, 28(265):34–39.

- Drieling, K. (2015). *Schülervorstellungen über Boden und Bodengefährdung: Ein Beitrag zur geographiedidaktischen Rekonstruktion: Pädagogische Hochschule, Diss.–Ludwigsburg, 2014*, Band 55 in *Geographiedidaktische Forschungen*. Monsenstein und Vannerdat, Münster.
- Dubey, M. E. und Rule, A. C. (2007). Seventh grade students learn about the use of clay in everyday products. *Journal of Geoscience Education*, 55(4):282–288.
- Duchert, D. (2015). Lehm - Futter für die Sinne. *Betrifft Kinder*, 01(02):40–43.
- Duit, R. (1989). Vorstellung und Experiment: Von der eingeschränkten Überzeugungskraft experimenteller Beobachtungen. *Naturwissenschaften im Unterricht - Physik, Chemie*, 37:37–39.
- Duit, R. (1992a). Forschungen zur Bedeutung vorunterrichtlicher Vorstellungen für das Erlernen der Naturwissenschaften. In Riquarts, K., Herausgeber, *Naturwissenschaftliche Bildung in der Bundesrepublik Deutschland*, Band IV in *IPN*, Seiten 47–84. IPN Leibniz-Institut f. d. Pädagogik d. Naturwissenschaften, Kiel.
- Duit, R. (1992b). Teilchen- und Atomvorstellungen. In Fischler, H., Herausgeber, *Quantenphysik in der Schule*, Band 133 in *IPN*, Seiten 201–214. Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften an der Universität Kiel, Kiel.
- Duit, R. (1995). Zur Rolle der konstruktivistischen Sichtweise in der naturwissenschaftsdidaktischen Lehr- und Lernforschung. *Zeitschrift für Pädagogik*, 41(6):905–923.
- Duit, R. (2011). Alltagsvorstellungen berücksichtigen! In Müller, R., Wodzinski, R., und Hopf, M., Herausgeber, *Schülervorstellungen in der Physik*, Seiten 3–7. Aulis-Verl., Köln.
- Duit, R. (2015). Alltagsvorstellungen und Physik lernen. In Kircher, E., Girwidz, R., und Häußler, P., Herausgeber, *Physikdidaktik*, Springer-Lehrbuch, Seiten 658–680. Springer Spektrum, Berlin.
- Düwel, O., Siebner, C. S., Utermann, J., und Krone, F. (2007). *Bodenarten der Böden Deutschlands: Bericht über länderübergreifende Auswertungen von Punktinformationen im FISBo BGR*.
- Enßlin, W., Krahn Roland, und Skupin, S. (2000). *Böden untersuchen*, Band 52 in *Biologische Arbeitsbücher*. Quelle und Meyer, Wiebelsheim.
- Ewerhardy, A. (2010). *Zusammenhänge zwischen Verständnisorientierung von naturwissenschaftsbezogenem Sachunterricht und Fortschritten im Verständnis naturwissenschaftlicher Konzepte bei Lernenden der Grundschule*. Dissertation, Westfälischen Wilhelms-Universität, Münster.
- Falbe, J. und Regitz, M. (2017). RÖMPP Lexikon Chemie. <https://roempp.thieme.de/roempp4.0/do/data/RD-20-00523>. Eingesehen am 06.06.2017.
- Farrar, D. M. und Coleman, J. D. (1967). The correlation of surface area with other properties of nineteen British clay soils. *Journal of Soil Science*, 18(1):118–124.
- Fischer, F., Waibel, M., und Wecker, C. (2005). Nutzenorientierte Grundlagenforschung im Bildungsbereich. *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft*, 8(3):427–442.
- Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU), Herausgeber (2002). *Perspektivrahmen Sachunterricht*. Klinkhardt, Bad Heilbrunn/Obb.
- Gesellschaft für Didaktik des Sachunterrichts (GDSU), Herausgeber (2013). *Perspektivrahmen Sachunterricht*. Klinkhardt, Bad Heilbrunn, vollständig überarb. und erw. Aufl.. Auflage.

- Gisi, U. (1990). *Bodenökologie*. Thieme, Stuttgart and New York.
- Gröger, M., Janssen, M., Spitzer, P., und Wurm, K. (2012). Naturwissenschaften naturnah erleben. Das Freilandlabor FLEX als Chance, naturwissenschaftliche Betrachtungen bei naturbezogenen Phänomenen zu beginnen. In Becker, P., Schirp, J., und Vollmar, M., Herausgeber, *Abenteurer, Natur und frühe Bildung*, Band 2011/2012 in *bsj-Jahrbuch*, Seiten 269–288. Budrich, Leverkusen.
- Gropengießer, H. (1997). *Didaktische Rekonstruktion des "Sehens"*. Dissertation, Univ, Oldenburg and Oldenburg.
- Gropengiesser, H. (2003). *Wie man Vorstellungen der Lerner verstehen kann: Lebenswelten, Denkwelten, Sprechwelten*. Didaktisches Zentrum, Carl-von-Ossietzky-Univ., Oldenburg, 1. Auflage.
- Gropengießer, H. (2009). Didaktische Rekonstruktion. Schritte auf dem Weg zu gutem Unterricht. In Moschner, B., Herausgeber, *Unterrichten professionalisieren*, Seiten 159–164. Cornelsen Scriptor, Berlin.
- Grüss-Niehaus, T. (2010). *Zum Verständnis des Löslichkeitskonzeptes im Chemieunterricht: Der Effekt von Methoden progressiver und kollaborativer Reflexion*, Band 102 in *Studien zum Physik- und Chemielernen*. Logos-Verl., Berlin.
- Grück-Niehaus, T. und Schanze, S. (2009). Das Salz gibt die Farbe ab: Zur Einführung eines tragfähigen Löslichkeitskonzeptes. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 20(114):38–43.
- Guggenheim, S. und Martin, R. T. (1995). Definition of clay and clay mineral; joint report of the AIPEA nomenclature and CMS nomenclature committees. *Clays and Clay Minerals*, 43(2):255–256.
- Güntzel, J. G. (1988). *Zur Geschichte des Lehmbaus in Deutschland: Dissertation*. Ökobuch Verlag, Staufen.
- Haase, T. und Nützenadel, P. (1968). *Keramik*. Dt. Verl. für Grundstoffindustrie, Leipzig, 2. Aufl.. Auflage.
- Habenicht, G. (2009). *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin and Heidelberg, 6. Auflage.
- Hadenfeldt, J. C., Neumann, K., Bernholt, S., Liu, X., und Parchmann, I. (2016). Students' progression in understanding the matter concept. *Journal of Research in Science Teaching*, 53(5):683–708.
- Hamann, S. (2004). *Schülervorstellungen zur Landwirtschaft im Kontext einer Bildung für nachhaltige Entwicklung*. Dissertation, Pädag. Hochsch., Ludwigsburg.
- Happs, J. C. (1981). *Some aspects of student understanding of soil*, Band 201 in *Working paper / Science Education Research Unit*. Science Education Research Unit, University of Waikato, Hamilton and N.Z.
- Heinzel, F. (1997). Qualitative Interviews mit Kindern. In Friebertshäuser, B., Herausgeber, *Handbuch qualitative Forschungsmethoden in der Erziehungswissenschaft*, Seiten 396–413. Juventa-Verl, Weinheim and München.
- Heinzel, F. (2012). Qualitative Methoden in der Kindheitsforschung: Ein Überblick. In Heinzel, F., Herausgeber, *Methoden der Kindheitsforschung*, Kindheiten, Seiten 22–35. Beltz Juventa, Weinheim.

- Hellberg-Rode, G. und Dehn, M. (2005). Werkstatt Boden ist Leben: Unterrichtsbausteine zum Thema Boden.
- Henning, O. und Knöfel, D. (2002). *Baustoffchemie: Eine Einführung für Bauingenieure und Architekten : mit 148 Bildern, 103 Tafeln und zahlreichen Übungsbeispielen*. Verl. Bauwesen, Berlin, 6., aktualisierte Aufl.. Auflage.
- Herzog, S., Finlayson, O., Hickmann, K., und Parchmann, I. (2015). Poren nach Maß - Struktur-Eigenschafts-Beziehungen unter der chemiedidaktischen Lupe. *CHEMKON*, 22(1):29–36.
- Herzog, S. und Parchmann, I. (2016). Wie bleibt das Wasser in der Windel? Superabsorbierende Polymere als Modellsubstanz zu Erarbeitung von Struktur-Eigenschafts-Beziehungen. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 27(153):24–27.
- Hesselink, B., Sgoff, D., und Bade, H. J. (2007). Bentonit: Unbekannter Rohstoff für Adsorbentien, Katalysatoren und Verdickungsmittel. *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht*, 60(4):217–223.
- Hiltmann, W. und Stribny, B. (1998). *Tonmineralogie und Bodenphysik*, Band Bd. 5 in *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten*. Springer, Berlin.
- Holleman, A. F., Wiberg, E., Wiberg, N., und Holleman-Wiberg (1995). *Lehrbuch der anorganischen Chemie*. de Gruyter, Berlin, 101., verb. und stark erw. Aufl.. Auflage.
- Hopf, C. und Schmidt, C. (1993). *Zum Verhältnis von familialen sozialen Erfahrungen, Persönlichkeitsentwicklung und politischen Orientierungen: Dokumentation und Erörterung des methodischen Vorgehens in einer Studie zu diesem Thema*. Institut für Sozialwissenschaften der Universität Hildesheim, Hildesheim.
- House, C. A. (2007). Developing preschoolers' science vocabulary through clay explorations. *Journal of Geoscience Education*, 55(4):267–273.
- Hußmann, S., Thiele, J., hinz, R., Prediger, S., und Ralle, B. (2013). Gegenstandsorientierte Unterrichtsdesigns entwickeln und erforschen. Fachdidaktische Entwicklungsforschung im Dortmunder Modell. In Komorek, M. und Prediger, S., Herausgeber, *Der lange Weg zum Unterrichtsdesign*, Band 5 in *Fachdidaktische Forschungen*, Seiten 25–42. Waxmann, Münster u.a.
- Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften Kiel (1972). *IPN-Curriculum Chemie: Didaktische Anleitung zur Unterrichtseinheit C.1.3*. Klett, Stuttgart.
- ITPS und FAO (2015). *Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Technical Summary*. Rome, Italy.
- Janssen, M., Wurm, K., und Gröger, M. (2014). Naturerleben als Ausgangspunkt chemischen Lernens: Das FLEX als außerschulischer und außeruniversitärer Lernort. *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie*, 25(144):38–42.
- Jasmund, K. und Lagaly, G., Herausgeber (1993). *Tonminerale und Tone: Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt*. Steinkopff, Darmstadt.
- Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 7(2):75–83.
- Jung, W. (1993). Hilft die Entwicklungspsychologie dem Physikdidaktiker? In Duit, R. und Graeber, W., Herausgeber, *Kognitive Entwicklung und Lernen der Naturwissenschaften*, Seiten 86–108. IPN, Kiel.

