

Kapitel 7

Konzeptbildung in einem absoluten Referenzsystem

Die bisher vorgestellten Experimente galten in erster Linie der Untersuchung der Fragen, wie sprachliche Symbole in sensorischer (hier: visueller) Wahrnehmung verankert werden können, in welcher Weise die unterschiedlichen Modalitäten dabei interagieren und in welcher Weise sich die Situiertheit der Lernaufgabe auf die gebildeten Konzepte niederschlägt.

In der zweiten Reihe von Experimenten verschiebt sich der Fokus nun auf die Frage, ob und in welcher Weise die sprachlichen Eingaben Einfluss auf die Art der Konzeptualisierung nehmen können. Viele empirische Befunde zeigen Evidenzen, dass die Art sprachlicher Kodierung Einfluss auf die Art der Kategorisierung hat (Abschnitt 3.4). Die Grundannahme im System LOKATOR ist, dass sich ein solcher Einfluss während der Konzeptbildung manifestiert, die gebildeten Konzepte selbst also sprachspezifisch strukturiert sind.

Die durchgeführten Experimente entsprechen den im vorherigen Kapitel beschriebenen. In dieser zweiten Untersuchungsreihe erhielten die Agenten allerdings sprachliche Eingaben, die einem absoluten Referenzsystem entsprechen. Da in der verwendeten Sprache Marquesan eine gerichtete Referenzachse existiert, auf der Richtungsangaben durch *ma tai o* (seewärts) und *ma uta o* (landwärts) verbalisiert werden, sowie eine ungerichtete Querachse, auf der die Referenz mittels *ma ko o* (quer) verbalisiert wird, wurden insgesamt drei Relationen gelernt. In Experiment 3 wurden die mögliche Dichotomie *ma tai o/ma uta o* erlernt (3A), sowie die weniger eindeutigeren Kombinationen *ma tai o/ma ko o* (3B) und *ma uta o/ma ko o* (3C).

Die Aufgabe in Experiment 4 ist komplexer. Hier mussten alle drei Relationen erlernt werden, wobei zunächst wiederum fünf Agenten unterschiedliche visuelle und sprachliche Eingaben erhielten (4A). In einem weiteren Experiment wurden fünf Agenten mit identischen visuellen und sprachlichen Eingaben konfrontiert (4B). Im letzten Experiment erlernten die Agenten zunächst die Dichotomie *ma tai o/ma uta o* und wurden dann zusätzlich mit der Relation *ma ko o* konfrontiert (4C).

7.1 Experiment 3: Dichotomie(n)

Die Überschrift „Dichotomie(n)“ ist hier in Analogie an Experiment 1A gewählt. Tatsächlich existiert bei den drei verwendeten Relationen des Marquesan nur eine einzige Dichotomie auf der gerichteten Referenzachse. Diese ist Gegenstand von Experiment 3A. In den Experimenten 3B und 3C wird sie dann aufgebrochen, indem jeweils eine gerichtete Relation mit der ungerichteten Relation *ma ko o* erlernt wird.

7.1.1 A: *ma tai o* vs *ma uta o*

Wie schon in allen vorherigen Experiment wurden wiederum fünf Agenten erzeugt. Diese explorierten ihre Umwelt (siehe Abbildungen 5.3 und 5.16) und erhielten sprachliche Eingaben, die eine absolute Referenz realisierten. Ein Objekt wurde entweder als *ma tai o* oder als *ma uta o* eines Referenzobjekts bezeichnet. Dies entspricht den Relationen auf der gerichteten Referenzachse. Da eine solche absolute Referenz in der Umwelt verankert ist, sollte sich während der Konzeptbildung ein Ankerpunkt in der Umwelt herausbilden, auf den bezogen die Merkmalsberechnungen stattfinden. Visuell uneingeschränkt wahrnehmbar ist der Berg, so dass dieser als Bezugsobjekt in Betracht kommt.

Die Agenten erhielten jeweils 1600 sprachliche Eingaben, die gegebenenfalls die Konzeptualisierungsroutinen anstießen. Etwa jeweils die Hälfte dieser 1600 Eingaben realisierte eine der beiden Relation *ma tai o* und *ma uta o*. Für die fünf Agenten schwankte die Anzahl der Relationen zwischen 756 (47.25%) und 804 (50.25%) für *ma tai o* und entsprechend zwischen 796 (49.75%) und 844 (52.75%) für *ma uta o*.

Ergebnisse (qualitativ) Wichtigstes Ergebnis dieses Experimentes ist die Herausbildung eines Ankerpunkts für die Berechnungen der Merkmale und damit für die Verankerung der Konzepte, der außerhalb des Agenten liegt. Bei diesem Ankerpunkt handelt es sich um *obj0* (den Berg). Für diesen Ankerpunkt sind Kategorisierungserfolg und perzeptuelle Systeme der Agenten in Abbildung 7.1 dargestellt. Nach 1600 Versuchen haben alle Agenten einen Kategorisierungserfolg zwischen 90 und 100% erreicht. Bei der Modifizierung der perzeptuellen Systeme fällt die bei allen Agenten zu beobachtende weitreichende Differenzierung des Merkmals ABS (jeweils links unten) auf.

Exemplarisch sind Konzepterfolg und konstituierende Merkmalsdetektoren für Agent 3 in Abbildung 7.2 dargestellt. Auch in diesem Fall lassen sich wieder deutlich zwei Phasen des Kategorisierungserfolges erkennen. Einer instabilen Anfangsphase folgt eine stabile Phase auf hohem Niveau. Eine genauere Analyse der konzeptkonstituierenden Merkmalsdetektoren zeigt, dass für dieses Merkmal insbesondere der Wertebereich zwischen 0.25 und 0.5 für das Konzept MA UTA

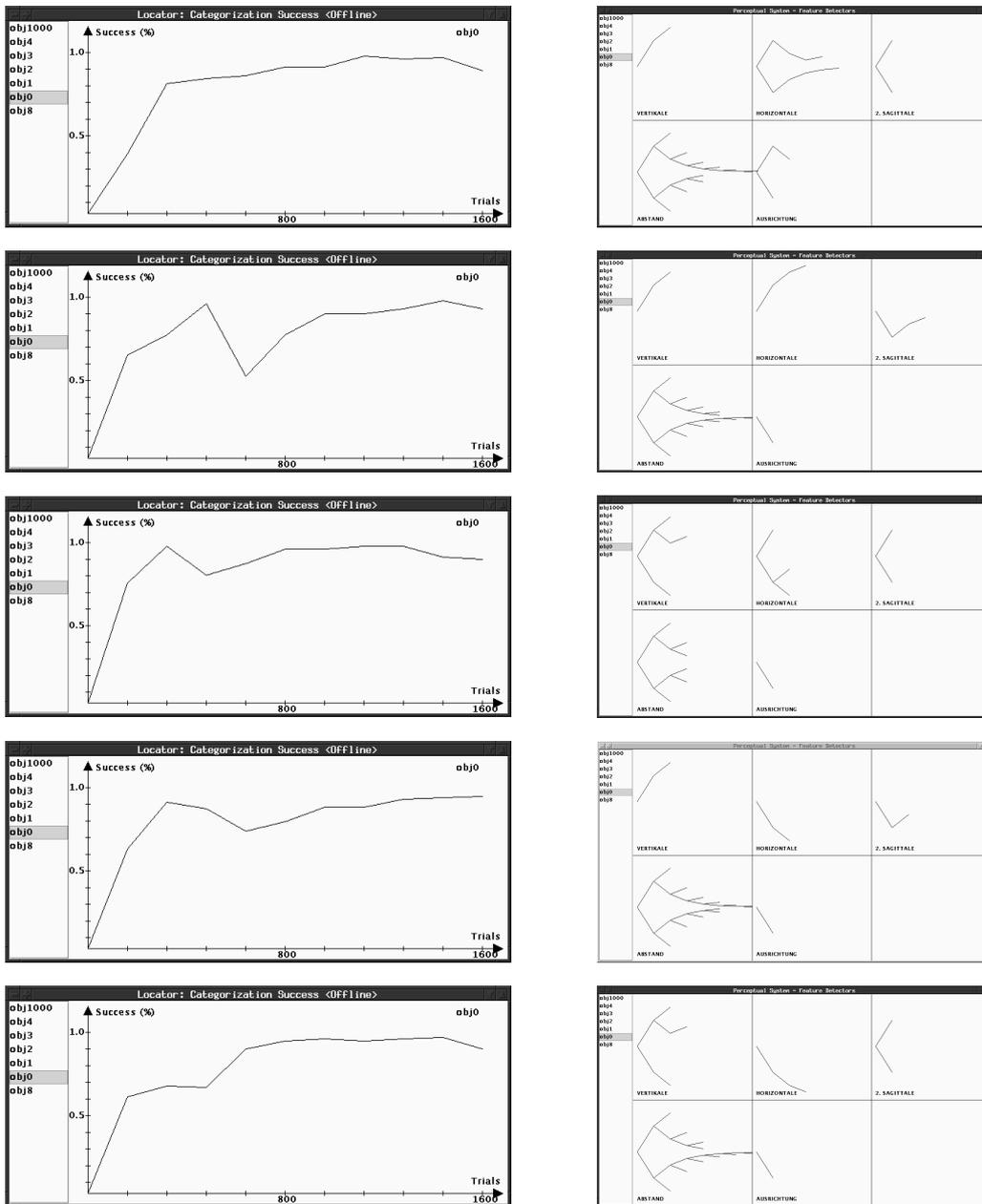


Abbildung 7.1: Experiment 3A: *ma tai o* vs *ma uta o*. Kategorisierungserfolg (links) und perzeptuelles System (rechts) der Agenten 1–5.

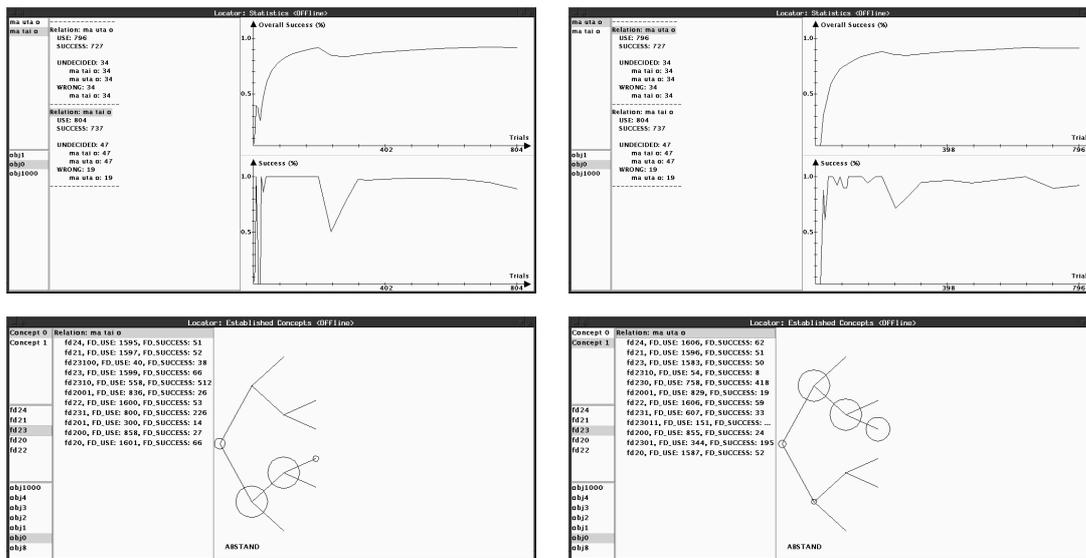


Abbildung 7.2: Experiment 3A: *ma tai o* vs *ma uta o*. Konzepterfolg (oben) und verwendete Merkmale (unten) von Agent 3.

O und der Bereich zwischen 0.5 und 0.75 für das Konzept MA TAI O relevant ist. Die anderen Merkmale spielen kaum eine Rolle.

Ergebnisse (quantitativ) Die quantitative Auswertung folgt dem aus den Experimenten 1 und 2 bekanntem Muster. Es wurden wiederum insgesamt acht Kovarianzanalysen gerechnet, von denen die eine Hälfte auf die einzelnen Agenten bezogen war, die andere Hälfte auf das Gesamtsystem, indem der Mittelwert über die fünf Agenten an zehn Messpunkten in die Berechnung einfluss.

Unter der Annahme der in den Experimenten 1 und 2 beobachteten Phasenteilung wurden die Analysen einmal über den gesamten Zeitraum des Experimentes gerechnet und einmal nur unter Berücksichtigung der stabilen Phase. Es wurde jeweils eine Analyse für den Kategorisierungserfolg und eine für den Kategorisierungsfehler gerechnet.

Das Ergebnis der Kovarianzanalysen bezogen auf die Agenten findet sich in Tabelle 7.1. Abbildung 7.3 zeigt den mittleren Kategorisierungserfolg der Agenten 1 bis 5 für die in den Spracheingaben verwendeten Relationen. Die Werte für das System LOKATOR ergeben sich als Mittelwert über den fünf Agenten. Gleiches gilt für die in Abbildung 7.4 dargestellten mittleren Fehlerraten. In der stabilen Phase ergibt sich ein signifikanter Effekt für die Fehlerrate zwischen den Relationen: $F_F(1, 39) = 9.13, p < 0.01$. Abbildung 7.4 zeigt, dass die Agenten im Mittel weniger Fehler für die Relation *ma tai o* machen: 2.2% (*ma tai o*) vs 3.9% (*ma uta o*).

	gesamt			stabil		
	df	F_E	F_F	df	F_E	F_F
Agenten	4,89	0.91	0.80	4,39	1.49	0.62
Relationen	1,89	0.45	1.97	1,39	3.14	9.13**
A x R	4,89	0.12	0.19	4,39	0.06	0.44

$p < 0.05^*$, $p < 0.01^{**}$

Tabelle 7.1: Experiment 3A: *ma tai o* vs *ma uta o*. Kovarianzanalysen bezogen auf die Agenten.

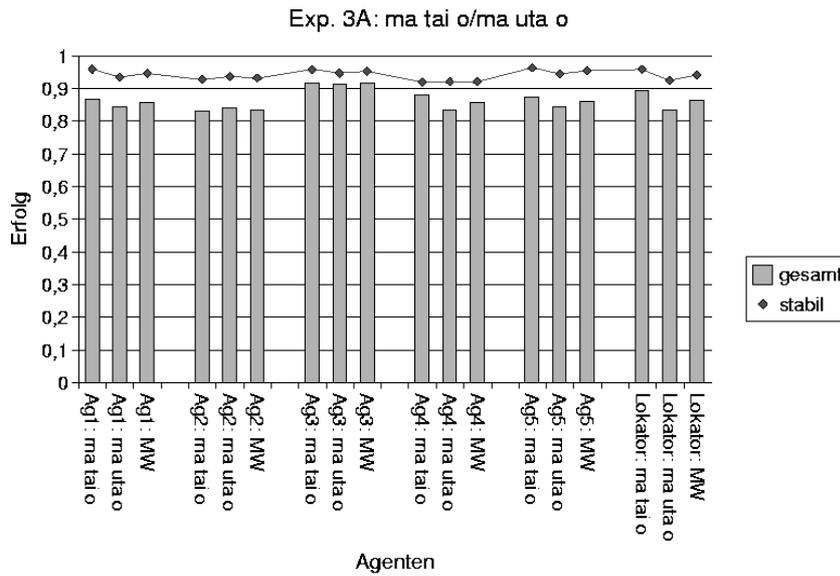


Abbildung 7.3: Kategorisierungserfolg der Agenten und des Gesamtsystems.