- Kantowski, M. G. (1978). The Teaching Experiment and Soviet Studies of Problem Solving. In Hatfield, L. L., Herausgeber, *Mathematical problem solving*, Seiten 43–52. ERIC Document Reprod, Arlington and Virg.
- Kattmann, U., Duit, R., Gropengießer, H., und Komorek, M. (1997). Das Modell der didaktischen Rekonstruktion: Ein Rahmen für naturwissenschaftliche Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 3(3):3–18.
- Kelly, A. (2004). Design Research in Education: Yes, but Is It Methodological? *The Journal of the Learning Sciences*, 13(1):115–128.
- Kleickmann, T., Hardy, I., Pollmeier, J., und Möller, K. (2011). Zur Struktur naturwissenschaftlichen Wissens von Grundschulkindern. Eine personen- und variablenzentrierte Analyse. *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und pädagogische Psychologie*, 43(4):200–212.
- Komorek, M. und Duit, R. (2004). The teaching experiment as a powerful method to develop and evaluate teaching and learning sequences in the domain of non-linear systems. *International Journal of Science Education*, 26(5):619–633.
- Köster, H. M. und Schwertmann, U. (1993). Beschreibung einzelner Tonminerale. In Jasmund, K. und Lagaly, G., Herausgeber, *Tonminerale und Tone*, Seiten 33–88. Steinkopff, Darmstadt.
- Kraynova, A. (2012). *Didaktische Rekonstruktion der Nanophysik*. Dissertation, Univ, Oldenburg and Oldenburg.
- Krischer, D., Spitzer, P., und Gröger, M. (2016). “Chemistry is Toxic, Nature is Idyllic” – Investigation of Pupils’ Attitudes.
- Krnel, D., Watson, R., und Glazar, S. A. (1998). Survey of research related to the development of the concept ‘matter’. *International Journal of Science Education*, 20(3):257–289.
- Krüger, D. (2007). Die Conceptual Change-Theorie. In Krüger, D. und Vogt, H., Herausgeber, *Theorien in der biologiedidaktischen Forschung*, Springer-Lehrbuch, Seiten 88–99. Springer Berlin Heidelberg.
- Kuckartz, U. (2012). *Qualitative Inhaltsanalyse: Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. Beltz Juventa, Weinheim.
- Kultusministerkonferenz (2005a). *Beschlüsse der Kultusministerkonferenz: Bildungsstandards im Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss (Jahrgangsstufe 10)*. Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, München.
- Kultusministerkonferenz (2005b). *Bildungsstandards im Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss Beschluss vom 16.12. 2004*. Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, München, Neuwied.
- Kultusministerkonferenz (2005c). *Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss Beschluss vom 16.12. 2004*. Beschlüsse der Kulturministerkonferenz. Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, München, Neuwied.
- Lagaly, G. (1993). Reaktionen der Tonminerale. In Jasmund, K. und Lagaly, G., Herausgeber, *Tonminerale und Tone*, Seiten 89–167. Steinkopff, Darmstadt.
- Lagaly, G. und Köster, H. M. (1993). Tone und Tonminerale. In Jasmund, K. und Lagaly, G., Herausgeber, *Tonminerale und Tone*, Seiten 1–32. Steinkopff, Darmstadt.

- Link, M. (2012). *Grundschul Kinder beschreiben operative Zahlenmuster: Entwurf, Erprobung und Überarbeitung von Unterrichtsaktivitäten als ein Beispiel für Entwicklungsforschung*, Band 1 in *Research*. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden.
- Markic, S. und Abels, S. (2013). Die Fachsprache der Chemie. *Naturwissenschaften im Unterricht*, 24(135):10–14.
- Mayring, P. (2010). Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken. *Qualitative Inhaltsanalyse*.
- Meiers, K. und Sauerborn, P. (2013). Erde - Ein Element des Lebens. *Sache, Wort, Zahl*, 41.(138):11–19.
- Meijer, M. (2011). *Macro-meso-micro thinking with structure-property relations for chemistry education: An explorative design based study*. Utrecht University, [S.l.].
- Meijer, M., Bulte, A., und Pilot, A. (2009). Structure–Property Relations Between Macro and Micro Representations: Relevant Meso-levels in Authentic Tasks. In Gilbert, J. und Treagust, D., Herausgeber, *Multiple Representations in Chemical Education*, Band 4 in *Models and Modeling in Science Education*, Seiten 195–213. Springer Netherlands.
- Meijer, M., Bulte, A., und Pilot, A. (2013a). An approach for design-based research focusing on design principles for science education: A case study on a relevant context for macro-micro thinking. In Plomp, T. und Nieveen, N., Herausgeber, *Educational design research – Part B: Illustrative cases*, Seiten 641–664. SLO, Enschede.
- Meijer, M., Bulte, A., und Pilot, A. (2013b). Macro–Micro Thinking with Structure–Property Relations: Integrating ‘Meso-levels’ in Secondary Education. In Tsaparlis, G. und Sevian, H., Herausgeber, *Concepts of Matter in Science Education*, Band 19 in *Innovations in Science Education and Technology*, Seiten 419–436. Springer Netherlands.
- Menger, J. (2010). *Lastentransport mit einfachen mechanischen Maschinen: Didaktische Rekonstruktion als Beitrag zum technischen Sachunterricht in der Grundschule*. Didaktisches Zentrum, Carl von Ossietzky Univ., Oldenburg, 1. Auflage.
- Millar, R. (1990). Making sense: what use are particle ideas to children? In Lijnse, P. L., Treffers, A., de Vos, W., und Waarlo, A. J., Herausgeber, *Relating macroscopic phenomena to microscopic particles*, Band 6 in *The CD-/beta/ series on research in education*, Seiten 283–293. CD-β Press, Utrecht.
- Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, Herausgeber (2008). *Kernlehrplan für das Gymnasium - Sekundarstufe I in Nordrhein-Westfalen - Chemie*, Band 3415 in *Schriftenreihe "Schule in NRW"*. Ritterbach, Frechen.
- Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen, Herausgeber (2014). *Kernlehrplan für das Gymnasium - Sekundarstufe II in Nordrhein-Westfalen - Chemie*, Band 3415 in *Schriftenreihe "Schule in NRW"*. Ritterbach, Frechen.
- Minke, G. (2004). *Das neue Lehm-Handbuch: Baustoffkunde, Konstruktionen, Lehmarchitektur*. Ökobuch, Staufen im Breisgau, 6. Auflage.
- Mitchell, J. K. und Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior*. John Wiley & Sons, Hoboken and N.J., 3. Auflage.

- Möller, K. (1999). Konstruktivistisch orientierte Lehr-Lernprozeßforschung im naturwissenschaftlich-technischen Bereich des Sachunterrichts. In Köhnlein, W., Herausgeber, *Vielperspektivisches Denken im Sachunterricht*, Band 3 in *Forschungen zur Didaktik des Sachunterrichts*, Seiten 125–191. Klinkhardt, Bad Heilbrunn.
- Moore, F. (1967). *Rheologie in der Keramik*, Band 5 in *Schriftenreihe Steine und Erden*. Hübener, Goslar.
- Müller-Vonmoss, M. und Kohler, E. (1993). Geotechnik und Entsorgung. In Jasmund, K. und Lagaly, G., Herausgeber, *Tonminerale und Tone*, Seiten 312–357. Steinkopff, Darmstadt.
- Murmann, L. (2004). Phänomene erschließen kann Physiklernen bedeuten. Perspektiven einer wissenschaftlichen Sachunterrichtsdidaktik am Beispiel der Lernforschung zu Phänomenen der unbelebten Natur. *Widerstreit Sachunterricht*, 3.
- Nakhleh, M. B., Samarapungavan, A., und Saglam, Y. (2005). Middle school students' beliefs about matter. *Journal of Research in Science Teaching*, 42(5):581–612.
- Niebert, K. (2010). *Den Klimawandel verstehen: Eine didaktische Rekonstruktion der globalen Erwärmung*. Didaktisches Zentrum, Oldenburg, 1. Auflage.
- Niebert, K. und Gropengießer, H. (2014). Leitfadengestützte Interviews. In Krüger, D., Parchmann, I., und Schecker, H., Herausgeber, *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*, Seiten 121–132. Springer Berlin Heidelberg.
- Niedderer, H. und Schecker, H. (1992). Towards an explicit description of cognitive systems for research in physics learning. In Duit, R., Goldberg, F., und Niedderer, H., Herausgeber, *Research in physics learning: theoretical issues and empirical studies*, Band 131 in *IPN*, Seiten 74–98. Inst. für d. Pädagogik d. Naturwiss. an d. Univ., Kiel.
- Otte, K. (2010). Lehm - Urstoff der Religionen. In Pilz, A., Herausgeber, *Lehm im Innenraum*, Seiten 162–163. Fraunhofer-IRB-Verl., Stuttgart.
- Parchmann, I., Scheffel, L., und Stäudel, L. (2010). Struktur-Eigenschafts-Prinzipien: Roter Faden für den Chemieunterricht? *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 21(115):8–11.
- Paschen, H., Coenen, C., Fleischer, T., Grünwald, R., Oertel, D., und Revermann, C. (2006). *Nanotechnologie: Forschung, Entwicklung, Anwendung*. Springer-Verlag.
- Pfeifer, P. (2015). Langlebige Gebäude aus Ziegelsteinen: Analyse und Herstellung eines Rohziegels im Chemieunterricht. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 26(150):16–19.
- Pfundt, H. (1981). Das Atom - letztes Teilstueck oder erster Aufbaustein? Zu d. Vorstellungen, d. sich Schueler vom Aufbau d. Stoffe machen. *Chimica Didactica*, 7(2):75–94.
- Plomp, T. (2013). Educational Design Research: An introduction. In Plomp, T. und Nieveen, N., Herausgeber, *Educational design research – Part A: An indroction*, Seiten 10–51. SLO, Enschede.
- Posner, G. J., Strike, K. A., Hewson, P. W., und Gertzog, W. A. (1982). Accommodation of a scientific conception: Toward a theory of conceptual change. *Science Education*, 66(2):211–227.
- Prediger, S. (2011). Vorstellungsentwicklungsprozesse initiieren und untersuchen: Einblicke in einen Forschungsansatz am Beispiel Vergleich und Gleichwertigkeit von Brüchen in der Streifen Tafel. *Der Mathematikunterricht*, 57(3):5–14.

- Prediger, S. und Link, M. (2012). Fachdidaktische Entwicklungsforschung - Ein lernprozessfokussierendes Forschungsprogramm mit Verschränkung fachdidaktischer Arbeitsbereiche. In Bayrhuber, H., Harms, U., Muszynski, B., Ralle, B., Rothgangel, M., und Schön, L.-H., Herausgeber, *Formate Fachdidaktischer Forschung*, Seiten 29–46. Waxmann Verlag, [s.l.].
- Prediger, S., Link, M., hinz, R., Hussmann, S., Ralle, B., und Thiele, J. (2012). Lehr-Lernprozesse initiieren und erforschen - Fachdidaktische Entwicklungsforschung im Dortmunder Modell. *MNU*, 65(8):452–457.
- Rehm, M. und Buck, P. (2006). Der Teil und das Ganze - ein Lehr-Lern-Arrangement vor der Einführung von Atommodellen. In Fischler, H. und Reiners, C. S., Herausgeber, *Die Teilchenstruktur der Materie im Physik- und Chemieunterricht*, Band 50 in *Studien zum Physik- und Chemielernen*, Seiten 145–164. Logos, Berlin.
- Reinfried, S. (2010). Lernen als Vorstellungsänderung: Aspekte der Vorstellungsforschung mit Bezügen zur Geographiedidaktik. In Reinfried, S., Herausgeber, *Schülervorstellungen und geographisches Lernen*, Seiten 1–31. Logos-Verl, Berlin.
- Reinfried, S. und Schuler, S. (2009). Die Ludwigsburg-Luzerner Bibliographie zur Alltagsvorstellungsforschung in den Geowissenschaften - ein Projekt zur Erfassung der internationalen Forschungsliteratur. *Geographie und ihre Didaktik*, 37(3):120–135.
- Reinfried, S. und Schuler, S. (2011). Ludwigsburg-Luzerner Bibliographie zu Alltagsvorstellungsforschung in den Geowissenschaften.
- Renström, L., Andersson, B., und Marton, F. (1990). Students' conceptions of matter. *Journal of Educational Psychology*, 82(3):555–569.
- Riedel, E. (1999). *Allgemeine und anorganische Chemie: Ein Lehrbuch für Studenten mit Nebenfach Chemie*. De-Gruyter-Lehrbuch. de Gruyter, Berlin and New York, 7., überarb. aufl.. Auflage.
- Riemeier, T. (2005). *Biologie verstehen: die Zelltheorie*. Didaktisches Zentrum, Oldenburg, 1. Auflage.
- Roch, K. (2010). „Schutz der Böden“ – Unterrichtseinheiten und –materialien für den Schulunterricht.
- Rominger, J. F. (1954). Relationships of Plasticity and Grain Size of Lake Agassiz Sediments. *The Journal of Geology*, 62(6):p 537–572.
- Rule, A. C. (2007). Preservice elementary teachers' ideas about clays. *Journal of Geoscience Education*, 55(4):310–320.
- Rule, A. C. und Guggenheim, S., Herausgeber (2002). *Teaching clay science*. Clay Minerals Society, Aurora, CO.
- Rule, A. C. und Guggenheim, S. (2007). A Standards-based Curriculum for Clay Science. *Journal of Geoscience Education*, 55(4):257–266.
- Russell, T., Bell, D., Longden, K., und McGuigan, L. (1993). *Rocks, soil and weather*. Primary SPACE project research reports. Liverpool University Press, Liverpool.
- Sager, N. und Ralle, B. (2011). Wissensstrukturen erkennen: Diagnose und Leistungsbewertung beim schülerzentrierten Arbeiten mit "Lücken Concept Maps". *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie*, 22(124/125):63–67.

- Salmang, H. (1927). Die Ursachen der Bildsamkeit der Tone. *Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie*, 162(1):115–126.
- Salmang, H., Scholze, H., und Telle, R. (2007). *Keramik*. Springer, Berlin, New York, 7. Auflage.
- Scheffel, L. (2010). *Struktur-Eigenschaftsbeziehungen*, Band 27 in *Beiträge zur didaktischen Rekonstruktion*. Didakt. Zentrum, Carl-von-Ossietzky-Univ, Oldenburg, 1. Auflage.
- Scheffel, L., Beckhaus, R., und Prachmann, I. (2010). Struktur & Eigenschaften im Chemieunterricht. *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 21(115):2–7.
- Scheffer, F., Schachtschabel, P., Blume, H.-P., und Thiele, S. (2010). *Lehrbuch der Bodenkunde*. Spektrum Akad.-Verl, Heidelberg, 16. Auflage.
- Schmidkunz, H. (2011). Woraus besteht Katzenstreu? Schüler ermitteln die Zusammensetzung eines Alltagsproduktes durch die Planung und Durchführung von Experimenten. *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie*, 22(126):29–33.
- Schmidt, S. (2010). *Didaktische Rekonstruktion des Basiskonzepts 'Stoff-Teilchen' für den Anfangsunterricht nach Chemie im Kontext*. Dissertation, Univ, Oldenburg.
- Schmidt, S. und Parchmann, I. (2011). Schülervorstellungen - Lernhürde oder Lernchance. *Praxis den Naturwissenschaften CHEMIE in der Schule*, 60(3):15–20.
- Schoenfeld, A. H. (2006). Design Experiments. In Green, J. L., Camilli, G., und Elmore, P. B., Herausgeber, *Handbook of complementary methods in education research*, Seiten 193–206. Lawrence Erlbaum Associates and Published for the American Educational Research Association, Mahwah and N.J and Washington and D.C.
- Schoonheydt, R. und Johnston, C. (2006). Surface and interface chemistry of clay minerals. In Bergaya, F., Theng, B. K. G., und Lagaly, G., Herausgeber, *Handbook of clay science*, Seiten 87–114. Elsevier, Amsterdam and London.
- Schroeder, D. und Blum, B. (1992). *Bodenkunde in Stichworten*. Hirt's Stichwortbücher. Hirt, Berlin, Stuttgart.
- Schroeder, H. (2013). *Lehmbau: Mit Lehm ökologisch planen und bauen*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, s.l., 2., überarb. und akt. Aufl. 2013. Auflage.
- Schwarzer, S., Rudnik, J., und Parchmann, I. (2013). Chemische Schalter als potenzielle Lernschalter. *CHEMKON*, 20(4):175–181.
- Sommer, K., Steff, H., und Venke, S. (2015). Bauchemie - ein Thema für den Unterricht? *Naturwissenschaften im Unterricht Chemie*, 26(150):6–10.
- Spägle, E. (2008). *Naturwissenschaftliches Vorverständnis von Schulanfängern*. Pädagogische Hochschule Weingarten and Pädagogische Hochschule Weingarten. Fakultät II (PH).
- Stäudel, L., Franke-Braun, G., und Parchmann, I. (2008). Sprache, Kommunikation und Wissenserwerb im Chemieunterricht. *Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie*, 19(106/107):4–9.
- Stavy, R. und Stachel, D. (1985). Children's ideas about 'solid' and 'liquid'. *European Journal of Science Education*, 7(4):407–421.
- Steffe, L. P. und D'Ambrosio, B. S. (1996). Using Teaching Experiments to Enhance Understanding of Students' Mathematics. In Treagust, D. F., Duit, R., und Fraser, B. J., Herausgeber, *Improving teaching and learning in science and mathematics*, Ways of knowing in science series, Seiten 65–76. Teachers College Press, New York.