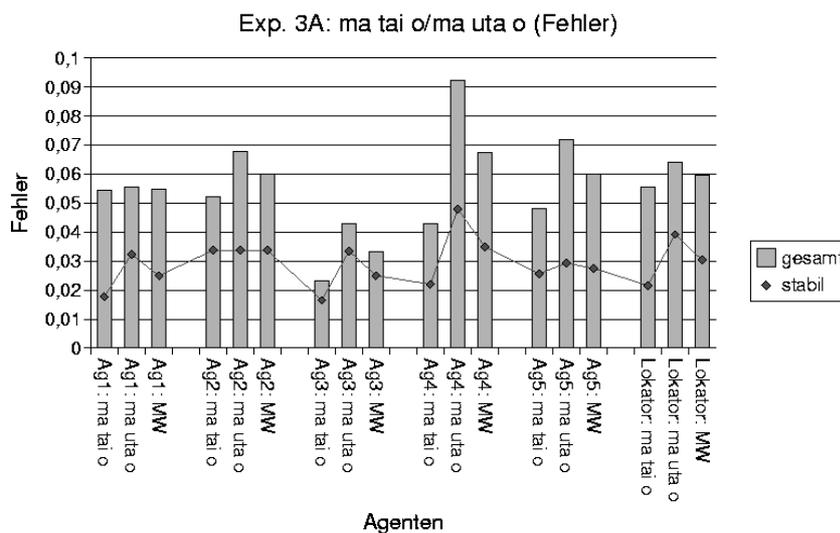


Abbildung 7.4: Kategorisierungsfehler der Agenten und des Gesamtsystems.

	gesamt			stabil		
	df	F _E	F _F	df	F _E	F _F
Versuche	9,79	12.57**	9.93**	4,39	2.18	0.68
Relationen	1,79	0.50	3.04	1,39	3.43	9.30**
V x R	9,79	0.39	0.46	4,39	0.27	0.28

$p < 0.05^*$, $p < 0.01^{**}$

Tabelle 7.2: Experiment 3A: *ma tai o* vs *ma uta o*. Kovarianzanalysen bezogen auf die Anzahl der Versuche.

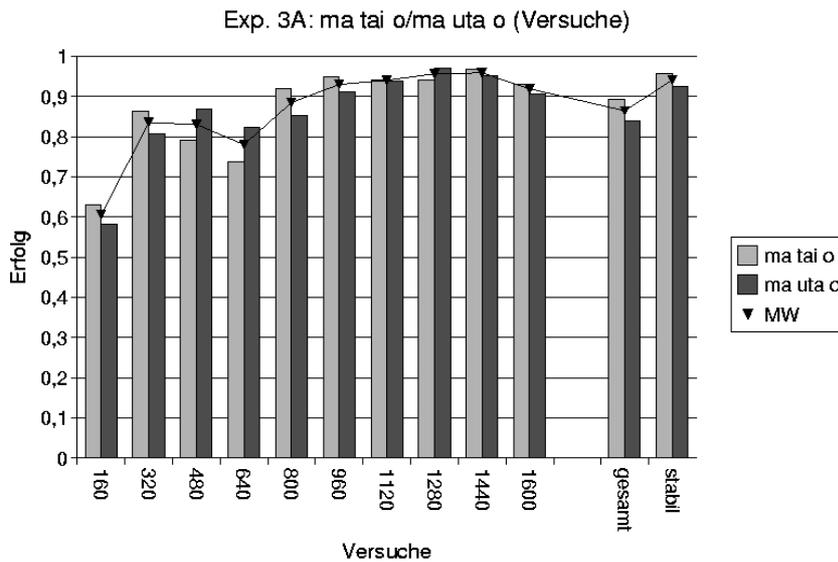


Abbildung 7.5: Kategorisierungserfolg während der Versuche.

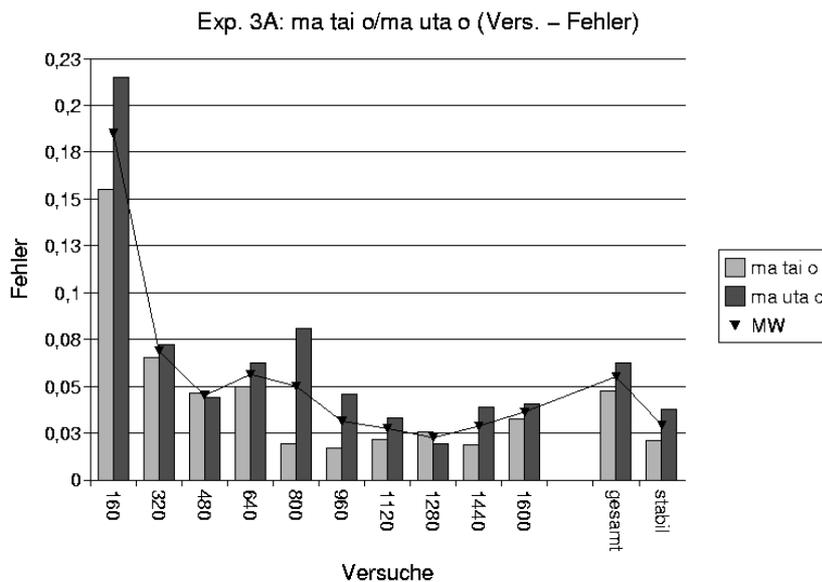


Abbildung 7.6: Kategorisierungsfehler während der Versuche.

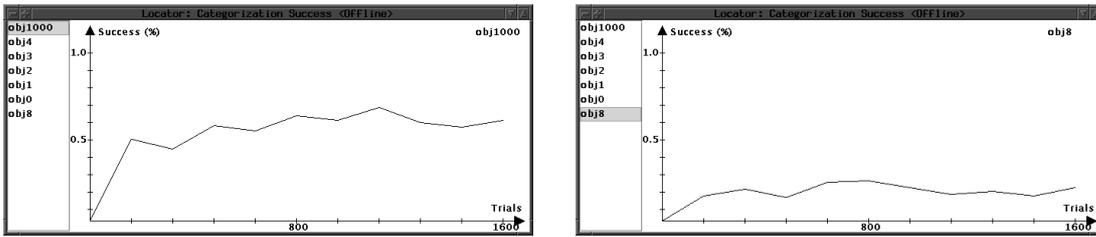


Abbildung 7.7: Experiment 3A: *ma tai o* vs *ma uta o*. Kategorisierungserfolg für Agent 1 unter Verwendung der Ankerpunkte *obj1000* (Agent) und *obj8* (Zaun).

Die Kovarianzanalyse bezogen auf die Anzahl der Versuche zeigt keine Überraschungen (Tabelle 7.2). Ein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Messpunkten, der sich bei Berücksichtigung aller Messpunkt ergibt ($F_E(9,79) = 12.57, p < 0.01$ bzw. $F_F(9,79) = 9.93, p < 0.01$), verschwindet, wenn nur die stabile Phase betrachtet wird. Zusätzlich bestätigt sich der Effekt zwischen den Relationen für die Fehlerrate in der stabilen Phase: $F_F(1,39) = 9.3, p < 0.01$.

Diskussion Wichtigstes Ergebnis dieses ersten Experimentes unter Verwendung eines absoluten Referenzrahmens für die sprachlichen Eingaben ist die erfolgreiche Etablierung eines Ankerpunkts, der sich außerhalb des Agenten befindet. Dies ist unerlässliche Voraussetzung für den Erwerb eines absoluten Systems, wie es im Marquesan realisiert ist. Nicht notwendig ist die Beschränkung auf einen visuell zugänglichen Ankerpunkt. Diese Beschränkung ergibt sich aus der Sensorik des verwendeten Simulationssystem und dem Verzicht auf Komponenten wie ein Gedächtnis, das beispielsweise ein mentales Tracking der aktuellen Position erlauben würde. In LOKATOR ist die Etablierung eines absoluten Systems daher auf visuelle Hinweise angewiesen.

Als erfolgreicher Ankerpunkt erweist sich *obj0* (der Berg). Alle übrigen möglichen Ankerpunkte zeigen eine deutlich geringere Performanz (Abbildung 7.7). Beste Alternative ist der Agent selber (*obj1000*), da er wie der Berg in allen Situationen präsent ist. Da ein absolutes System aber sprecherunabhängig ist, was sich insbesondere an der Unabhängigkeit von einer Rotation des Sprechers zeigt (vgl. Abschnitt 3.4), ist das Ergebnis mit einem solchen Ankerpunkt nur wenig besser als zufällig.

Als wichtigstes konzeptkonstituierendes Merkmal erweist sich das Merkmal ABS. Da die Relationen *ma tai o* und *ma uta o* gerichtet sind, ist dies eine gute Wahl. Abbildung 7.8 zeigt die prinzipielle Auswirkung dieses Merkmals für die beiden Relationen. Koordinatenursprung ist der Berg. Für eine räumliche Konstellation, die mit der Relation *ma tai o* verbalisiert werden könnte, wird dieses Merkmal positiv, für eine Konstellation, die *ma uta o* entspricht, negativ.

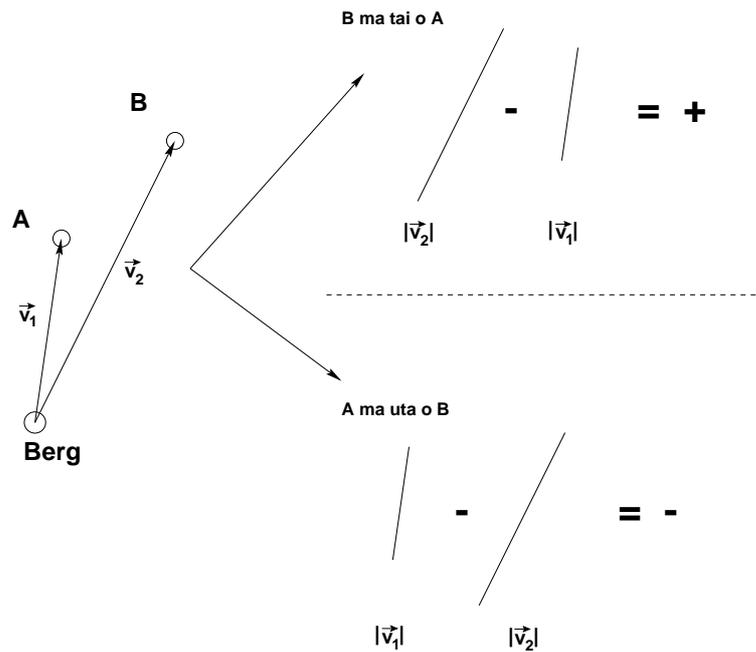


Abbildung 7.8: Zusammenhang zwischen dem Merkmal ABS und den Relationen *ma tai o* und *ma uta o*.

Da die Merkmalsdetektoren einen Wertebereich von 0 bis 1 aufspannen, werden negative Werte auf den Bereich von 0 bis 0.5, positive auf den Bereich von 0.5 bis 1 abgebildet.

Die Herausbildung des Ankerpunkts und die Modifizierung des perzeptuellen Systems bestätigt, dass die Art der verwendeten sprachlichen Referenzen Auswirkungen darauf hat, in welcher Weise das perzeptuelle System modifiziert wird und damit auch darauf, in welcher Weise sich Konzepte konstituieren. Im Vergleich zu den Experimenten 1 und 2 hat sich hier nur die Art der sprachlichen Eingaben geändert, während die visuellen Eingaben qualitativ gleich geblieben sind. Die sprachlichen Eingaben werden dabei als Abstraktions- und Selektionskriterium funktionalisiert. Die sprachlich vorgegebene Strukturierung der Welt hat somit direkt Auswirkungen auf die konzeptuelle Strukturierung der Welt und auf die wahrnehmbaren Attribute.

Die weiteren Ergebnisse bestätigen die in den Experimenten 1 und 2 gewonnenen Erfahrungen. Ein Merkmal bildet sich als notwendig für die Konzeptbildung heraus. Welche Merkmalsdetektoren tatsächlich konzeptkonstituierend sind ist aber agentenspezifisch und von den erfahrenen Situationen abhängig. Inhaltlich unterscheiden sich gleiche Konzepte in verschiedenen Agenten. Die quantitative Analyse zeigt keine Unterschiede zwischen den Agenten. Es existiert also kein Performanzunterschied die Kategorisierungsleistung betreffend zwischen den Agenten, obwohl die verwendeten Konzepte nicht inhaltsgleich sind.

Ebenfalls bestätigt sich die Existenz einer instabilen Anfangsphase, während der die Konzepte etabliert werden und häufiger Veränderung unterworfen sind. Haben sich die Konzepte etabliert, stabilisiert sich auch die Kategorisierungsleistung der Agenten.

7.1.2 B: *ma tai o* vs *ma ko o*

Die für dieses Experiment erzeugten fünf Agenten erhielten während der Exploration ihrer Umwelt sprachliche Eingaben, in denen ein Objekt entweder als *ma tai o* (seewärts) oder als *ma ko o* (quer) eines Referenzobjektes bezeichnet wurde.

Jeweils ungefähr die Hälfte der Spracheingaben realisierte eine der beiden Relationen. Die Zahlen lagen für die fünf Agenten zwischen 784 (49%) und 821 (51.31%) für *ma tai o* und zwischen 779 (48.69%) und 816 (51%) für *ma ko o*.

Ergebnisse (qualitativ) Alle fünf Agenten haben die Konzepte MA TAI O und MA KO O erlernt und wenden diese erfolgreich an (Abbildung 7.9). Ankerpunkt für die Berechnung der Merkmale ist *obj0* (der Berg). Im Gegensatz zu Experiment 3A fällt die größere Variabilität bei der Modifizierung des perzeptuellen Systems auf.

In fast allen Agenten sind die Merkmalsdetektoren dreier Merkmale an der Konzeptbildung beteiligt: H, 2S und ABS. Die Abbildungen 7.10 und 7.11 zeigen dies exemplarisch für die Agenten 4 und 5. Die konzeptkonstituierenden Merkmalsdetektoren für das Konzept MA TAI O liegen in folgenden Merkmalsbereichen: H 0 – 0.5, 2S in den äußeren Bereichen, d.h. von 0 – 0.25 und von 0.75 – 1, sofern die Merkmalsdetektoren entsprechend modifiziert sind. Das in 3A relevante Merkmal ABS spielt nur noch bedingt eine Rolle. Wenn es konzeptkonstituierend ist, liegen die Detektoren für MA TAI O im Bereich von 0.5 – 0.75. Inhalt des Konzeptes MA KO O sind für das Merkmal H Detektoren, die den gesamten Wertebereich dieses Merkmals abdecken und daher nicht als signifikantes Merkmal der Kategorisierung in Frage kommen. Für das Merkmal 2S liegen die konzeptkonstituierenden Detektoren im Bereich 0.25 – 0.625, für ABS im gesamten Wertebereich mit einem Fokus auf 0 – 0.5.

Die größere Variabilität bei der Modifizierung des perzeptuellen Systems findet sich in einer ebenfalls größeren Variabilität in den für die Konzeptbildung verwendeten Merkmalsdetektoren wieder. Gleiche Konzepte in verschiedenen Agenten verwenden unterschiedliche Merkmalsdetektoren zur Etablierung dieser Konzepte.

Wie schon in allen vorherigen Experimenten treten auch hier wieder zwei unterschiedliche Phasen in der Kategorisierungsleistung der Konzepte auf. Einer instabilen Phase folgt nach der Stabilisierung der Konzepte eine Performanz auf hohem Niveau (Abbildungen 7.10 (oben) und 7.11 (oben)).