- Steffe, L. P. und Thompson, P. W. (2000). Teaching Experiment Methodology: Underlying Principles and Essential Elements. In Kelly, A. E. und Lesh, R. A., Herausgeber, *Handbook of research design in mathematics and science education*, Seiten 267–307. L. Erlbaum, Mahwah and N.J.
- Steffe, L. P. und Ulrich, C. (2014). Constructivist Teaching Experiment. In Lerman, S., Herausgeber, *Encyclopedia of mathematics education*, Springer reference, Seiten 102–109. Springer, Dordrecht u.a.
- Steffensky, M., Parchmann, I., und Schmidt, S. (2005). Alltagsvorstellungen und chemische Erklärungskonzepte: “Die Teilchen saugen das Aroma aus dem Tee”. *Chemie in unserer Zeit*, 39(4):274–278.
- Stepkowska, E. T. und Jefferis, S. A. (1992). Influence of microstructure on firing colour of clays. *Applied Clay Science*, 6(4):319–342.
- Stern, E. und Möller, K. (2004). Der Erwerb anschlussfähigen Wissens als Ziel des Grundschulunterrichtes. In Lenzen, D., Baumert, J., Watermann, R., und Trautwein, U., Herausgeber, *PISA und die Konsequenzen für die erziehungswissenschaftliche Forschung*, Seiten 25–36. VS, Verl. für Sozialwiss., Wiesbaden.
- Strike, K. A. und Posner, G. J. (1992). A revisionist theory of conceptual change. In Duschl, R. A. und Hamilton, R. J., Herausgeber, *Philosophy of science, cognitive psychology, and educational theory and practice*, SUNY series in science education, Seiten 147–176. State University of New York Press, Albany.
- Strunk, U. (1999). *Die Behandlung von Phänomenen aus der unbelebten Natur im Sachunterricht: Die Perspektive der Förderung des Erwerbs von kognitiven und konzeptuellen Fähigkeiten*. Der Andere Verl., Bad Iburg.
- Stucki, P. und Turrian, F. (1996). *Die Geheimnisse des Bodens: Auf den Spuren von Maulwurf Grabowski*. Zytglogge-Werkbuch. Zytglogge-Verl., Bern.
- Talanquer, V. (2009). On Cognitive Constraints and Learning Progressions: The case of “structure of matter”. *International Journal of Science Education*, 31(15):2123–2136.
- The Design-Based Research Collective (2003). Design-Based Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry. *Educational Researcher*, 32(1):p 5–8.
- Vormberg, E. (2014). *Ein Teaching-Experiment zur Zusammensetzung des Lehms*. Staatsarbeit, Universität Siegen.
- Wagenschein, M. (1981). Martin Wagenschein - Ein Interview zu seinem Lebenswerk. *Chimica Didactica*, 7:161–175.
- Wagner, J.-F. (2006). Mechanical Properties of Clays and Clay Minerals. In Bergaya, F., Theng, B. K. G., und Lagaly, G., Herausgeber, *Handbook of clay science*, Seiten 347–382. Elsevier, Amsterdam and London.
- Weitzel, H. und Gropengießer, H. (2009). Vorstellungsentwicklung zur stammesgeschichtlichen Anpassung: Wie man Lernhindernisse verstehen und förderliche Lernangebote machen kann. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 15:287–305.
- White, R. T. und Gunstone, R. F. (1992). *Probing understanding*. Falmer, London and , New York.

- White, W. A. (1949). Atterberg plastic limits of clay minerals. *American Mineralogist*, 34(7-8):508–512.
- Whittaker, H. (1939). EFFECT OF PARTICLE SIZE ON PLASTICITY OF KAOLINITE*. *Journal of the American Ceramic Society*, 22(1-12):16–23.
- Wilbers, J. und Duit, R. (2001). Heuristische Analogien und Post-festum-Analogien Analogie-basierte Lernprozesse im Bereich des deterministischen Chaos. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 7:83–104.
- Wilhelm, T. und Hopf, M. (2014). Design-Forschung. In Krüger, D., Parchmann, I., und Schecker, H., Herausgeber, *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*, Seiten 31–42. Springer Berlin Heidelberg.
- Wilson, E. O. (1936). THE PLASTICITY OF FINELY GROUND MINERALS WITH WATER*. *Journal of the American Ceramic Society*, 19(1-12):115–120.
- Witzel, A. (1985). Das problemzentrierte Interview. In Jüttemann, G., Herausgeber, *Qualitative Forschung in der Psychologie*, Seiten 227–256. Beltz, Weinheim.
- Witzel, A. (2000). Das problemzentrierte Interview. *Forum qualitative Sozialforschung*, 1(1).
- Wodzinski, R. (2011a). *Naturwissenschaftliche Fachkonzepte anbahnen - Anschlussfähigkeit verbessern*. IPN Leibniz-Institut f. d. Pädagogik d. Naturwissenschaften an d. Universität Kiel, Kiel.
- Wodzinski, R. (2011b). Schülervorstellungen und Lernschwierigkeiten. In Müller, R., Wodzinski, R., und Hopf, M., Herausgeber, *Schülervorstellungen in der Physik*, Seiten 23–38. Aulis-Verl., Köln.
- Woyke, A., Gröger, M., und Scharf, V. (2009). "Erlebbar Zusammenhänge" als wesentlicher Gesichtspunkt bei der Konzipierung des Science Forums in Siegen: Anmerkungen zur Kultur von Schülerlaboren an wissenschaftlichen Einrichtungen. *Chimica Didactica*, 35(102):55–79.

Anhang

A. Transkriptionssystem und Codierleitfaden

Transkriptionsregeln:

-	Satzabbruch
[...]	Passage ausgelassen
(<i>kursiv</i>)	Anmerkungen zu Tätigkeiten etc.
(.) (...)	Pause von 2 bzw. 3 sek.
(4s)	Pause von 4 Sekunden
(unv.)	unverständlich
(Ton?)	vermutlicher Wortlaut (nicht ganz eindeutig).
//	paralleles Sprechen
GROSSSCHREIBEN	nur bei besonders hervorgehobener Betonung
	Kurze Pausen zwischen zwei verschiedenen Personen werden nicht notiert!

Allgemeine Codiervorschriften:

- Codiert werden Sinneinheiten, d.h. das bspw. die Fragestellung mitcodiert wird. Der Kontext sollte so weit wie möglich ersichtlich sein.
- In einem Dokument darf ein Code häufiger vergeben werden, kommt er aber in einem Segment häufiger vor, so wird der Code nur einmal vergeben (es sei denn die Kinder äußern *unabhängig* voneinander Ideen einer Kategorie).
- Eine Sinneinheit kann mehreren Codes zugeordnet werden. Dies ist schon daher notwendig, da häufig mehrere Aspekte in einer Sinneinheit aufgegriffen werden.
- Wenn Suggestivfragen gestellt wurden, werden die entsprechenden Textstellen nicht codiert. Wird konkret nach etwas gefragt (z.B. Was war denn im Sand drin?) wird dies codiert, so lange noch ein Bezug zur Formbarkeit erkennbar ist. Allerdings wird die Gewichtung auf „50“ gesetzt.
- Besonders elaborierte Aussagen werden mit einem Emoticode (roter Stern) zusätzlich gekennzeichnet.

Code	Sub-code	Erläuterung	Ankerbsp.
Eigenschaften		<p>Hierzu zählen alle Eigenschaften, die direkt in Zusammenhang mit der Formbarkeit gebracht werden. Nicht mit der Formbarkeit verknüpfte Aussagen fallen nicht unter diesen Code.</p> <p>Als Eigenschaften werden sowohl Adjektive (s.o.) als auch substantivierte Adjektive betrachten (Bsp.: Beständigkeit).</p> <p>Die Textstellen werden je nachdem in die Subkategorien Lehm und Sand eingeordnet.</p>	<p><u>Hinzugezählt wird bspw.:</u></p> <p><i>I: Und du sagtest noch, man kann da so gut formen?</i></p> <p><i>B1: Das kann man gut formen, weil das so..., das ist weich.</i></p> <p><u>Nicht hinzugezählt wird beispielsweise:</u></p> <p><i>B2: Er ist klebrig ein bisschen. Wenn man ihn so in den Händen nimmt, bleibt man bisschen dran kleben. Daraus kann man was verformen.</i></p>
	Sand	<p><u>!Häufig anzutreffende Adjektive bezogen auf Sand:</u></p> <p>hart/weich; schwer/leicht, flutschig</p>	
	Lehm	<p><u>!Häufig anzutreffende Adjektive bez. auf Lehm:</u></p> <p>klebrig, matschig, stabil, pampig, hart/weich, dick; Substantive: Beständigkeit, Klebekraft</p>	
Bestandteile		<p>Unter diesen Code wird sowohl codiert, wenn direkt Bestandteile (Ton, Steine, Sand etc.) genannt werden, aber auch wenn es sich um abstraktere Begriffe ("Haftdinger", "Matsch") handelt.</p> <p>Allerdings erfolgt eine Codierung nur dann, wenn die Kinder die Bestandteile zur Erklärung der Formbarkeit hinzuziehen; nicht wenn der Interviewer konkret nach den Bestandteilen fragt, die Kinder dies aber nicht auf die Formbarkeit beziehen.</p> <p>Ausnahme: Die Kinder stellen den Rückbezug wieder her (im Zweifelsfall mit Gewichtung arbeiten).</p> <p>Es wird zwischen Nennungen zu Bestandteilen des Sandes und des Lehms differenziert, welche sich wiederum in drei Subkategorien gliedern (s.u.).</p>	<p><u>Ankerbsp. (wird codiert):</u></p> <p><i>I: Ihr sagtet ja jetzt hiermit (feiner Sand) geht das besser als hiermit (grober Sand) ; hast du das hiermit schon ausprobiert?</i></p> <p><i>B2: Ja.// B1: Ja, der bricht sofort auseinander.</i></p> <p><i>I: Wieso das denn? (B2 greift wieder zu dem groben Sand und beginnt zu formen)</i></p> <p><i>B1: Weil der aus Steinen besteht.</i></p> <p><u>Bsp. welches an dieser Stelle nicht codiert wird:</u></p>