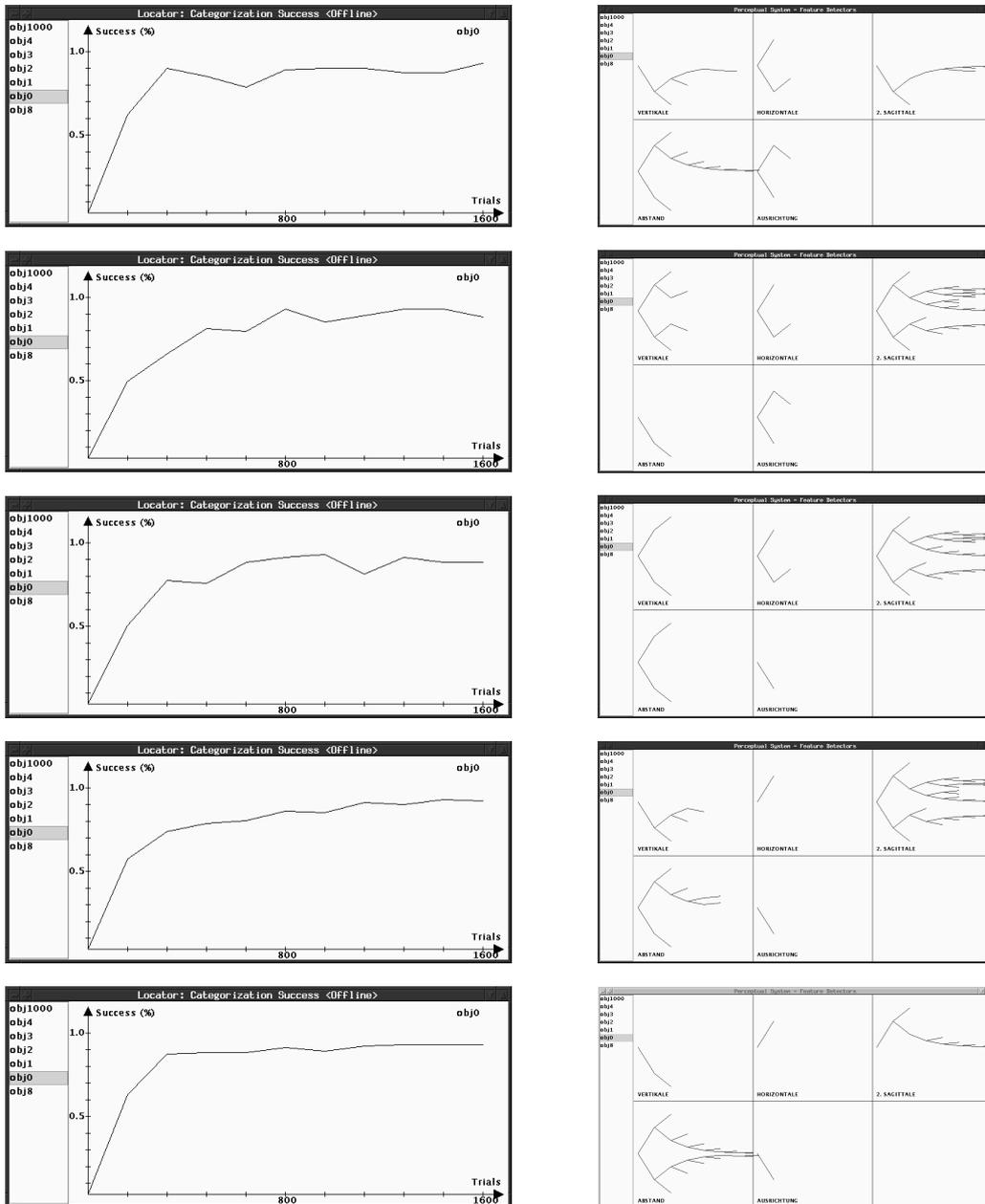


Abbildung 7.9: Experiment 3B: *ma tai o* vs *ma ko o*. Kategorisierungserfolg (links) und perzeptuelles System (rechts) der Agenten 1–5.

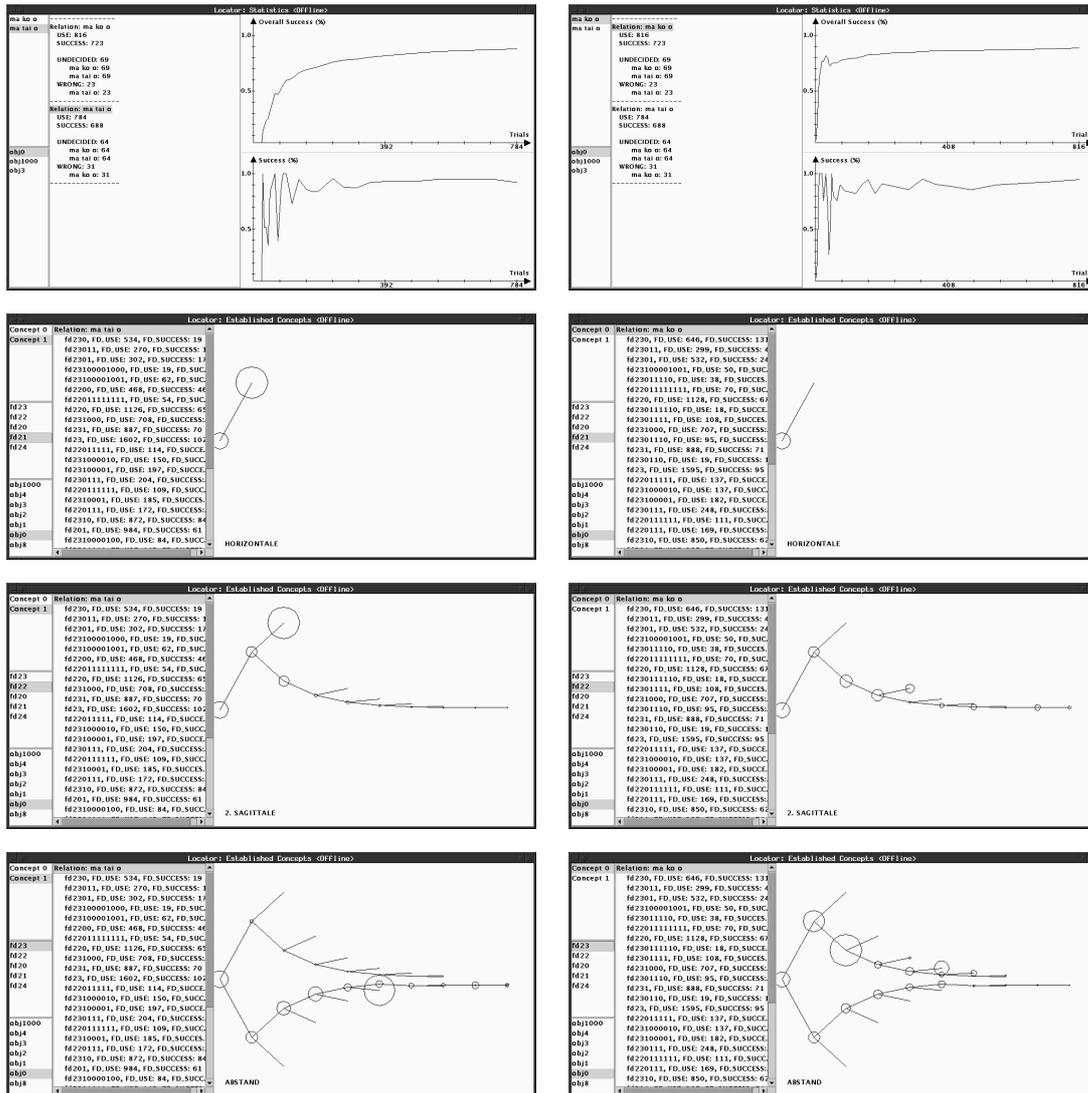


Abbildung 7.11: Experiment 3B: *ma tai o* vs *ma ko o*. Konzepterfolg (oben) und verwendete Merkmale von Agent 5.

Die Kovarianzanalysen bezogen auf die Anzahl der Versuche (Tabelle 7.4) zeigen zunächst den schon bekannten Effekt zwischen den Versuchen, wenn alle Messpunkte in die Berechnung einfließen: $F_E(9, 79) = 30.8, p < 0.01$ und $F_F(9, 79) = 19.10, p < 0.01$. Wie schon in den vorhergehenden Experimenten verschwindet dieser Effekt in der stabilen Phase. Desweiteren bestätigen sich die signifikanten Effekte für Unterschiede in der Fehlerrate zwischen den Relationen, die schon in den auf die Agenten bezogenen Kovarianzanalysen auftraten: $F_F(1, 79) = 12.41, p < 0.01$ für den Gesamtzeitraum und $F_F(1, 39) = 8.3, p < 0.01$ für die stabile Phase.

	gesamt			stabil		
	df	F_E	F_F	df	F_E	F_F
Agenten	4,89	0.88	1.76	4,39	1.44	9.93**
Relationen	1,89	0.12	4.56*	1,39	0.06	23.27**
A x R	4,89	0.10	0.19	4,39	4.07**	1.25

$p < 0.05^*$, $p < 0.01^{**}$

Tabelle 7.3: Experiment 3B: *ma tai o* vs *ma ko o*. Kovarianzanalysen bezogen auf die Agenten.

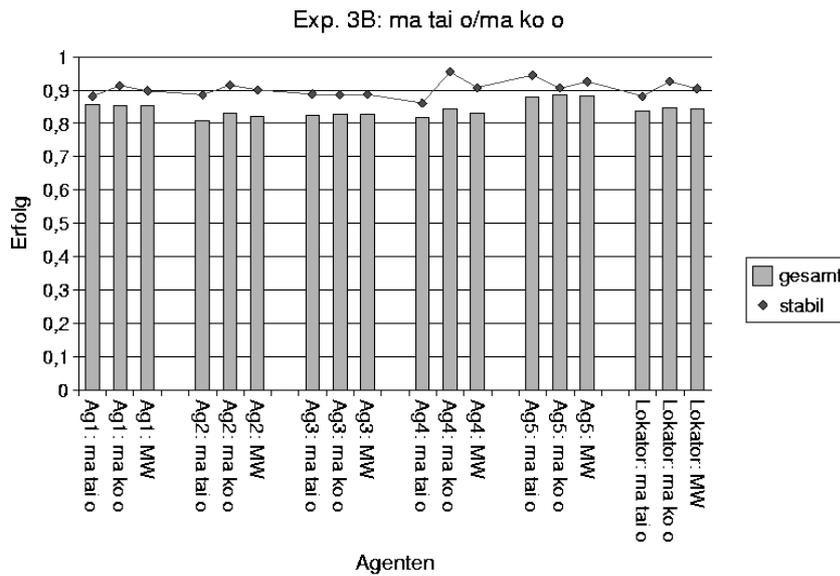


Abbildung 7.12: Kategorisierungserfolg der Agenten und des Gesamtsystems.

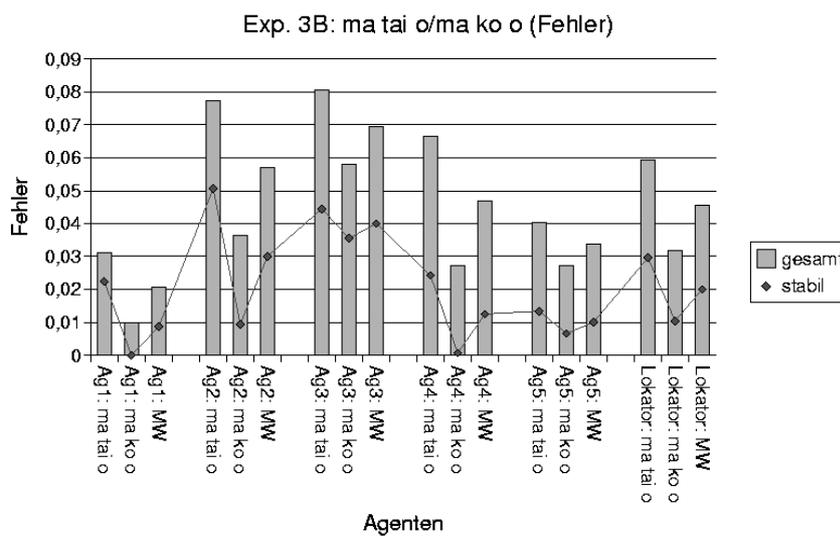


Abbildung 7.13: Kategorisierungsfehler der Agenten und des Gesamtsystems.

	gesamt			stabil		
	df	F_E	F_F	df	F_E	F_F
Versuche	9,79	30.80**	19.10**	4,39	0.89	0.15
Relationen	1,79	0.47	12.41**	1,39	0.07	8.30**
V x R	9,79	1.54	1.46	4,39	0.37	0.96

$p < 0.05^*$, $p < 0.01^{**}$

Tabelle 7.4: Experiment 3B: *ma tai o* vs *ma ko o*. Kovarianzanalysen bezogen auf die Anzahl der Versuche.

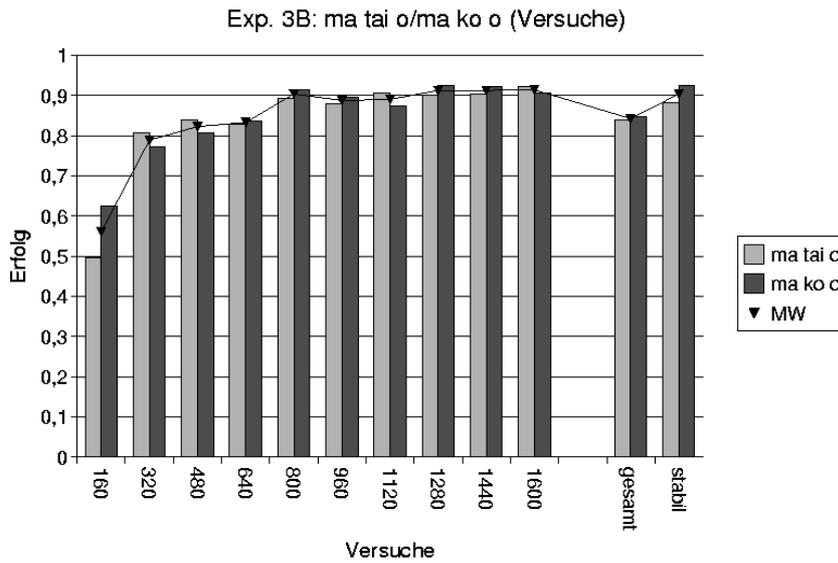


Abbildung 7.14: Kategorisierungserfolg während der Versuche.

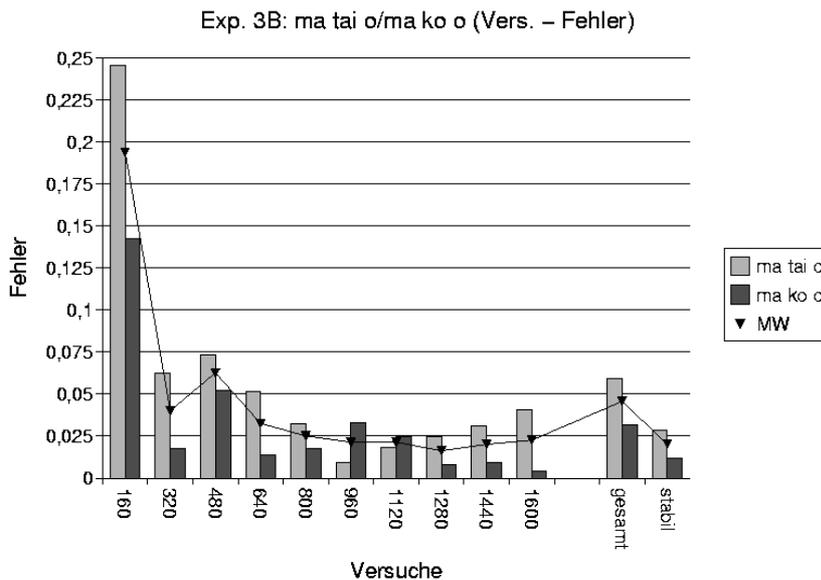


Abbildung 7.15: Kategorisierungsfehler während der Versuche.

Diskussion Ähnlich zu den Ergebnissen für das relative Referenzsystem zeigt sich auch hier die Abhängigkeit der Konzeptinhalte und der Anpassung der grundlegenden Auswertungsmechanismen an die erfahrenen Situationen während der Konzeptbildung. Durch die Verwendung der Relation *ma ko o* statt *ma uta o* ist eine andere Art der Grenzziehung zwischen Kategorien notwendig, die zu einer unterschiedlichen Modifizierung des perzeptuellen Systems und zu anderen Konzeptinhalten führt.

Auffälligstes Ergebnis ist die im Vergleich zu den vorherigen Experimenten größere Variabilität bei der Modifizierung des perzeptuellen Systems. Ein Hauptgrund für dieses Ergebnis ist in der Ungerichtetheit der Relation *ma ko o* zu suchen. Da in alle Merkmale eine Richtungskomponente einfließt, dies aber für das Konzept MA KO O unerheblich ist, ergeben sich mehr Möglichkeiten der Repräsentation als für die gerichteten Relationen. Von Bedeutung ist, ob ein Merkmal für die Lage auf der Querachse in Frage kommt. Die Richtung spielt dann keine Rolle. Das erklärt auch die geringere Fehlerrate für die Kategorisierung der Relation *ma ko o*, die in einem signifikanten Unterschied zwischen den beiden Relationen die Fehlerrate betreffend resultiert.

Die auf das Gesamtsystem bezogenen quantitativen Ergebnisse (Anzahl der Versuche) zeigen ähnliche Signifikanzen wie in Experiment 1C. Wie in 1C gibt es auch hier keine klare Dichotomie und die verwendeten sprachlichen Relationen beschreiben, bezogen auf den jeweiligen Ankerpunkt ähnliche räumliche Konstellationen. Dabei wird *rechts* analog zu *ma ko o* und *vor* analog zu *ma tai o* verwendet.

7.1.3 C: *ma uta o* vs *ma ko o*

Auch für dieses Experiment wurden fünf Agenten erzeugt. Die sprachlichen Eingaben während der Exploration der Umwelt lokalisierten ein Objekt *ma uta o* (landwärts) oder *ma ko o* (quer) eines Referenzobjektes. Insgesamt erhielt jeder Agent 1600 sprachliche Eingaben, die gegebenenfalls die Konzeptualisierungsroutinen anstießen. Von diesen 1600 Eingaben entfiel jeweils etwa die Hälfte auf eine der beiden beteiligten Relationen. Die Anzahl der Relationen variiert zwischen 752 (47%) und 846 (52.88%) für *ma uta o* und zwischen 754 (47.13%) und 848 (53%) für *ma ko o*.

Ergebnisse (qualitativ) Auch in diesem Experiment etablierten die Agenten die Konzepte und wendeten sie erfolgreich an (Abbildung 7.16). Als Ankerpunkt bildete sich der Berg heraus (*obj0*). Die Modifizierung der perzeptuellen Systeme ist ähnlich variabel wie in Experiment 3B. Besonders häufig bei der Konzeptbildung verwendet werden die Merkmalsdetektoren der Merkmale H und 2S. Abbildung 7.17 zeigt dies exemplarisch für Agent 4. Nicht mehr für alle Agenten relevant war das in Experiment 3A vorwiegend verwendete Merkmal ABS. Die

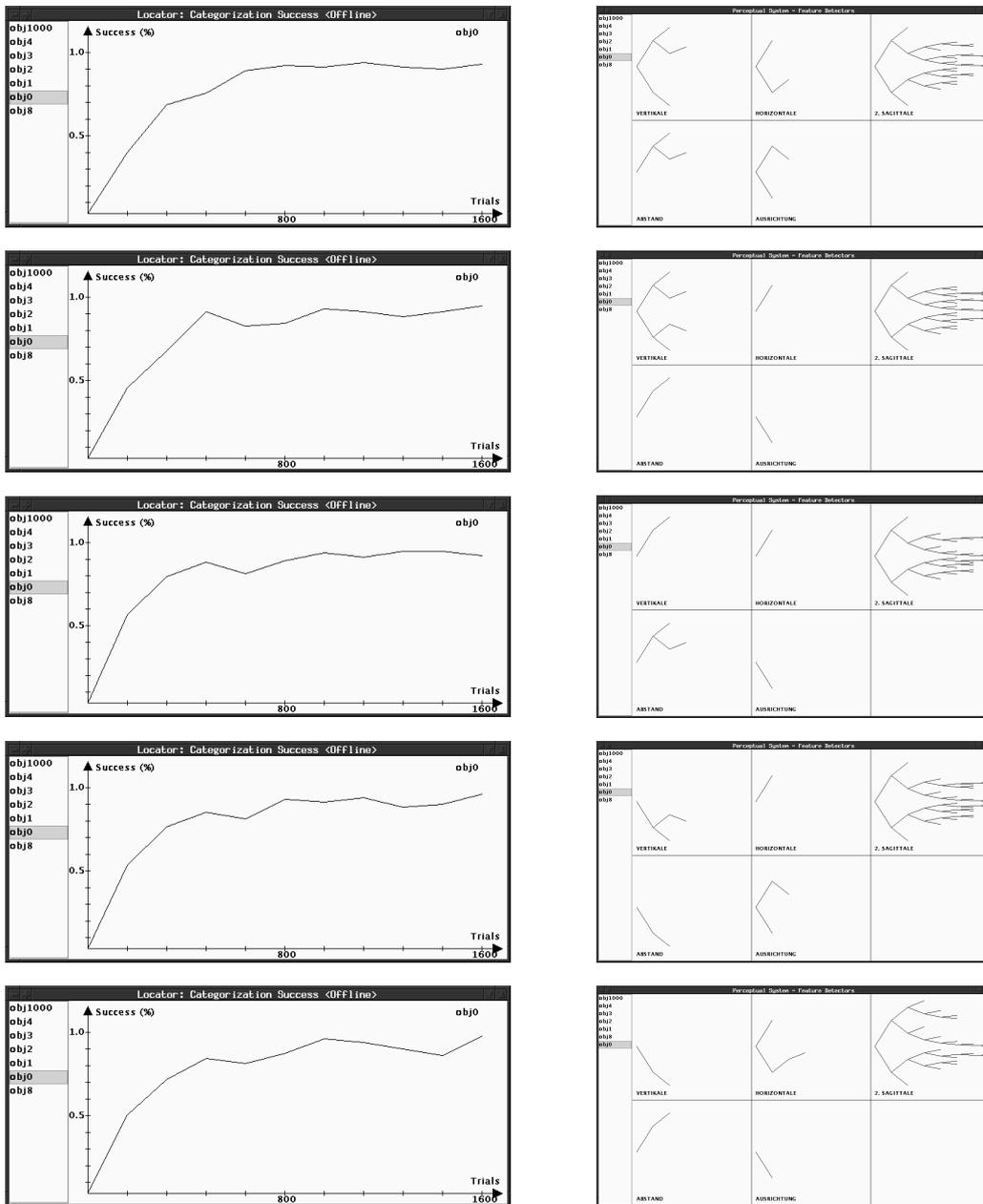


Abbildung 7.16: Experiment 3C: *ma uta o* vs *ma ko o*. Kategorisierungserfolg (links) und perzeptuelles System (rechts) der Agenten 1–5.

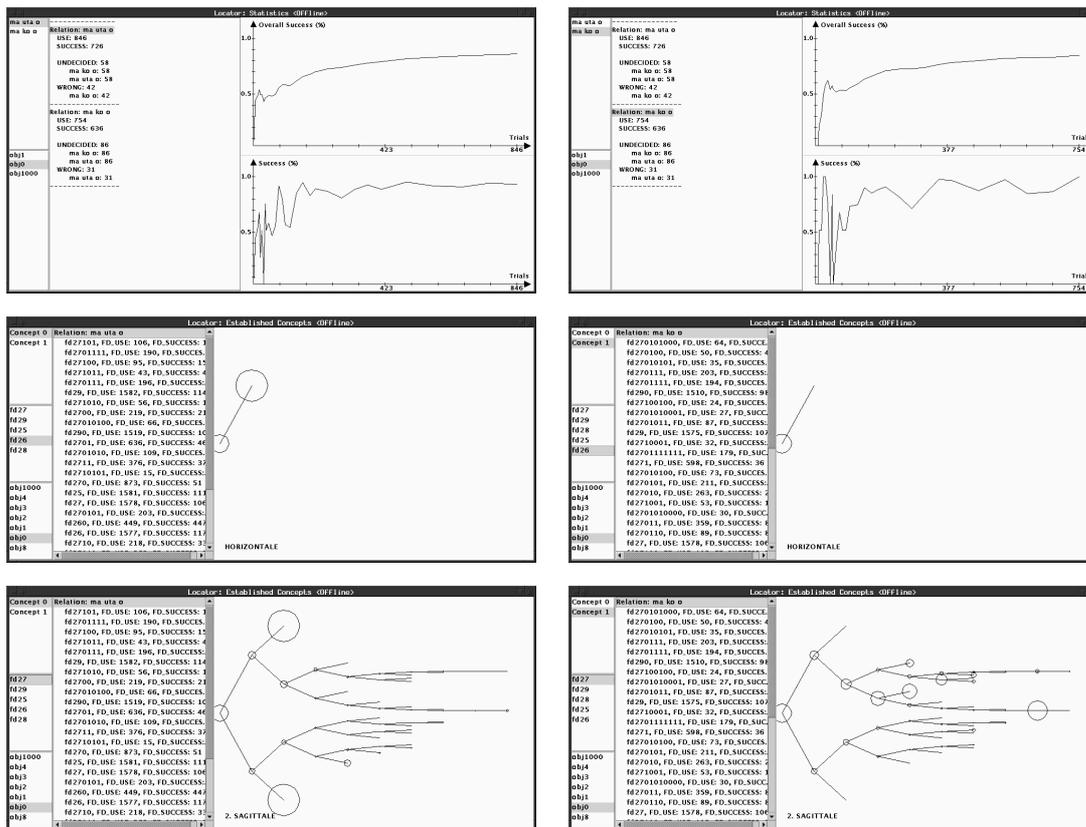


Abbildung 7.17: Experiment 3C: *ma uta o* vs *ma ko o*. Konzepterfolg (oben) und verwendete Merkmale von Agent 4.

Aufteilung in eine instabile Anfangsphase, die von einer Phase stabiler Performanz gefolgt wird, zeigt sich auch in diesem Experiment.

Ergebnisse (quantitativ) Bei den auf die Agenten bezogenen Kovarianzanalysen (Tabelle 7.5) ergibt sich in der stabilen Phase ein signifikanter Effekt zwischen den Relationen für die Fehlerrate: $F_F(1, 39) = 5.17, p < 0.05$. Im Mittel liegt die Fehlerrate für *ma ko o* mit 1.2% niedriger als für *ma uta o* mit 3.2% (Abbildung 7.19).

Die Kovarianzanalysen, die in Bezug auf das Gesamtsystem gerechnet wurden (Tabelle 7.6), zeigen die bereits aus den Experimenten 1 und 2 bekannten Effekte zwischen den Versuchen, wenn alle Messpunkte berücksichtigt werden ($F_E(9, 79) = 80.6, p < 0.01$ und $F_F(9, 79) = 27.89, p < 0.01$). Im Gegensatz zu den bisherigen Experimenten verschwinden diese Effekte aber nicht vollständig in der stabilen Phase. Für den Kategorisierungserfolg ist immer noch ein signifikanter Effekt feststellbar: $F_E(4, 39) = 2.85, p < 0.05$. Abbildung 7.20 zeigt, dass der

	gesamt			stabil		
	df	F_E	F_F	df	F_E	F_F
Agenten	4,89	0.20	0.24	4,39	0.40	1.00
Relationen	1,89	0.003	0.99	1,39	2.48	5.17*
A x R	4,89	0.09	0.91	4,39	0.44	1.43

$p < 0.05^*$, $p < 0.01^{**}$

Tabelle 7.5: Experiment 3C: *ma uta o* vs *ma ko o*. Kovarianzanalysen bezogen auf die Agenten.

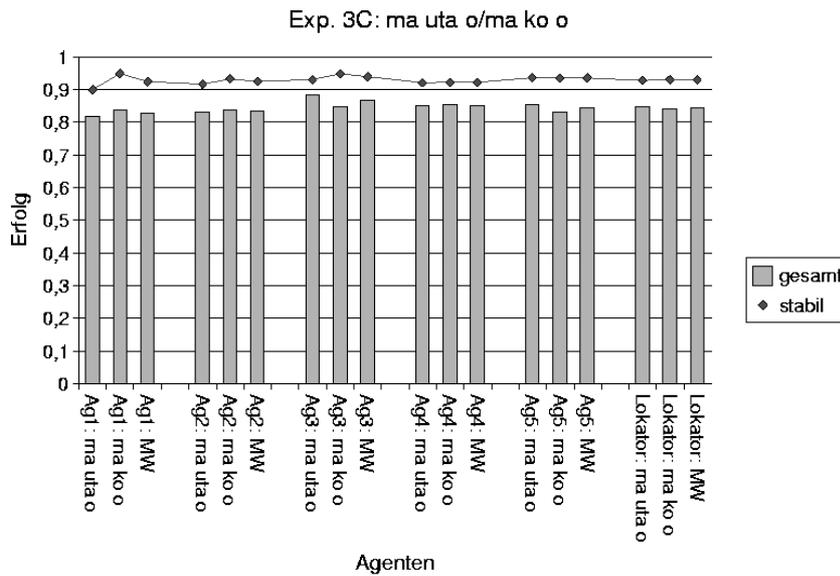


Abbildung 7.18: Kategorisierungserfolg der Agenten und des Gesamtsystems.

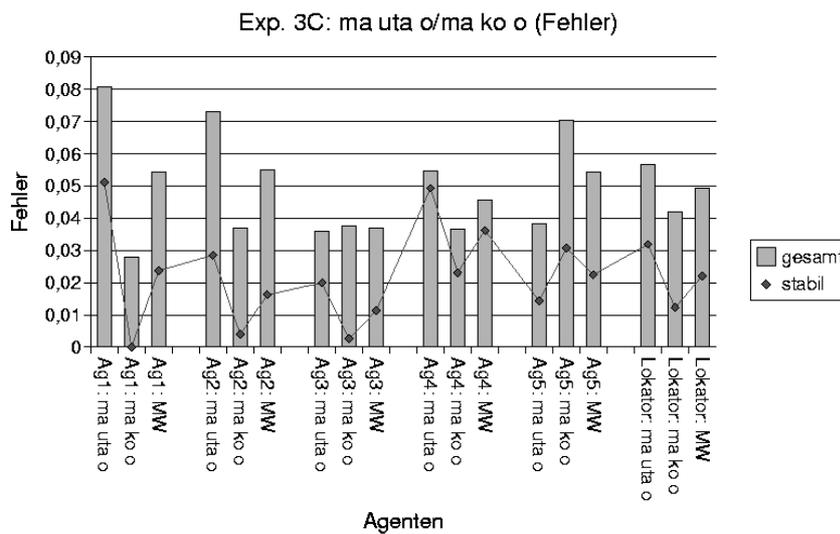


Abbildung 7.19: Kategorisierungsfehler der Agenten und des Gesamtsystems.

	gesamt			stabil		
	df	F _E	F _F	df	F _E	F _F
Versuche	9,79	80.60**	27.89**	4,39	2.85*	1.79
Relationen	1,79	0.03	3.75	1,39	3.06	5.56*
V x R	9,79	2.49*	3.32**	4,39	0.58	0.95

$p < 0.05^*$, $p < 0.01^{**}$

Tabelle 7.6: Experiment 3C: *ma uta o* vs *ma ko o*. Kovarianzanalysen bezogen auf die Anzahl der Versuche.