		Die Subkategorie „Bestandteile genannt“ wird nur dann vergeben, wenn keine der anderen beiden Subkategorien („Eigenschaften Bestandteile“, „Einbezug der Teilchengröße“) genannt wurde, da in diesem Fall zwangsläufig die erste Subkategorie mit einbezogen ist.	<p><i>I: Warum kann dass....geht das jetzt mit dem Lehm so gut? Das andere wie ging das? Ging das..</i></p> <p><i>B1: Weil das klebrig ist.</i></p> <p><i>B2: Weil, das geht jetzt nicht weil das sofort auseinander fällt.</i></p> <p><i>I: Mh. Warum ist der Lehm so klebrig?</i></p> <p><i>B1: Weil der matschig ist.// B2: Weil der noch...weil der Wasser hat.</i></p> <p><i>(→ fällt unter Kategorie Wasser)</i></p>
Bestandteile – Sand	Bestandteile genannt	Der Bestandteil an sich wird als hinreichend für eine Begründung angesehen.	<i>L: Ich glaube, weil bei dem Sand so viele Steinchen drin sind, hält das nicht so gut zusammen.</i>
	Eigenschaften der Bestandteile	Es wird eine Eigenschaft des Bestandteils genannt, welcher dazu führt, dass der Sand eine geringe Plastizität aufweist.	<i>J: Beim Sand, den kann man nicht formen, weil die Steine dann nicht aneinander haften.</i>
	Einbezug der Teilchengröße	<p>Wird vergeben, wenn die Kinder die Größe der Bestandteile zur Begründung aufgreifen. Allerdings muss die Größe auch eine relevante Rolle spielen – zumeist handelt es sich um einen Vergleich von Korngrößen. Nicht codiert wird hingegen, wenn einfach nur kleine Teile/Partikel/Körner als Bestandteil genannt werden; dies wird unter Bestandteile codiert, da die Teilchengröße aber nicht fokussiert zu werden scheint.</p> <p>Hinzugezählt wird ebenfalls, wenn die Formbarkeit damit begründet wird wie "fein" (im Sinne von feinkörnig) ein Stoff ist. (→ Interpretation/Zusammenhang)</p>	<p><i>I: Habt ihr keine Idee? Warum könnte es mit dem einen besser gehen als mit dem anderen?</i></p> <p><i>B2: Weil der größer ist. Die haben größere Stückchen.</i></p> <p><i>NICHT codiert wird bspw.:</i></p> <p><i>N: Also Lehm, also oder Sand hat kleine Teilchen, also kleine Partikel, also die können nicht so richtig fest werden.</i></p>

Bestandteile – Lehm	Bestandteile genannt	Der Bestandteil an sich wird als hinreichend für eine Begründung angesehen. Im Gegensatz zum Sand können die Kinder (zu Beginn) die Bestandteile nicht benennen. Die Kategorie wird daher auch dann vergeben, wenn sie sich auf die (unbekannten) Bestandteile beziehen, da hier zum Ausdruck kommt, dass sie diese als bedeutsam erachten.	<i>A: Weil das (Sand) irgendwie nicht so zusammengeklebt ist wie da (Lehm): Weil das (Lehm) besteht ja auch aus anderen Sachen wie da (feiner Sand).</i>
	Eigenschaften der Bestandteile	Es wird eine Eigenschaft des Bestandteils genannt, welcher dazu führt, dass der Lehm eine große Plastizität aufweist.	<i>M: Aber beim Lehm und beim Ton, die einzelnen Teilchen halten so fest zusammen.</i>
	Einbezug der Teilchengröße	s. oben – analog	<i>M: Die kleineren Teilchen, zum Beispiel jetzt wenn man die Schluffteilchen sind ja nicht so groß und da sind dann ja auch Lücken drin. Aber die Tonteilchen sind ja so klein, die können sich noch dazwischenstopfen und dann ist das alles dicht.</i>
Teilchengröße – allgemeiner Zusammenhang		Es wird ein allgemeiner Zusammenhang zwischen Teilchengröße und Formbarkeit formuliert – zumeist in einer je...desto-Beziehung.	<i>M: Weil das Gröbste da sind auch immer ganz viele Löcher drin, das fällt dann immer leichter auseinander. I: Aha. M: Umso feiner, umso besser.</i>
Wasser	<i>Um unter diesen Code zu fallen muss nicht explizit Wasser als Wort angeführt werden. Es wird an dieser Stelle davon ausgegangen, dass den Kindern bewusst ist, dass es sich um Wasser handelt, auch wenn sie beispielsweise von "Feuchtigkeit" sprechen oder von "nass" und "trocken". Eine Textstelle wird jeweils nur einer Subkategorie zugeordnet; wenn eine Wechselwirkung codiert wird, wird davon ausgegangen, dass die Kinder Wasser auch als notwendig erachten.</i>		
	<i>Wasser als notwendiges Kriterium</i>	Hier zählen sowohl Äußerungen als auch Handlungen (zum Beispiel wenn die Kinder, um etwas besser formbar zu machen, dem Lehm/Sand Wasser hinzufügen). Sehr häufig sind diese Aussagen kausal verknüpft:	<i>B1: Weil das dann zu hart ist. Die Feuchtigkeit muss da drin sein, damit man den formen kann.</i>

	<p><i>Wasser hat eine Wirkung</i></p>	<p>Dem Wasser wird eine Wirkung zugesprochen. Beispielsweise verleiht es Stabilität, gibt dem Lehm/Sand halt oder macht den Lehm weich.</p>	<p><i>I2: Und warum funktioniert das dann? B1: Weil der- // B2: Weil der- //B1: Weil die Feuchtigkeit den Halt gibt.</i></p> <p><i>I: Aha. Okay. (..) Warum muss das denn ein bisschen feucht sein, damit ihr das formen könnt? Was macht das Wasser da? D: Weicht das auf// N: Das hält das. N: Das hält das trocken - also flüssig. (korrigiert sich selber) D: Das macht das hier ein bisschen weicher.</i></p>
	<p><i>Wechselwirkung</i></p>	<p>Wird dann angeführt, wenn die Kinder andeute, dass nicht Wasser allein eine Wirkung erzielt, sondern zusätzlich ein zweiter Faktor notwendig ist, welcher ebenfalls eine Wirkung ausübt.</p>	<p><i>I: Guckt euch das nochmal an. Woran könnte das liegen, dass das (Schluff und Ton) besonders gut geht, das (Kies) besonders schlecht. N: Weil das hier (Schluff und Ton) kleiner ist. So feiner und das (Kies) sind große. Die Steine können ja gar nicht richtig halten, weil (unv.) aneinander sind. Das wird so schwer. Und das Wasser kann ja eigentlich gar nichts ausrichten. Bei dem hier (Schluff und Ton) wird das alles feucht, das wird klebriger und kann Stand halten oder so.</i></p>
<p>Lehm als Bindemittel</p>		<p>Diese Kategorie wird nicht in jedem Interview vergeben. Grund ist, dass dies zumeist dann auftrat, wenn die Kinder Lehm und Sand mischten, was nach dem Leitfaden nicht vorgesehen war und sich daher allenfalls spontan ergab.</p>	<p><i>I2: Ja, ich habe das nicht so ganz verstanden - wenn man - wenn der Sand alleine ist, dann kann man nicht so gut damit bauen, aber wenn der mit Lehm zusammen ist dann funktioniert es doch.// B2: Ja, und der...// Was macht der Lehm denn jetzt so ganz genau mit dem Sand?</i></p>