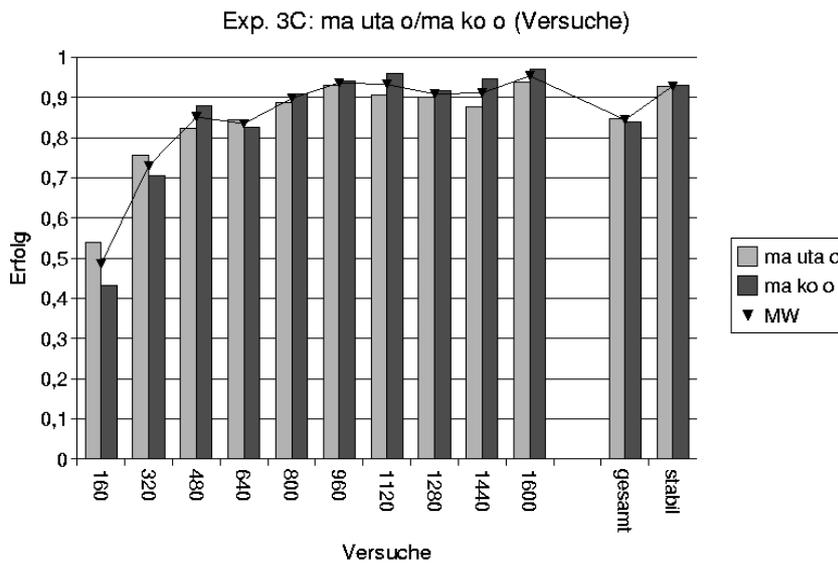


Abbildung 7.20: Kategorisierungserfolg während der Versuche.

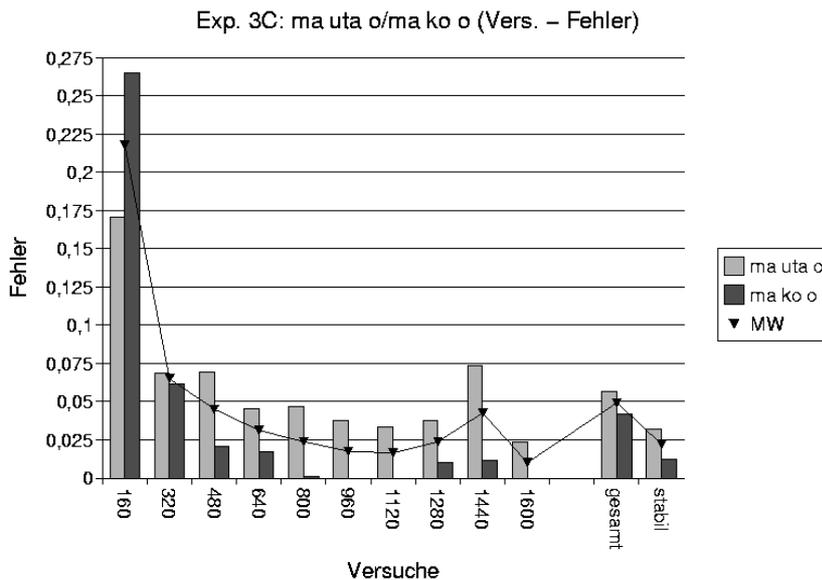


Abbildung 7.21: Kategorisierungsfehler während der Versuche.

Kategorisierungserfolg im Mittel zwischen 90.9% (1280) und 95.3% (1600) liegt.

In der stabilen Phase bestätigt sich der signifikante Unterschied zwischen den Relationen die Fehlerrate betreffend: $F_F(1, 39) = 5.56, p < 0.05$. Abbildung 7.21 verdeutlicht dieses Ergebnis.

Bei Betrachtung aller Messpunkte treten zusätzlich signifikante Interaktionen zwischen der Anzahl der Versuche und den beteiligten Relationen auf: $F_E(9, 79) = 2.49, p < 0.05$ und $F_F(9, 79) = 3.32, p < 0.01$. Diese verschwinden in der stabilen Phase. In der Anfangsphase liegt der Kategorisierungserfolg für die Relation *ma uta o* meist über dem Erfolg für *ma ko o* (Abbildung 7.20). Dieses Verhältnis ist an späteren Messpunkten ausgeglichen bzw. umgekehrt. Ebenso fällt bei der Fehlerrate auf, dass zunächst für die Relation *ma ko o* mehr Fehler gemacht werden (Abbildung 7.21). Sehr schnell sinkt die Fehlerrate für *ma ko o* dann fast auf 0, während sie sich für *ma uta o* auf höherem Niveau stabilisiert.

Diskussion Die Ergebnisse dieses Experimentes bestätigen die bisher gewonnenen Erfahrungen. Als günstiger Ankerpunkt der Merkmalsberechnung bildet sich der Berg heraus, der ein unveränderliches, visuell wahrnehmbares Merkmal darstellt. Auf der Grundlage sprachlicher Eingaben, die ein absolutes Referenzsystem realisieren und somit eine konzeptuelle Strukturierung der Welt vorgeben, wird eine sprachspezifische Modifizierung des perzeptuellen Systems eingeleitet. Diese Modifizierung beinhaltet die Herausbildung eines externen Ankerpunkts für die Berechnung und die Differenzierung geeigneter Merkmalsdetektoren zur Lösung der durch die sprachlichen Eingaben vorgegebenen Klassifizierungsaufgabe.

Die quantitativen Ergebnisse zeigen ebenfalls keine neuen Erkenntnisse. Insgesamt deuten die signifikanten Unterschiede in der Fehlerrate für die beiden Relationen darauf hin, dass die Relation *ma ko o* einfacher zu erlernen bzw. eindeutiger zu klassifizieren ist.

7.2 Experiment 4: *ma tai o, ma uta o, ma ko o*

In den folgenden drei Experimenten wurden die Agenten während der Exploration ihrer Umwelt mit den drei sprachlichen Relationen *ma tai o*, *ma uta o* und *ma ko o* konfrontiert. Wie schon in den Experimenten 2A – 2C gibt es auch hier drei unterschiedliche Ausprägungen der Lernaufgabe. Im ersten Experiment 4A explorierten fünf Agenten ihre Umwelt und erhielten dazu individuelle sprachliche Eingaben. Für das zweite Experiment 4B wurden die visuellen und sprachlichen Eingaben eines Agenten abgespeichert. Diese Explorationsgeschichte wurde dann vier weiteren Agenten oktroyiert, die somit die gleichen Erfahrungen machten, wie der Ursprungsagent. Im letzten Experiment 4C lernten fünf Agenten zunächst die *ma tai o/ma uta o*-Dichotomie, bevor sie zusätzlich mit der Relation *ma ko o* konfrontiert wurden.

7.2.1 A: unterschiedliche Eingaben

Es wurden fünf Agenten erzeugt, die während der Exploration ihrer Umwelt insgesamt jeweils 3200 sprachliche Eingaben erhielten. Von diesen realisierte jeweils etwa ein Drittel eine der beteiligten Relationen *ma tai o*, *ma uta o* oder *ma ko o*. Die genauen Zahlen schwankten zwischen 1071 (33.47%) und 1088 (34%) für *ma tai o*, zwischen 1038 (32.44%) und 1075 (33.59%) für *ma uta o* und zwischen 1044 (32.63%) und 1080 (33.75%) für *ma ko o*.

Ergebnisse (qualitativ) Dieses Experiment bestätigt zunächst die bisherigen Befunde. Als Ankerpunkt der Merkmalsberechnung bildet sich der Berg (*obj0*) heraus. Die Konzepte konnten erfolgreich etabliert werden, wobei die perzeptuellen Systeme agentenspezifisch modifiziert wurden. Insbesondere die Detektoren des Merkmals 2S wurden hierbei von allen Agenten sehr weitgehend differenziert (Abbildung 7.22).

Im Unterschied zu den bisherigen Experimenten steigt der Kategorisierungserfolg langsamer an. Ein genauerer Blick auf die einzelnen Konzepte zeigt für MA KO O ein schnelleres Erreichen einer stabilen Phase auf hohem Niveau im Vergleich zu den Konzepten MA TAI O und MA UTA O. Der langsame Anstieg des Kategorisierungserfolgs lässt sich daher auf diese beiden Konzepte zurückführen. Die Abbildungen 7.23 und 7.24 zeigen dies exemplarisch für Agent 2. Konzeptkonstituierend sind Merkmalsdetektoren für die Merkmale H, 2S und ABS, wobei insbesondere ABS und 2S große Bedeutung zukommt. Auffallend ist die Konstituierung des Konzeptes MA KO O über Detektoren des Merkmals H, die einen Wertebereich von 0.75 – 1 abdecken. Dies impliziert eine Gerichtetheit der Relation, die nicht von dieser lizenziert wird. Das Merkmal H sollte für die Etablierung von MA KO O nur insofern eine Rolle spielen, als schon das Vorhandensein des Merkmals auf dieses Konzept hinweist. Eine genauere Ausprägung war daher nicht zu erwarten.

Ein Vergleich mit Agent 3 zeigt, dass die Detektoren des Merkmals H dort keine Rolle für MA KO O spielen (Abbildung 7.25). Das Konzept wird ebenso wie MA TAI O und MA UTA O hauptsächlich über Detektoren des Merkmals 2S etabliert. Dabei ist für MA KO O ein Wertebereich relevant, der um 0.5 liegt. Für die beiden anderen Konzepte kann der relevante Wertebereich nicht so genau eingegrenzt werden. Zu erwarten ist hier ein Fokus auf den Bereich von 0 – 0.5 für MA UTA O und auf 0.5 – 1 für MA TAI O. Dieser Fokus kann allerdings nur für den Randbereich bei 0 bzw. 1 festgestellt werden.

Ergebnisse (quantitativ) Es wurden insgesamt acht Kovarianzanalysen gerechnet, deren Ergebnisse in den Tabellen 7.7 und 7.8 zusammengefasst sind. Die in Bezug auf die Agenten gerechneten Analysen zeigen signifikante Unterschiede insbesondere zwischen den Relationen. Dies gilt sowohl für den Kategorisierungserfolg als auch für die Fehlerrate und zwar bei Betrachtung des gesamten Ver-

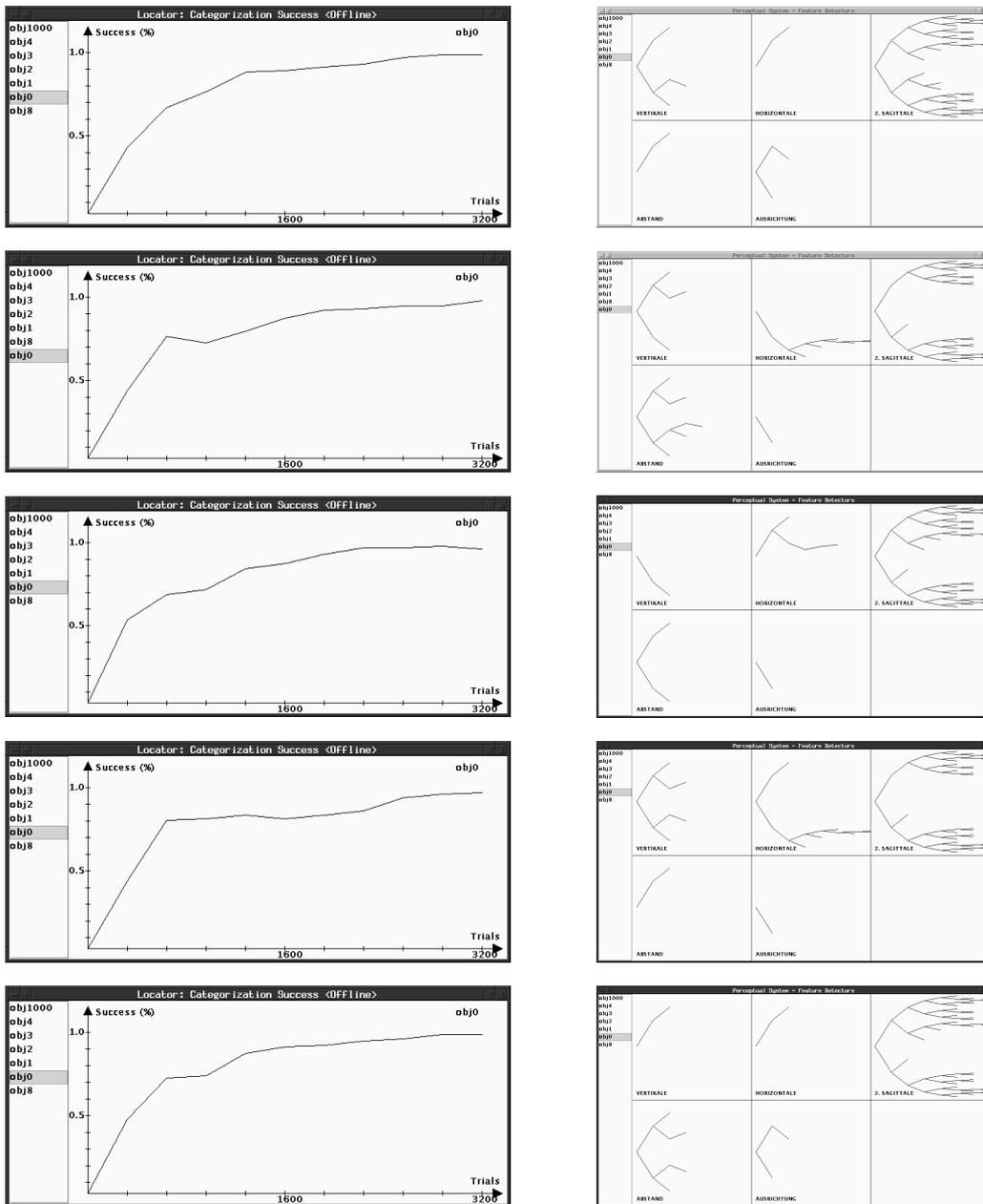


Abbildung 7.22: Experiment 4A: *ma tai o, ma uta o, ma ko o*. Kategorisierungserfolg (links) und perzeptuelles System (rechts) der Agenten 1–5.

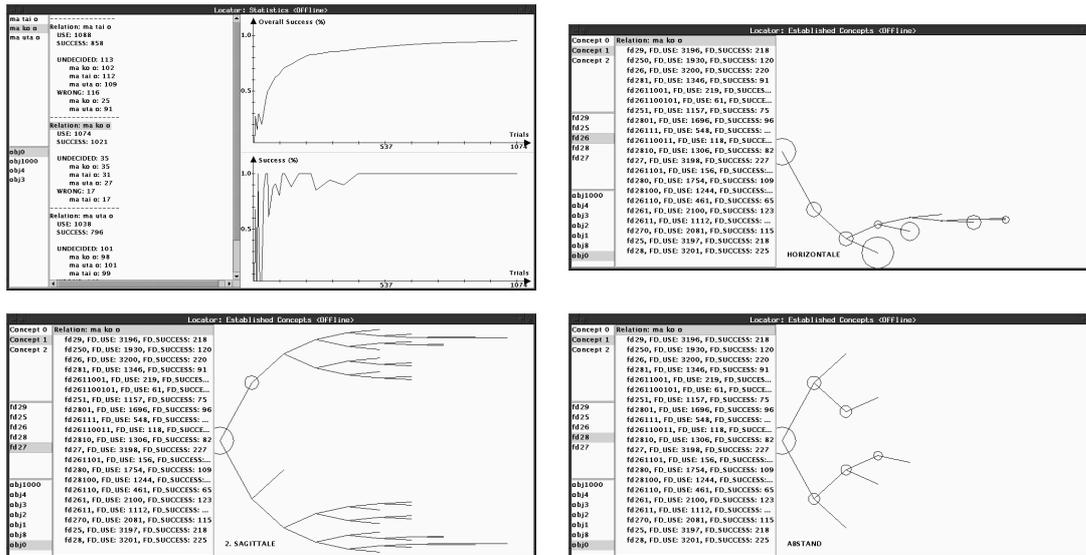


Abbildung 7.24: Experiment 4A: *ma tai o*, *ma uta o*, *ma ko o*. Konzepterfolg (links oben) und verwendete Merkmale von Agent 2 für das Konzept MA KO O.

liegt (Abbildung 7.28): im Mittel 1.8% (*ma ko o*) vs 10.8% (*ma tai o* und 12% *ma uta o*) für den Gesamtzeitraum bzw. 0% (*ma ko o*) vs 3.1% (*ma tai o*) und 2.9% (*ma uta o*) für die stabile Phase.