			<i>B1: Der verbindet den Sand.</i>
Hinweis Gefügebene		<p>Die Kinder betrachten das Bodengefüge und weniger die einzelnen Bestandteile. Hinweise geben Wörter, die typischerweise zur Beschreibung eines Gefüges¹ verwendet werden wie beispielsweise bröselig, bröckelig, einzeln, „das pappt zusammen“, das hängt zusammen“</p> <p>Wird eine Textstelle unter dieser Kategorie codiert, so wird sie NICHT zusätzlich den Eigenschaften zugeordnet (da aber in Sinneinheiten codiert wird, kann es gelegentlich zu Überlappungen beider Codierungen kommen).</p>	<p><i>I: Und du sagtest gerade, weil in dem Lehm so vieles drin ist. Oder was hast du gerade gesagt?</i></p> <p><i>B2: Weil in dem Lehm das alles zusammen-</i></p> <p><i>I: Was ist denn da alles zusammen?</i></p> <p><i>B2: Ja da hängt alles zusammen. Und bei dem-</i></p> <p><i>Auch hinzugezählt wird z.B, da der Unterschied zwischen feinem und trockenem Lehm auf Gefügebene erkannt wird:</i></p> <p><i>I: Aber haben wir nicht den Lehm eben gesiebt? War der da nicht fein?</i></p> <p><i>B2: Ja da war der trocken. Jetzt ist der so nass und da kann man- Weiß ich nicht, wie ich das beschreiben soll.</i></p>
Bilder (Analogien/ Metaphern)		Es werden Bilder (auch z.B. Analogien, Metaphern) zur Erklärung hinzugezogen.	<p><i>M: Das ist so fast wie Knete.</i></p> <p><i>N: Wenn die Feuchtigkeit wieder rausgezogen wird, dann bleibt das. Zum Beispiel, wenn jetzt Wind ist, dann tut sich der Grashalm ein bisschen bewegen. Und wenn kein Wind ist, dann tut es sich nicht bewegen. Beim Wasser ist es halt so, wenn das nass ist, dann lässt sich das kneten und wenn das von außen schon getrocknet ist, dann geht das nicht mehr.</i></p>

Explication	<p>Um die Aussagen der Kinder weiter konkretisieren zu können, wurden Elemente der explizierenden Inhaltsanalyse angewandt (Schritt 1.3). Ziel einer Explication ist die Klärung „interpretationsbedürftiger Textstellen“ unter Einbezug weiteren Materials (Mayring 2010, S. 85). Hierzu wurden Textpassagen, welche sich zwar nicht konkret auf die Formbarkeit bezogen, die Aussagen der Kinder bezüglich der Formbarkeit aber konkretisierten oder unterstützten, unter der Kategorie „Explication“ zusammengefasst. Um die Aussagen zu strukturieren und die Zuordnung zu den einzelnen Hauptkategorien zu erleichtern, wurden die Codings wiederum in die untenstehenden Subkategorien gegliedert (logischerweise sind nur jene Kategorien aufgelistet, zu denen Textstellen die im Rahmen eine Explication verwendet werden können, gefunden wurden).</p> <p>Aussagen, die im zweiten Kurs bezogen auf die Frage nach der Formbarkeit mageren Lehms getätigt wurden, wurden (soweit möglich) mit in das Kategoriensystem eingeordnet; Aussagen die im Rahmen der Concept Maps getätigt wurden, wurden – wie gehabt – nur bei direktem Bezug zur Formbarkeit ins Kategoriensystem eingeordnet.</p>		
Bestandteile			
	<i>Bestandteile Lehm</i>	Aussagen, durch welche ersichtlich wird, ob oder welche Vorstellung die Kinder von den Bestandteilen des Lehms haben. Außerdem Segmente die Bestandteile des Lehms näher beschreiben..	<p><i>I: Und zwar möchte ich, dass ihr mir erklärt, was Lehm ist. Also ihr müsst euch vorstellen, ich weiß das nicht und ihr erklärt mir das jetzt, ohne das ich den sehen. Ihr müsst mir das am Telefon erklären. Wie würdet ihr das machen?</i></p> <p><i>B1: Er besteht aus Ton, Schluff und Sand (Lennie,</i></p> <p><i>I: Erinnerst du dich jetzt auch an das Experiment?</i></p> <p><i>B1: Ja (...). Da waren die großen Kugeln Sand// B2: Klein(?)(unv.)// B1: Sand, Sand oder Lehm- // B2: Lehm- // B1: Und die kleinen waren Ton.</i></p> <p><i>B2: Ja- //B1: Oder Wasser</i></p> <p><i>I: Mh (...) Ton war das? Okay.// B1: Lehm oder Wasser (unv.)</i></p> <p><i>I: Was ist denn Ton?</i></p> <p><i>B1: Ton sind mikroskopische kleine Dinger (...) Die in Lehm sind.</i></p>

	<i>Begriffe Bestandteile</i>	Codierte Segmente tragen zur Klärung der Frage bei, inwiefern die Begriff, die zur Beschreibung der Bestandteile (insbesondere der des Sandes) genutzt werden, voneinander abgegrenzt werden können. In diesem Zuge wird auch beispielsweise der Frage nachgegangen, ob Sand aus Steinen besteht oder Steine beinhaltet.	<i>I: Warum habt ihr jetzt den Sand genommen? [...] B1: Da (grober Sand) sind mehr Steine, die kriegt man nicht so rund, der fällt auseinander.</i>
	<i>Unterschiede zwischen Materialien</i>	Die Kinder wurden aufgefordert die Materialien, die in einem Interview verwendet wurden zu beschreiben und Unterschiede zu benennen. Erklärungen hierfür werden hier codiert.	<i>I: Wasser, genau. Und was habe ich sonst noch hier? B1: Lehm, Sand und Erde. B2: Ja. Oder was ist es? Nein auch Sand. (schaut genauer in das Becherglas) B1: Es ist Sand. (beugt sich ebenfalls über das Becherglas) I: Mhm. Beides. // B2: Zwei Sand. I: Und wie unterscheiden sich die Sande? B2: Das ist heller und fein-// B1: Das ist Meer (mehr?) und das nicht. B2: Das ist feiner und heller. Und das ist dunkler und nicht so fein.</i>
	<i>Sonstiges</i>	Sonstige Äußerungen, welche sich auf die Bestandteile irgendeines der verwendeten Materialien beziehen.	
Wasser	<i>Trocknen von Lehm/Sand</i>	Die Kinder beschreiben was beim Trocknen des Lehms oder der Sandes geschieht bzw. stellen Unterschiede fest.	<i>I: Und was passiert dann, wenn ich den auf der Heizung stelle? Mit dem- B1: Dann wird er hart. // B2: Wird er hart. I: Mh, warum? Jetzt er war doch weich! B2: Weil er wahrscheinlich irgendwie die (Weichstoffe?) raus sind. // B1: Weil die ver-, weil</i>

			<p>das die Flüssigkeit dann austrocknet. // B2: Die Flüssigkeit ist dann weg.</p> <p>I: Und was hast du noch gesagt? (an Constantin gewandt)</p> <p>B2: Flüssigkeit ist dann weg.</p>
	Reversibilität	Es werden Äußerungen getroffen, die andeuten, ob die Kinder davon ausgehen, dass trockener Lehm durch Wasserzugabe wieder weich und ähnlich dem feuchten Lehm wird.	<p>I: Okay. Ihr habt ja jetzt gesagt, das hier- könnte man das (getrockneter Lehm) denn auch wieder weich machen?</p> <p>B1: Nein. // B2: Doch mit Wasser glaube ich. (...)</p> <p>I: Der Lars glaube das kann man wieder weich machen. Du glaubst eher nicht Emil?</p> <p>B1: Mm.</p> <p>I: Willst du mal ausprobieren Lars?</p> <p>(5 sek) (B2 gibt den getrockneten Lehm in ein Becherglas mit Wasser)</p> <p>B2: Er ist schon wieder weich.</p>
	Sonstiges	Sonstige Äußerungen, die sich auf das Wasser beziehen.	
Begriffliche Schwierigkeiten		Äußerungen, die aufgrund von Interpretationsschwierigkeiten nicht in das Kategoriensystem eingeordnet werden konnten, bspw. da die verwendeten Begriffe von den Auswertenden unterschiedlich gedeutet wurden. Häufig stellte sich bspw. die Frage, ob „fein“ mit feinkörnig gleichzusetzen ist oder ob es für die Kinder eher eine Eigenschaftszuschreibung ist, ohne damit eine Struktur des Stoffes aufzugreifen.	<p>A: Ja aber damit (feiner Sand), könnte man, wenn man jetzt was formen würde, wie gesagt, dann würde das so ein bisschen auch zerbröckeln. So. Das kann nicht zusammenbleiben. Weil das so richtig ganz mini-Teilchen sind, deswegen kann das nicht zusammen.</p>
Sonstiges		Sonstige Äußerungen, die keiner anderen Kategorie entsprachen und z.T zur Klärung individuellen Fragestellungen die sich innerhalb einer Gruppe ergaben, hilfreich sind. Zudem alle Äußerungen, die auf die Frage „Erkläre einem Freund was Lehm ist“ in I1-2, getätigt wurden.	

B. Arbeitsblätter (Kurs 2, Beispiele)

Formt einen kleinen Schneemann aus Sand und einen aus Lehm.



Was stellt ihr fest? Womit geht es besser?
mit dem Lehm und der sand
hält ohne Wasser nichts

Wie kommt das? Versucht dies zu erklären!

- Lehm klebt aber Sand klebt nicht. Das wegen bleibt der Lehm zusammen und der Sand nicht. Und weil die
- Sand Körner kann nicht zusammen halten aber Lehm ist wie Knete und Knete klebt.
- _____
- _____
- _____

(a) Ausgefülltes Arbeitsblatt der Gruppe JAHM in Interview I2-2

Formt einen kleinen Schneemann aus Sand und einen aus Lehm.