Die Fehlerrate betreffend lässt sich auch ein signifikanter Unterschied zwischen den Agenten in der stabilen Phase feststellen ($F_F(4, 59) = 3.04, p < 0.05$). Abbildung 7.29 zeigt, dass insbesondere Agent 4 während der stabilen Phase im positiven Sinne vom Mittelwert abweichen: 3.88% (Agent 4) vs 2.06% (Mittelwert).

Die in Bezug auf die Anzahl der Versuche gerechneten Kovarianzanalysen (Tabelle 7.8) zeigen fast durchgängig signifikante Effekte. Zunächst treten die bekannten Effekte zwischen den Versuchen auf, wenn der Gesamtzeitraum berücksichtigt wird ($F_E(9, 119) = 89.89, p < 0.01$ und $F_F(9, 119) = 41.37, p < 0.01$). Im Gegensatz zu den bisherigen Experimenten bleibt diese Effekte hier auch in der stabilen Phase vollständig erhalten: $F_E(4, 59) = 8.23, p < 0.01$ und $F_F(4, 59) = 4.54, p < 0.01$. Abbildung 7.30 zeigt, dass auch in der stabilen Phase eine Steigerung des Kategorisierungserfolgs zu beobachten ist. Im Mittel liegt die Performanz nach 1920 Versuchen bei 90.7%, nach 3200 bei 98.3%.

Weitere signifikante Effekte finden sich zwischen den Relationen, sowohl über den Gesamtzeitraum ($F_E(2, 119) = 96.03, p < 0.01$ und $F_F(2, 119) = 63.43, p < 0.01$) als auch in der stabilen Phase ($F_E(2, 59) = 18.43, p < 0.01$ und $F_F(2, 59) = 11.49, p < 0.01$). In der Anfangsphase des Experimentes steigt der Kategorisierungserfolg für die Relation *ma ko o* sehr schnell (640) auf ein hohes Niveau (über

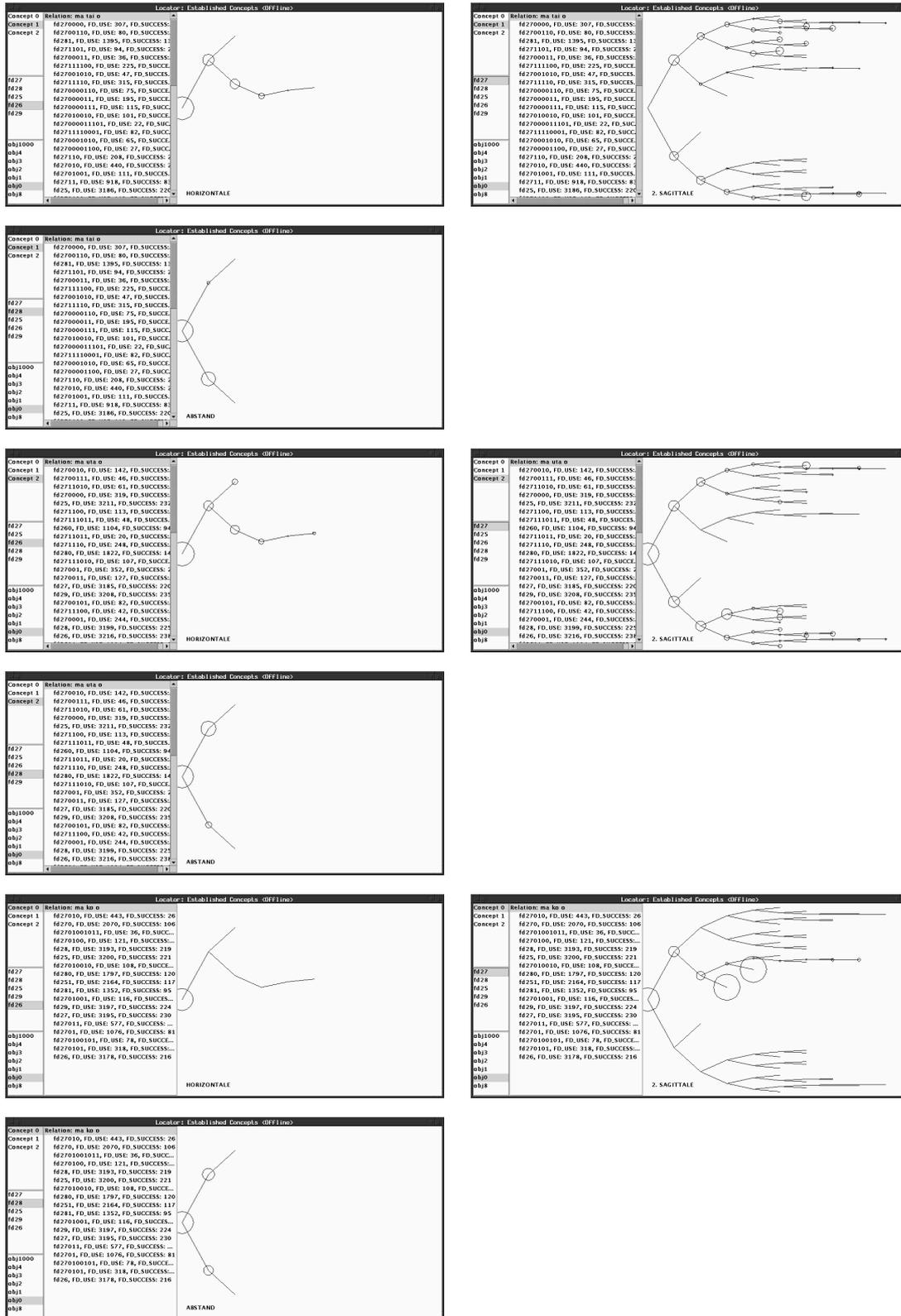


Abbildung 7.25: Experiment 4A: *ma tai o, ma uta o, ma ko o*. Verwendete Merkmalsdetektoren der Merkmale H und 2S von Agent 3 für die Konzepte MA TAI O (oben), MA UTA O (Mitte) und MA KO O (unten).

	gesamt			stabil		
	df	F_E	F_F	df	F_E	F_F
Agenten	4,134	0.10	0.16	4,59	2.58	3.04*
Relationen	2,134	12.61**	14.73**	2,59	13.31**	11.34**
A x R	8,134	0.07	0.25	8,59	1.24	2.21*

$p < 0.05^*$, $p < 0.01^{**}$

Tabelle 7.7: Experiment 4A: *ma tai o, ma uta o, ma ko o*. Kovarianzanalysen bezogen auf die Agenten.



Abbildung 7.26: Kategorisierungserfolg der Agenten und des Gesamtsystems.

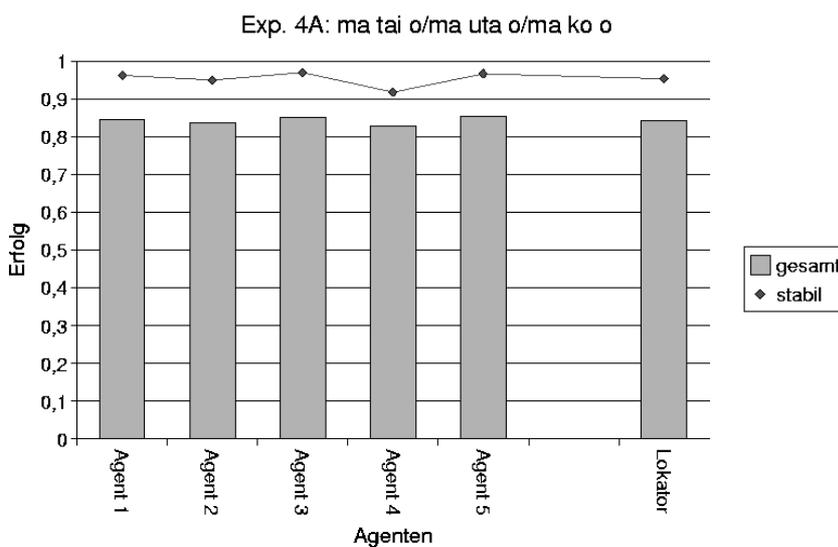


Abbildung 7.27: Mittlerer Kategorisierungserfolg der Agenten und des Gesamtsystems.

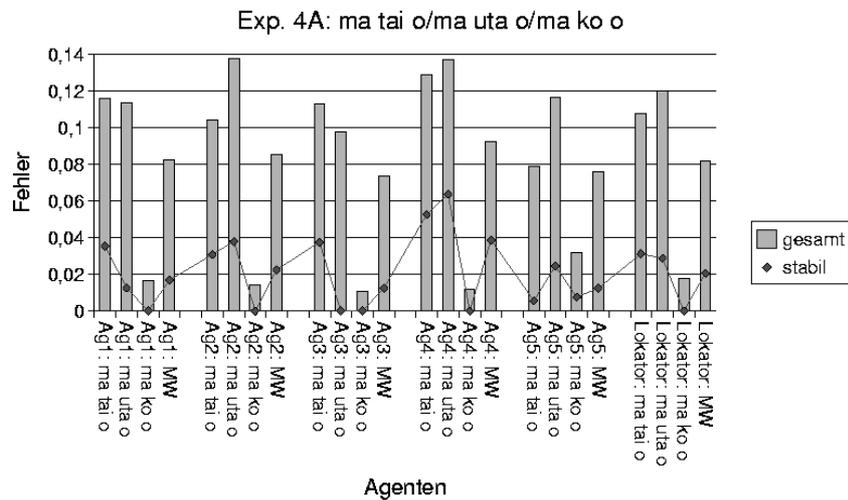


Abbildung 7.28: Kategorisierungsfehler der Agenten und des Gesamtsystems.

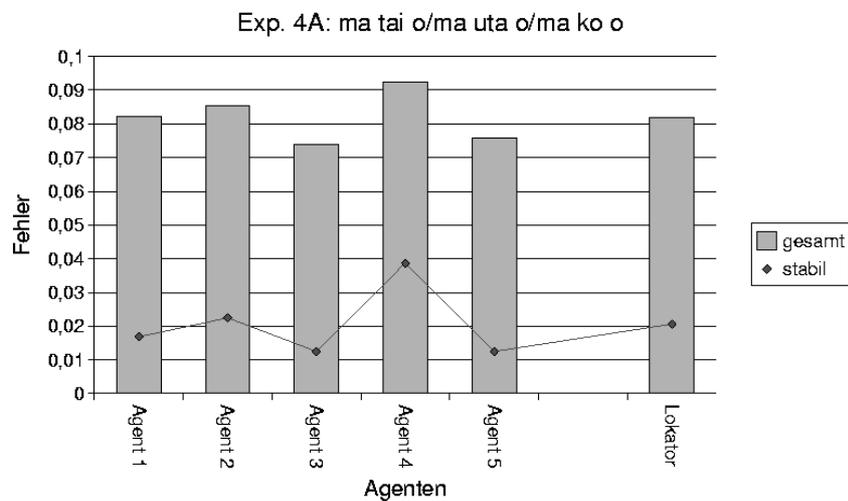


Abbildung 7.29: Mittlerer Kategorisierungsfehler der Agenten und des Gesamtsystems.

	gesamt			stabil		
	df	F_E	F_F	df	F_E	F_F
Versuche	9,119	89.89**	41.37**	4,59	8.23**	4.54**
Relationen	2,119	96.03**	63.43**	2,59	18.43**	11.49**
V x R	18,119	5.40**	5.31**	8,59	2.22*	1.60

$p < 0.05^*$, $p < 0.01^{**}$

Tabelle 7.8: Experiment 4A: *ma tai o*, *ma uta o*, *ma ko o*. Kovarianzanalysen bezogen auf die Anzahl der Versuche.

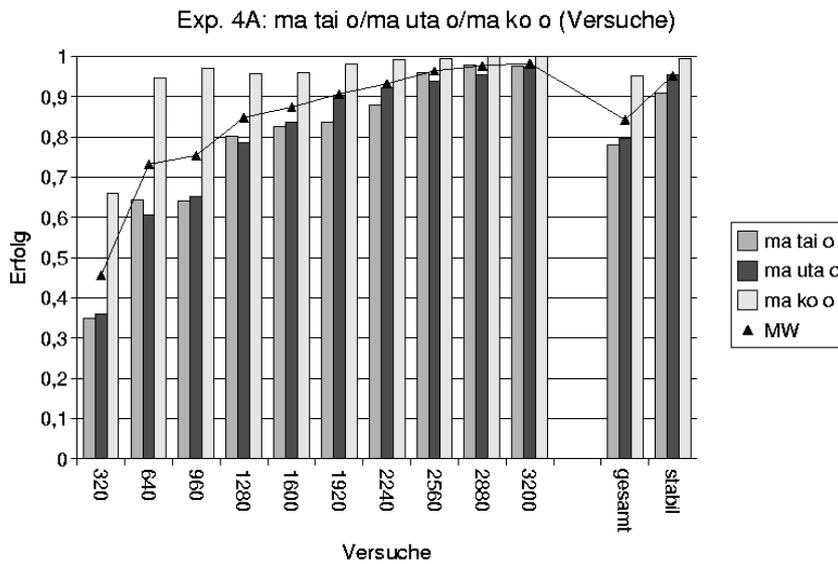


Abbildung 7.30: Kategorisierungserfolg während der Versuche.

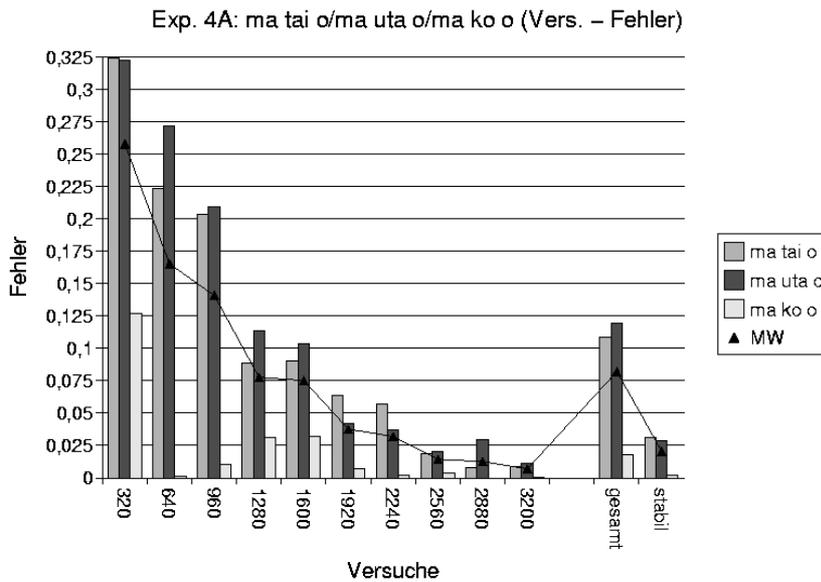


Abbildung 7.31: Kategorisierungsfehler während der Versuche.

90%) während der Erfolg für die beiden übrigen Relationen sehr viel langsamer ansteigt und nach 1280 Versuchen ungefähr bei 80% liegt wie in Abbildung 7.30 erkennbar ist. Die Abbildung zeigt ebenfalls, dass sich die Unterschiede in der Performanz für die Relationen in der stabilen Phase einander annähern und gegen Ende fast ausgleichen. Der Kategorisierungserfolg liegt für die Relation *ma tai o* nach 1920 Versuchen bei 83.6%, für *ma uta o* bei 90.4% und für *ma ko o* bei 98.1%. Nach 3200 Versuchen zeigt sich folgendes Bild: 97.5% für *ma tai o*, 97.2% für *ma uta o* und 99.9% für *ma ko o*. Analog entwickelt sich die Fehlerrate (Abbildung 7.31).

Ebenfalls feststellbar sind signifikante Interaktionen zwischen der Anzahl der Versuche und den beteiligten Relationen. Diese Interaktionen ergeben sich über den Gesamtzeitraum sowohl für den Kategorisierungserfolg ($F_E(18, 119) = 5.4, p < 0.01$) als auch für die Fehlerrate ($F_F(18, 119) = 5.31, p < 0.01$). In der stabilen Phase geht dieser Effekt zurück, ist aber für den Kategorisierungserfolg weiterhin erkennbar: $F_E(8, 59) = 2.22, p < 0.05$. Dieser Effekt kann auf die oben schon erwähnten Unterschiede zwischen den gerichteten Relationen *ma tai o* und *ma uta o* und der ungerichteten Relation *ma ko o* zurückgeführt werden. Während für die ungerichtete Relation sehr schnell ein hohes Performanzniveau erreicht wird, nimmt die Steigerung des Kategorisierungserfolgs für die gerichteten Relationen mehr Zeit in Anspruch. Der Unterschied zwischen den beiden Arten von Relationen ist also abhängig vom Messpunkt.

Diskussion Deutlichstes Ergebnis dieses Experimentes ist die unterschiedliche Schnelligkeit, mit der sich die einzelnen Konzepte stabilisieren. MA KO O hat hier einen sichtbaren Vorteil gegenüber den beiden anderen Konzepten MA TAI O und MA UTA O, der sich auch in der quantitativen Auswertung als signifikant erweist. Als Grund dieses Vorteils kommt ein schon aus den vorherigen Experimenten bekanntes Phänomen in Betracht: die geringe Tiefenauflösung des visuellen Sensors.

Vom Berg aus gesehen liegen Objekte, die *ma ko o* zueinander stehen auf der gleichen Entfernungsebene. Anders sieht es bei den beiden Relationen *ma tai o* und *ma uta o* aus. Wenn sich Objekt A *ma tai o* Objekt B befindet, d.h. seewärts von B, dann ist es weiter vom Berg entfernt als B. Umgekehrt, wenn Objekt A sich *ma uta o* Objekt B befindet, d.h. landeinwärts von B, ist es entsprechend näher am Berg gelegen als B. Entscheidend für die Konzeptbildung und damit für die korrekte Klassifikation ist die Wahrnehmung dieser Entfernungsdifferenz. Die Rolle des visuellen Sensors dabei ist in Abbildung 7.32 dargestellt. Befindet sich der Berg rechts oder links des Agenten (Abbildung 7.32 a.), so ist die Wahrnehmung dieser Entfernung durch die Auflösung des Sensors in x-Richtung auf den Agenten bezogen bestimmt und stellt kein Problem dar. Bei einer Frontalstellung zwischen Agent und Berg (Abbildung 7.32 b.)) ist die Tiefenauflösung des visuellen Sensors der bestimmende Faktor. Da hier in den einzelnen Bereichen

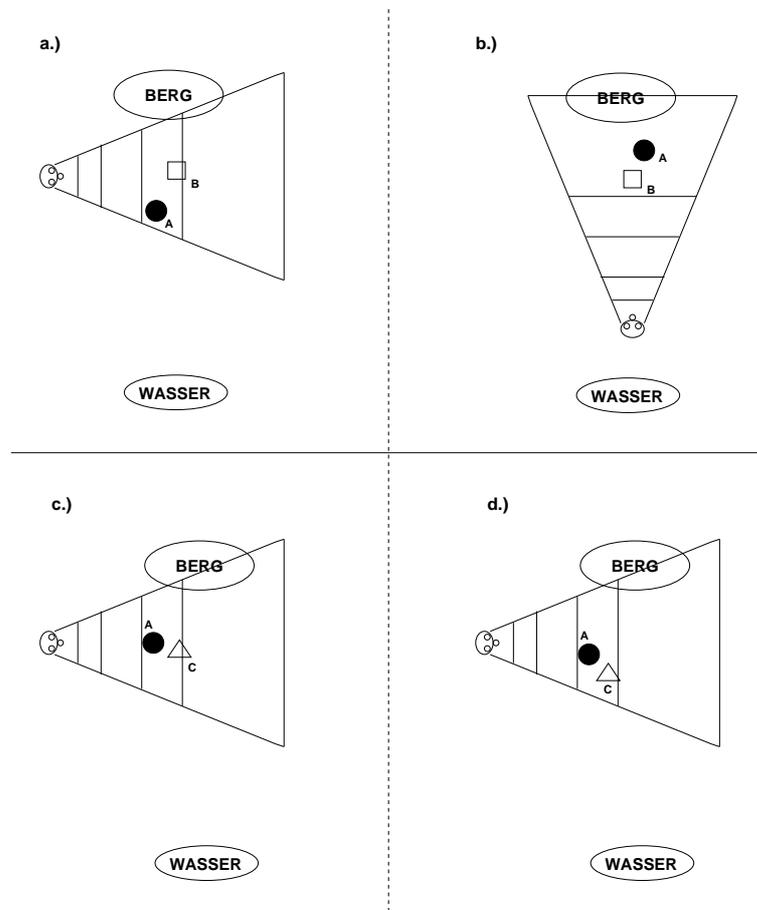


Abbildung 7.32: Konzeptspezifische Auswirkungen der geringen Tiefenauflösung des visuellen Sensors.

(foveal, parafoveal) nur jeweils fünf Entfernungsstufen zur Verfügung stehen, ist nicht auszuschließen, dass Objekte fälschlicherweise als in der gleichen Entfernung liegend wahrgenommen werden.

Stehen zwei Objekte in einer *ma ko o* Relation zueinander, kann dieses Problem theoretisch auch auftauchen, wenn diese nahe beieinander liegen. Die Abbildung 7.32 c.) und d.) veranschaulichen eine solche Relation zwischen den Objekten C und A. Zwei Möglichkeiten sind bei dieser Konstellation denkbar. i.) A verdeckt C (Abbildung 7.32 c.): Dies bedeutet, C kann vom Agenten nicht wahrgenommen werden und daher auch nicht Teil der sprachlichen Äußerung sein. Die Relation *ma ko o* kommt also nicht für die Beschreibung der sprachlichen Szene in Betracht. ii.) A verdeckt C nicht (Abbildung 7.32 d.): In diesem Fall befindet sich C nur bedingt in einer *ma ko o* Relation zu A. Je nach Größe der Abweichung von der Querachse und je nach Entfernung des Agenten von den Objekten, muss eine solche Konstellation eher als *ma tai o* oder *ma uta o* beschrieben wer-

	<i>ma tai o</i>			<i>ma uta o</i>		
	gesamt	ambig	Anteil (%)	gesamt	ambig	Anteil (%)
Agent 1	1077	50	4.64%	1043	69	6.62%
Agent 2	1088	75	6.89%	1038	76	7.32%
Agent 3	1074	76	7.08%	1065	71	6.67%
Agent 4	1081	79	7.31%	1075	74	6.88%
Agent 5	1071	72	6.72%	1071	71	6.63%
Mittelwert	1078.2	70.4	6.53%	1058.4	72.2	6.82%

Tabelle 7.9: Experiment 4A: Analyse der visuellen Eingaben. Dargestellt ist die Gesamtzahl der Szenen mit der jeweiligen Relation (*gesamt*), die Anzahl der Szenen, in denen die benannten Objekte auf der gleichen Entfernungsebene lagen (*ambig*), und der prozentuale Anteil dieser Szenen.

den. Für die Konstellation d.) aus Abbildung 7.32 bedeutet das Folgendes. Ist die Entfernung zwischen A und C auf der ungerichteten Querachse gering, wie hier abgebildet, würde in einem solchen Fall eher die Relation *A ma uta o C* gebraucht. Das ist unproblematisch, da dann die Distanz auf der gerichteten Achse relevant wird und diese ist bei der dargestellten Orientierung des Sprechers von der Auflösung in x-Richtung bezogen auf den Agenten abhängig, entspricht also der Konstellation in Abbildung 7.32 a.). Ist die Entfernung zwischen A und C auf der ungerichteten Achse dagegen groß, würde auch bei der hier dargestellten Distanz auf der gerichteten Achse eher die Relation *ma ko o* gebraucht. Auch dieser Fall ist unproblematisch, da bei einer größeren Entfernung die Wahrscheinlichkeit steigt, dass die beiden Objekte auf verschiedenen Entfernungsstufen liegen, was wiederum eine korrekte Merkmalsberechnung für das Konzept MA KO O ermöglicht. Auf Grund dieser stärkeren Verwendungsrestriktionen ist der Erwerb von MA KO O einfacher, da die Beschränkung durch die geringe Tiefenauflösung des visuellen Sensors nicht zum Tragen kommt.

Tabelle 7.9 gibt eine genaue Analyse der visuellen Eingaben für die fünf Agenten. Dargestellt sind die Gesamtzahl der Szenen, in denen eine der Relationen *ma tai o* oder *ma uta o* benutzt wurde, sowie die Anzahl der Szenen, in denen sich die geringe Tiefenauflösung als Problem erwies. Insgesamt war das in 6.53% der Fälle für *ma tai o* und in 6.82% der Fälle für *ma uta o* von Bedeutung.

Für die Konzepte MA TAI O und MA UTA O zeigt sich das Problem der geringen Tiefenauflösung insbesondere bei den konzeptkonstituierenden Detektoren des Merkmals 2S. Für die Relation *ma uta o* sollten die Berechnungen dieses Merkmals Winkel zwischen 0 und 90 Grad ergeben. Das entspricht Werten zwischen 0 und 0.5 (Winkelgröße normiert mit π). Für *ma tai o* sind Winkel zwischen 90 und 180 Grad zu erwarten, was nach der Normierung Werten zwischen 0.5 und 1 entspricht. An den Grenzen bei 0 und 1 ist diese Aufteilung des Wertebereichs tatsächlich zu finden. Zwischen diesen beiden Polen liegen aber viele Merkmalsdetektoren, die für beide Konzepte verwendet werden.

Ein weiterer Effekt fällt in diesem Experiment auf. Zwei Agenten haben Merkmalsdetektoren für eine Hälfte des Wertebereichs von Merkmal H gebildet. Auffallend ist diese Art der Modifizierung des perzeptuellen Systems deshalb, weil diese Merkmalsdetektoren zu einem großen Teil konzeptkonstituierend für MA KO O sind. Dies impliziert eine Gerichtetheit der zugehörigen Relation, die nicht durch diese lizenziert ist. Ein Blick in die Spracheingaben, welche die Agenten während ihrer Exploration erhielten, zeigte, dass diese tatsächlich den Schluss auf eine gerichtete Relation zuließen. Die Relation wurde hier verwendet wie ein absolutes, d.h. auf den Berg bezogenes, *links*.

An dieser Stelle zeigt sich noch einmal deutlich der Vorteil eines agentenorientierten Ansatzes. Konzepte werden von einem Agenten in der Interaktion mit seiner Umwelt gebildet. Die Wahrnehmungen eines Agenten sind abhängig von der Situation, in der er sich befindet und von den sensorischen Fähigkeiten, über die er verfügt. Deshalb gehört zu einer Agentendefinition nach Franklin und Graesser (1996) auch immer die Angabe dieser sensorischen Fähigkeiten. Das vorliegende Experiment unterstreicht die Abhängigkeit der Konzeptbildung von diesen Faktoren. Die Wahrnehmung der Situation basiert auf den visuellen und sprachlichen Eingaben. Die Qualität der visuellen Eingaben hängt direkt vom visuellen Sensor ab. Die geringe Tiefenauflösung hat Auswirkungen darauf, wie schnell die einzelnen Konzepte sich etablieren. Die sprachlichen Eingaben hängen von den Sprechern der Sprachgemeinschaft ab. Deren implizite, konzeptuelle Vorgaben manifestieren sich in den sprachlichen Eingaben. Im Falle zweier Agenten legen diese Vorgaben eine Gerichtetheit der Relation *ma ko o* nahe. Das führte zur zusätzlichen Herausbildung von Merkmalsdetektoren, um diese Eigenschaft der Relation abzudecken. Notwendig für die korrekte Kategorisierung sind diese zusätzlichen Merkmalsdetektoren nicht. Sie bilden sich heraus auf Grund der zusätzlichen Information, die aus den sprachlichen Daten extrahiert werden kann. Um zu unterstreichen, dass es sich hierbei um eine zusätzliche Information handelt wurden für das Experiment 4B ähnliche sprachliche Eingaben verwendet.

7.2.2 B: identische Eingaben

Für dieses Experiment wurde wie in Experiment 2B die Explorationsgeschichte eines Agenten abgespeichert und vier weiteren Agenten oktroyiert. Damit erhielten fünf Agenten identische visuelle und sprachliche Eingaben. Insgesamt wurden die Agenten mit 3200 sprachlichen Eingaben konfrontiert, welche die drei Relationen *ma tai o*, *ma uta o* und *ma ko o* realisierten. Davon entfielen 1077 Eingaben (33.66%) auf *ma tai o*, 1043 (32.59%) auf *ma uta o* und 1080 (33.75%) auf *ma ko o*.

Ergebnisse (qualitativ) Kategorisierungserfolg und Modifizierung der perzeptuellen Systeme der Agenten A–E sind mit den Ergebnissen aus Experiment 4A vergleichbar (Abbildung 7.33). Um genauere Aussagen darüber zuzulassen, ob

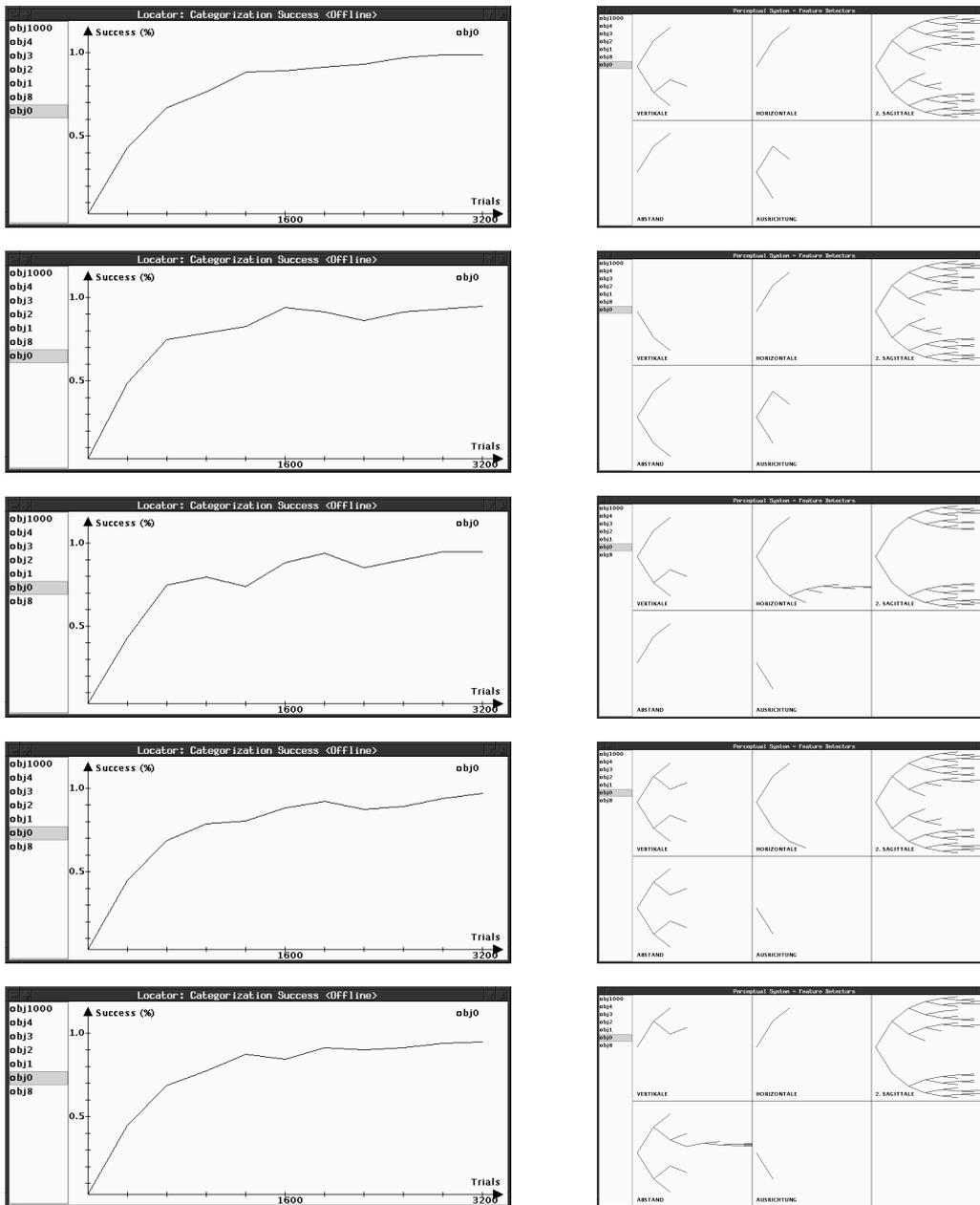


Abbildung 7.33: Experiment 4B: *ma tai o, ma uta o, ma ko o*. Kategorisierungserfolg (links) und perzeptuelles System (rechts) der Agenten A–E.

das in Experiment 4A beobachtete Aufgreifen der in den sprachlichen Eingaben kodierte Gerichtetheit der Relation *ma ko o* bei zwei der Agenten eine notwendige Bedingung für die Etablierung des Konzeptes MA KO O darstellt oder lediglich als zusätzliche Information aufgegriffen und bei der Konzeptbildung verwendet wird, wurden die hier erzeugten fünf Agenten wiederum mit sprachlichen Eingaben konfrontiert, die eine Gerichtetheit der entsprechenden Relation implizieren. Der Vergleichbarkeit mit dem vorherigen Experiment willen realisierte der größte Anteil der sprachlichen Eingaben eine *ma ko o* Relation, die mit einer auf den Berg bezogenen, absoluten Relation *links* übereinstimmt.