Was stellt ihr fest? Womit geht es besser?
Wir haben festgestellt das man mit Lehm einen besseren Schneemann formen kann.

Wie kommt das? Versucht dies zu erklären!

- ✓ Der Sand sind viele eingetragte Körner im Gegenteil zu Lehm und deswegen kann man Lehm besser ~~was~~ formen.
- _____
- _____
- _____
- _____
- _____

(b) Ausgefülltes Arbeitsblatt der Gruppe ALM in Interview I2-2

C. Ergänzende Ergebnisdarstellungen

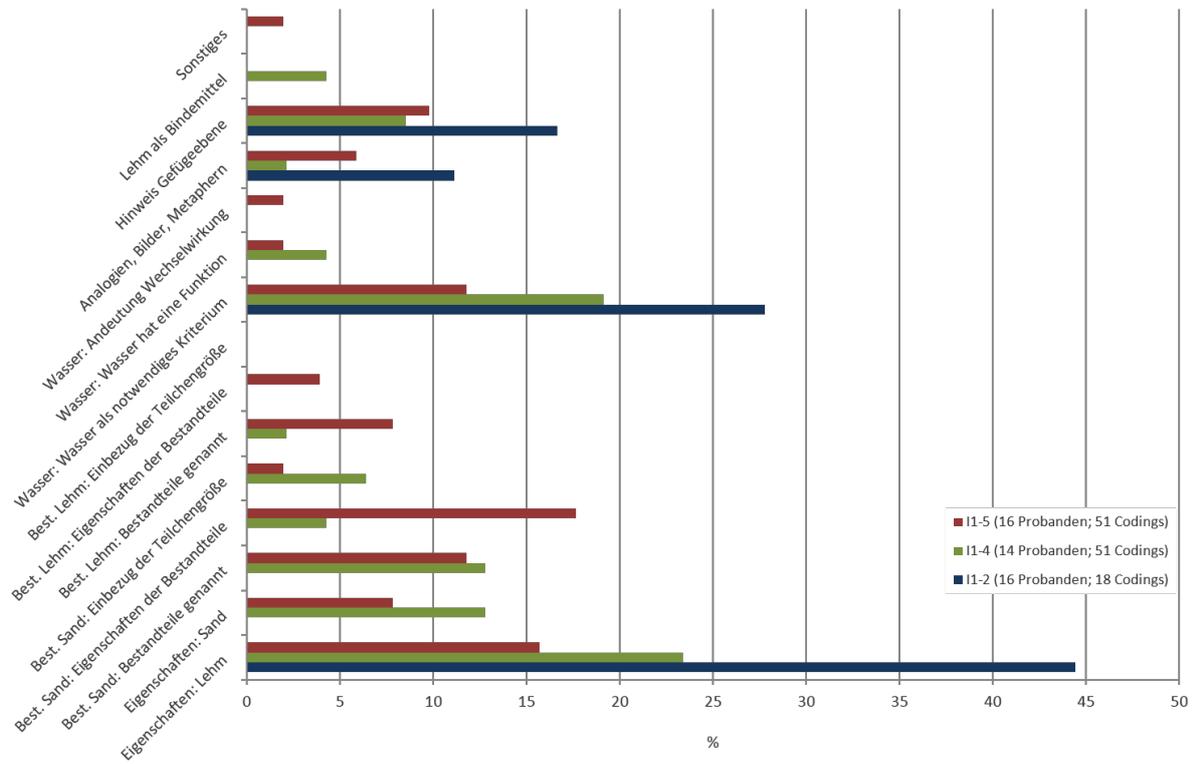


Abbildung C.1.: Vergleich der Codierungen im ersten Kurs unter Berücksichtigung der nur mit 100 bewerteten Codierungen.

C. Ergänzende Ergebnisdarstellungen

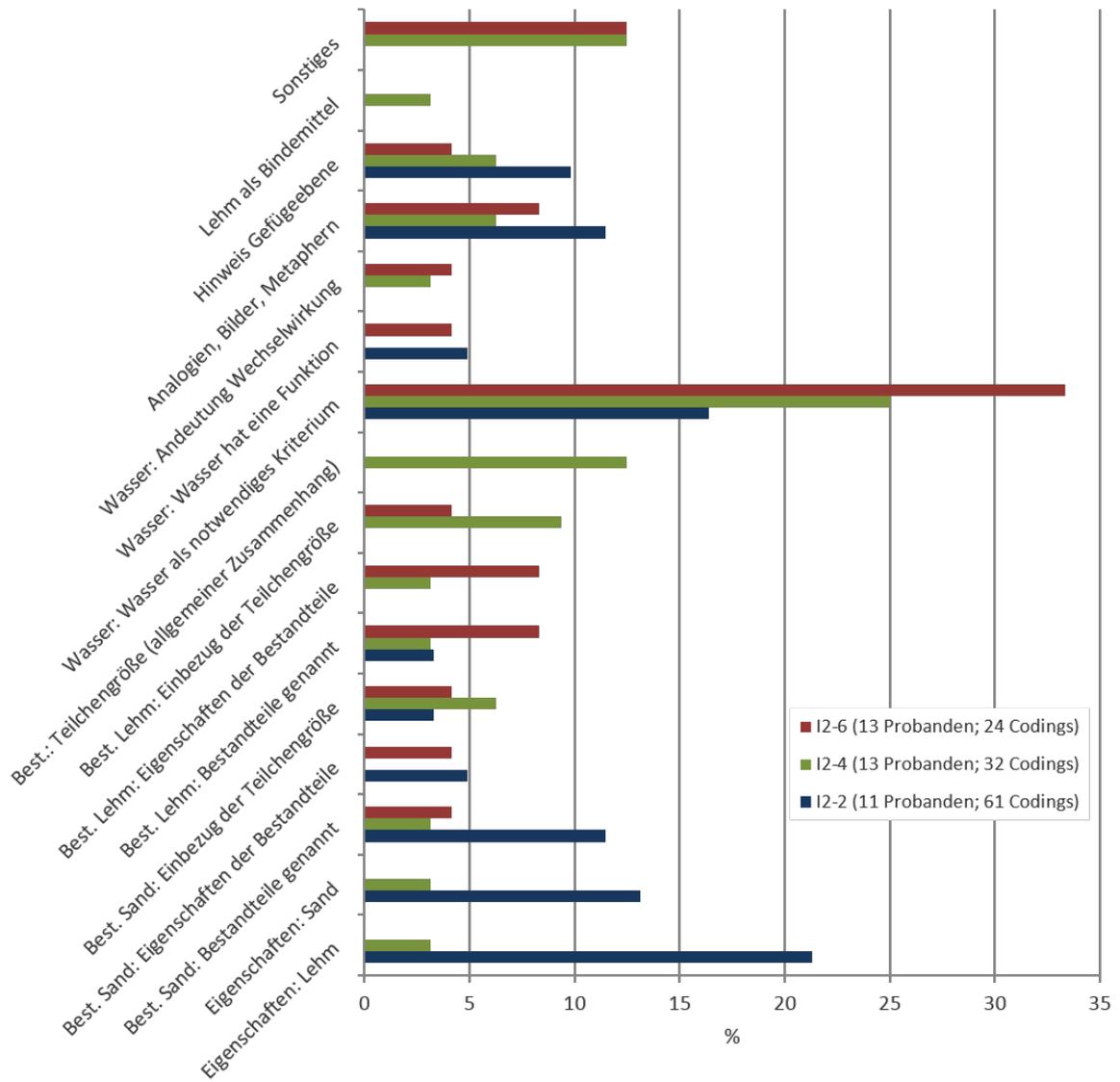


Abbildung C.2.: Vergleich der Codierungen im zweiten Kurs unter Berücksichtigung der nur mit 100 bewerteten Codierungen.

C. Ergänzende Ergebnisdarstellungen

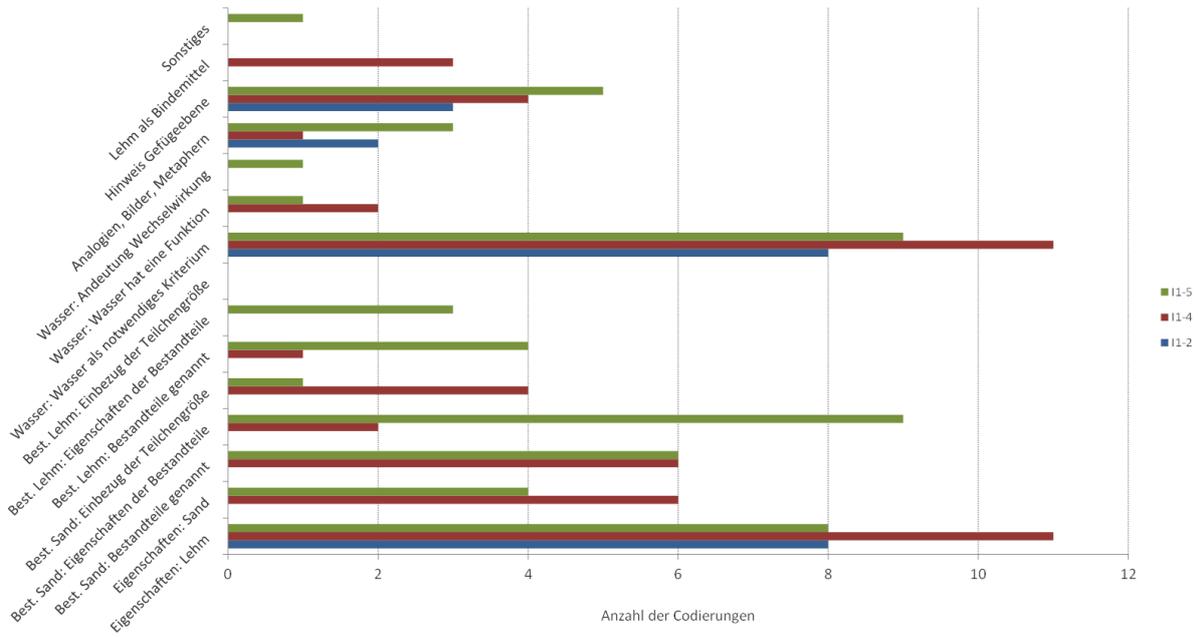


Abbildung C.3.: Verteilung der Äußerungen in den inhaltlichen Kategorien zur Formbarkeit im ersten Kurs. Dargestellt ist die absolute Anzahl der gelisteten Kategorien in den jeweiligen Interviews.

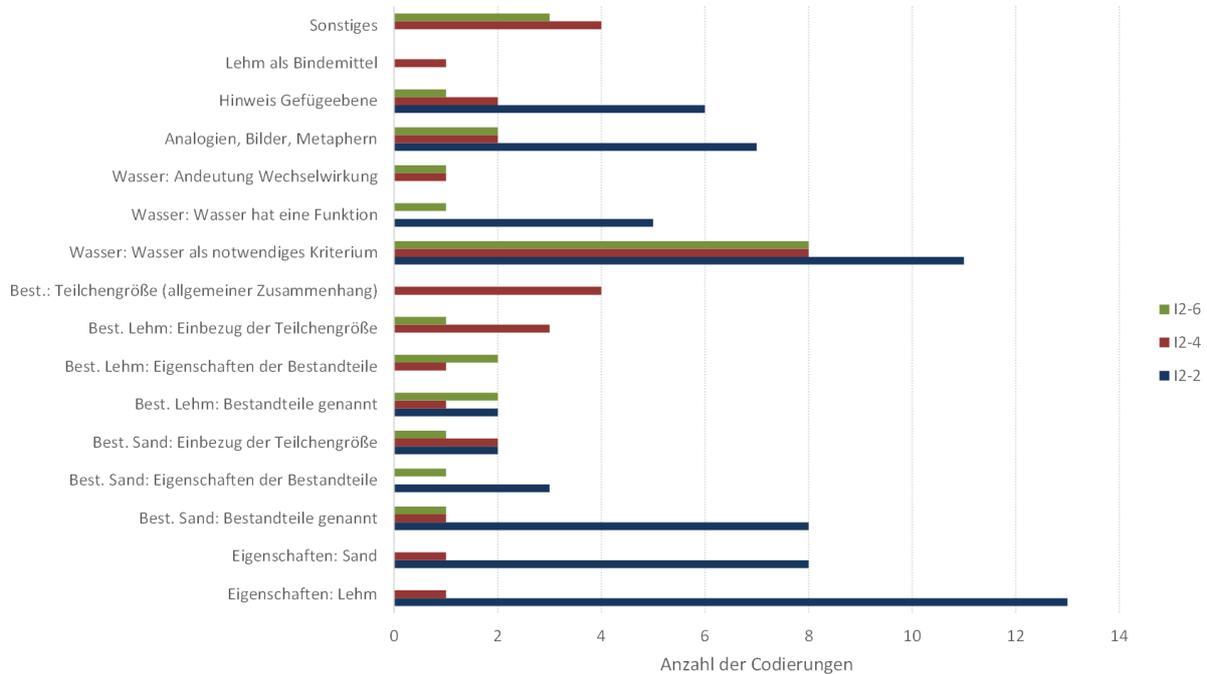


Abbildung C.4.: Verteilung der Äußerungen in den inhaltlichen Kategorien zur Formbarkeit im ersten Kurs. Dargestellt ist die absolute Anzahl der gelisteten Kategorien in den jeweiligen Interviews.

C. Ergänzende Ergebnisdarstellungen

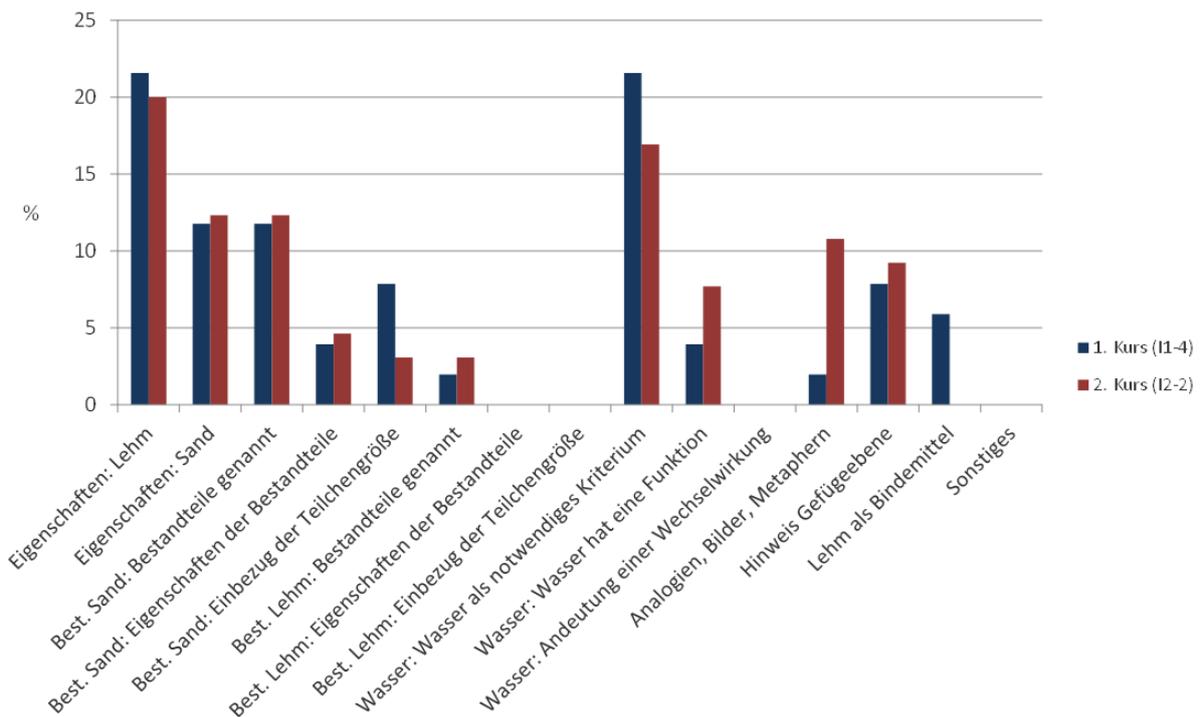


Abbildung C.5.: **Vergleich der Hauptkategorien des ersten und zweiten Kurses** bezogen auf den Vergleich der Formbarkeit von Lehm und Sand (I1-4 bzw. I2-2). Dargestellt sind die prozentualen Anteile der codierten Segmente innerhalb der jeweiligen Kategorie bezogen auf alle innerhalb des Interviews codierten Äußerungen (alle Kategorien).

D. Kategoriensystem *concept map*

1. Boden
 - 1.1 Boden = zweidimensionale Oberfläche
 - 1.2 Lehm ist im Boden
 - 1.3 Lehm ist Boden
2. Teilchen
 - 2.1 Bezug zur Größe allgemein
 - 2.2 Stoffportion
 - 2.3 Keine Vorstellung
 - 2.4 Bestandteil des Lehms
 - 2.5 Bezug zur Größe bez. auf Lehmbestandteile
 - 2.6 Essensteilchen
 - 2.7 Sonstiges
3. Sand
 - 3.1 Besteht aus Steinchen
 - 3.2 Sand als Best. d. Lehms
 - 3.3 Vorkommen
 - 3.4 Unterschied: Eigenschaften
 - 3.5 Ähnlichkeit: Eigenschaften
 - 3.6 Ähnlichkeit: Verwendung als Baustoff
4. Steine
 - 4.1 Stein als Bindemittel
 - 4.2 Eigenschaften (Form, Haptik)
 - 4.3 = getrockneter Lehm
 - 4.4 Verwitterungssubstrat
 - 4.5 Bestandteil des Sandes
 - 4.6 Bestandteil des Lehms
 - 4.7 Vorkommen
 - 4.8 Sind Teilchen
5. Ton
 - 5.1 Keine Vorstellung
 - 5.2 Vorkommen
 - 5.3 Gleiche/Ähnliche Eigenschaften (Formbarkeit)
 - 5.4 Gleiche/Ähnliche Eigenschaft (Sonstiges)
 - 5.5 Unterschiedliche Eigenschaften
 - 5.6 Unterschiedliche Zusammensetzung
 - 5.7 Bestandteil des Lehms
 - 5.8 Ton als Bindemittel im Lehm
 - 5.9 Korngröße
6. Schlamm
7. Matsche
8. Mineralien
9. Knete
10. Klebstoff
11. Keramik
12. Erde
13. Wasser

Abbildung D.1.: **Kategorien zum durchgeführten *concept map***. Nicht alle der Begriffe wurden näher ausdifferenziert und analysiert. Diese enthalten entsprechend keine Subkategorien.