Dies entspricht nicht dem eigentlichen Gebrauch der Relation, da diese ungerichtet ist. Trotzdem ist es niemals auszuschließen, dass diese Relation bei Betrachtung eines begrenzten Zeitraums tatsächlich zufällig gerichtet verwendet wird. Werden später dann *ma ko o* Relationen erfahren, von denen nicht mehr länger auf die Gerichtetheit der Relation geschlossen werden kann, sollten nach anfänglicher Berücksichtigung der Gerichtetheit, die hierfür notwendigen Merkmalsdetektoren wieder an Bedeutung für das Konzept verlieren.

Ein prinzipielles Problem, die Bildung von Konzepten betreffend, welche absoluten Systemen zugrundeliegen können, stellt die gerichtete Verwendung der Relation *ma ko o* nicht dar, da auch absolute Systeme ohne ungerichtete Achsen existieren.

Als Ergebnis dieses Experimentes bleibt festzuhalten, dass alle Agenten erfolgreich funktionierende, d.h. für die Kategorisierung geeignete, Konzepte gebildet haben. Einer dieser Agenten modifizierte sein perzeptuelles System in einer Weise, dass die implizit in den Spracheingaben vorhandene Gerichtetheit der Relation *ma ko o* sich im Konzept MA KO O durch Berücksichtigung von Detektoren des Merkmals H niederschlägt (Agent C).

Ergebnisse (quantitativ) Die quantitative Auswertung beschränkt sich bei diesem Experiment auf die fünf Agenten. Die Anzahl der Versuche wurde nicht berücksichtigt. Signifikante Unterschiede ergeben sich zwischen den Relationen für Kategorisierungserfolg und Fehlerrate, sowohl bei Betrachtung des Gesamtzeitraums ($F_E(2, 134) = 14.96, p < 0.01$ und $F_F(2, 134) = 21.29, p < 0.01$) als auch bei Einschränkung der Analyse auf die stabile Phase ($F_E(2, 59) = 21.58, p < 0.01$ und $F_F(2, 59) = 11.47, p < 0.01$, Tabelle 7.10). Verantwortlich für diese signifikanten Unterschiede ist bei Betrachtung des Gesamtzeitraums die Relation *ma ko o*, die deutlich schneller gelernt wird: im Mittel 93% vs 76% für *ma tai o* und 80% für *ma uta o*. In der stabilen Phase verursacht die Relation *ma tai o* den dort feststellbaren Unterschied, da sie im Mittel deutlich schlechter erlernt wird: 86% vs 97% für *ma uta o* und 96% für *ma ko o* (Abbildung 7.34).

Die Fehlerrate betreffend ist die Relation *ma ko o* Verursacherin der signifikanten Unterschiede in beiden Phasen, da hier deutlich weniger Fehler gemacht werden. Im Mittel sind dies bei Betrachtung des Gesamtzeitraums 1.8% für *ma*

	gesamt			stabil		
	df	F_E	F_F	df	F_E	F_F
Agenten	4,134	0.09	0.36	4,59	1.97	2.23
Relationen	2,134	14.96**	21.29**	2,59	21.58**	11.47**
A x R	8,134	0.21	0.57	8,59	1.21	0.95

$p < 0.05^*$, $p < 0.01^{**}$

Tabelle 7.10: Experiment 4B: *ma tai o, ma uta o, ma ko o*. Kovarianzanalysen bezogen auf die Agenten.

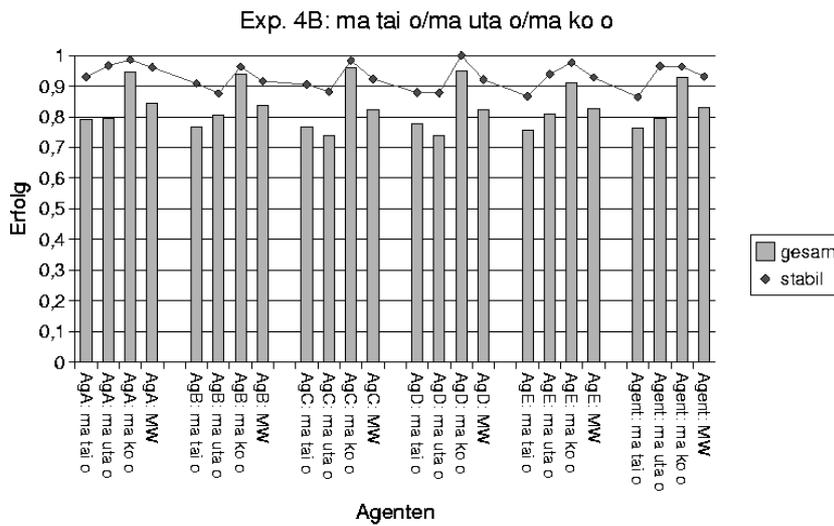


Abbildung 7.34: Kategorisierungserfolg der Agenten und des Gesamtsystems.

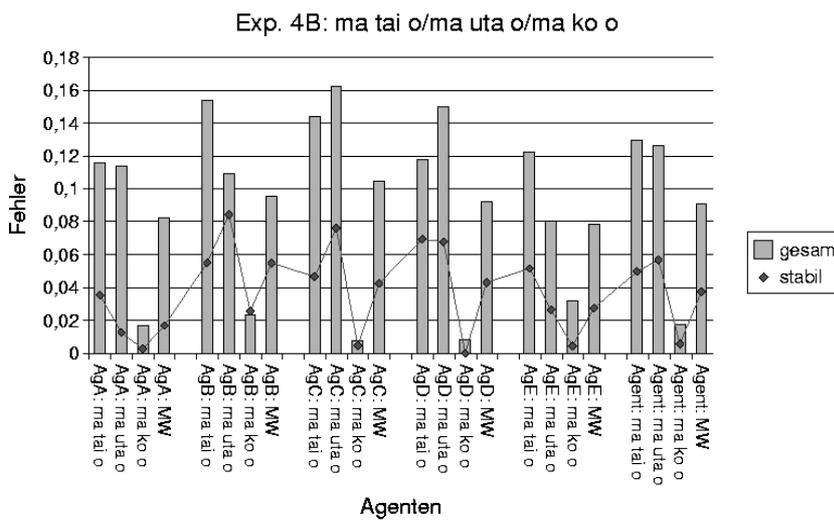


Abbildung 7.35: Kategorisierungsfehler der Agenten und des Gesamtsystems.

ko o im Vergleich zu 13% für *ma tai o* und 12.6% für *ma uta o*. In der stabilen Phase liegen die Werte bei 0.6% für *ma ko o* im Vergleich zu 5% (*ma tai o*) und 5.7% (*ma uta o*).

Diskussion Die Verwendung von sprachlichen Eingaben, in denen die eigentlich ungerichtete Relation *ma ko o* gerichtet verwendet wird, bestätigt die Hypothese, dass diese zusätzliche Information nicht notwendigerweise für die Etablierung des Konzeptes MA KO O verwendet werden muss. Lediglich einer der fünf erzeugten Agenten berücksichtigt diese implizit zur Verfügung gestellte Information.

Im Wesentlichen werden hier die Befunde aus Experiment 2B bestätigt. Inhaltliche Variationen in den etablierten Konzepten sind möglich trotz identischer erfahrener Situationen, hier gegeben durch identische visuellen und sprachliche Eingaben. Dieselben Eingaben erlauben also das Fokussieren auf unterschiedliche Aspekte, die für den Prozess der Konzeptbildung herangezogen werden. Besonders deutlich zeigt sich dies bei der Vernachlässigung der implizit in den sprachlichen Eingaben enthaltenen Gerichtetheit der Relation *ma ko o*. Für die Kategorisierung der Eingaben dieses Experimentes sind die entsprechenden Merkmalsdetektoren gut geeignet. Aber eben nicht notwendigerweise und nicht allein, da nicht alle Verwendungen der Relation *ma ko o* eine Gerichtetheit implizieren.

Im Vergleich zu Experiment 4A verschwindet der geringfügige, signifikante Effekt zwischen den Agenten in der stabilen Phase vollständig, was sich auf die nicht vorhandene Variation in den Eingabedaten zurückführen lässt, die damit strengere Constraints vorgeben als in Experiment 4A. Ein ähnlicher Effekt findet sich ebenfalls in 2A.

7.2.3 C: *ma tai o*, *ma uta o*, später *ma ko o*

Für dieses Experiment wurden wiederum fünf Agenten erzeugt. Diese erhielten in einer ersten Versuchsphase während der Exploration ihrer Umwelt jeweils 1600 sprachliche Eingaben, von denen jeweils etwa die Hälfte eine der beiden Relationen *ma tai o* und *ma uta o* realisierte. In einer zweiten Versuchsphase wurden die Agenten mit weiteren 4800 sprachlichen Eingaben konfrontiert, in denen zusätzlich die Relation *ma ko o* verwendet wurde.

Die Ergebnisse der ersten Phase (nur *ma tai o* und *ma uta o*) unterscheiden sich nicht von denen aus Experiment 3A. Gleiches gilt für den stabilen Teil der zweiten Phase (ab 3200 Versuchen mit allen drei Relationen) im Vergleich mit Experiment 4A, in dem die Agenten ebenfalls mit drei Relationen in den Spracheingaben konfrontiert waren. Von Interesse ist daher hier ebenso wie in Experiment 2C, das die gleichen Bedingungen für die Verwendung eines relativen Referenzrahmens untersuchte, der Beginn der zweiten Versuchsphase (ab 1600 Versuchen) bis zur Stabilisierung der Kategorisierungsleistung (bei ca. 3200 Versuchen).

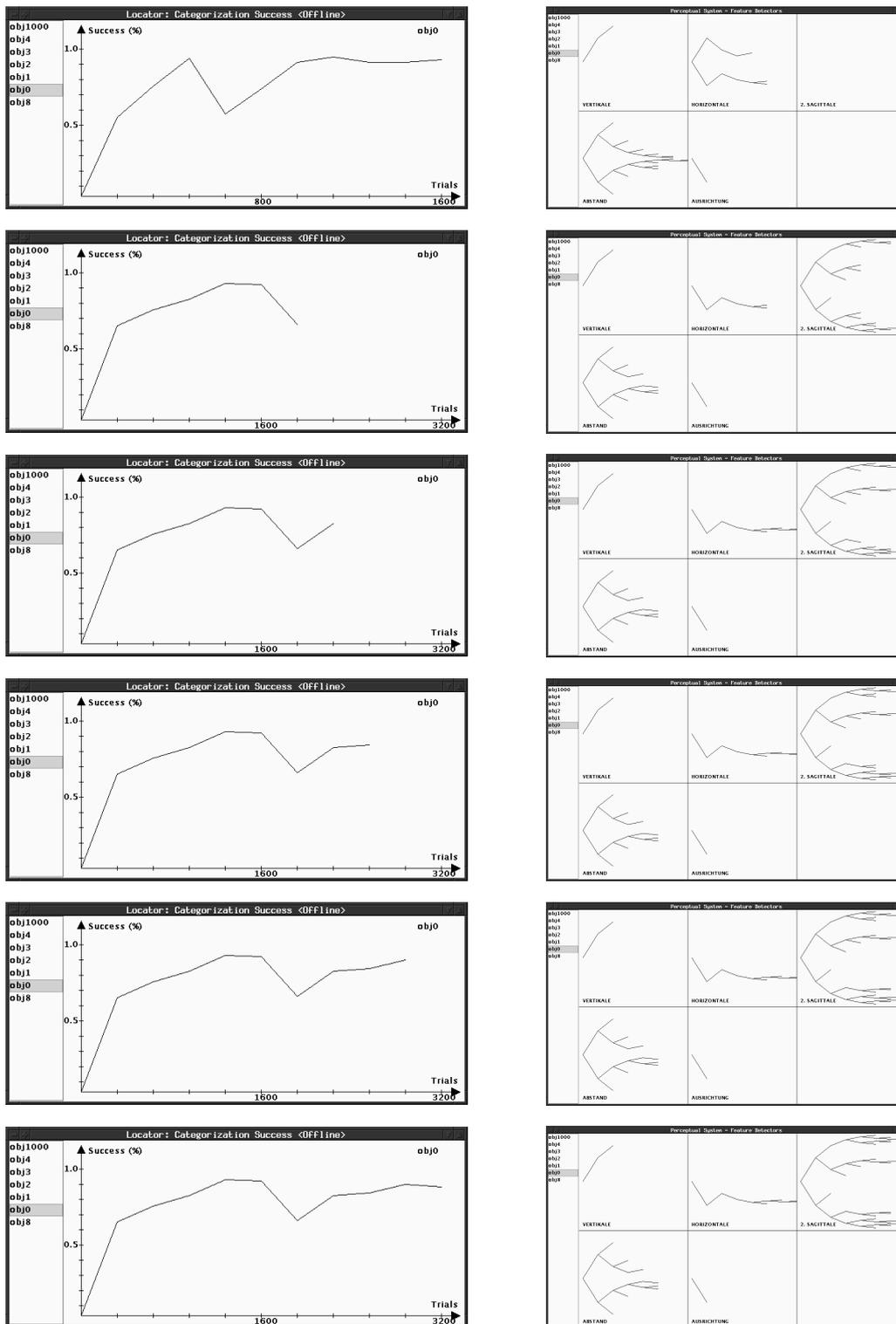


Abbildung 7.36: Experiment 4C: *ma tai o, ma uta o*, später *ma ko o*. Entwicklung des Kategorisierungserfolges (links) und des perzeptuellen Systems (rechts) eines Agenten während der Versuche 1600–3200.

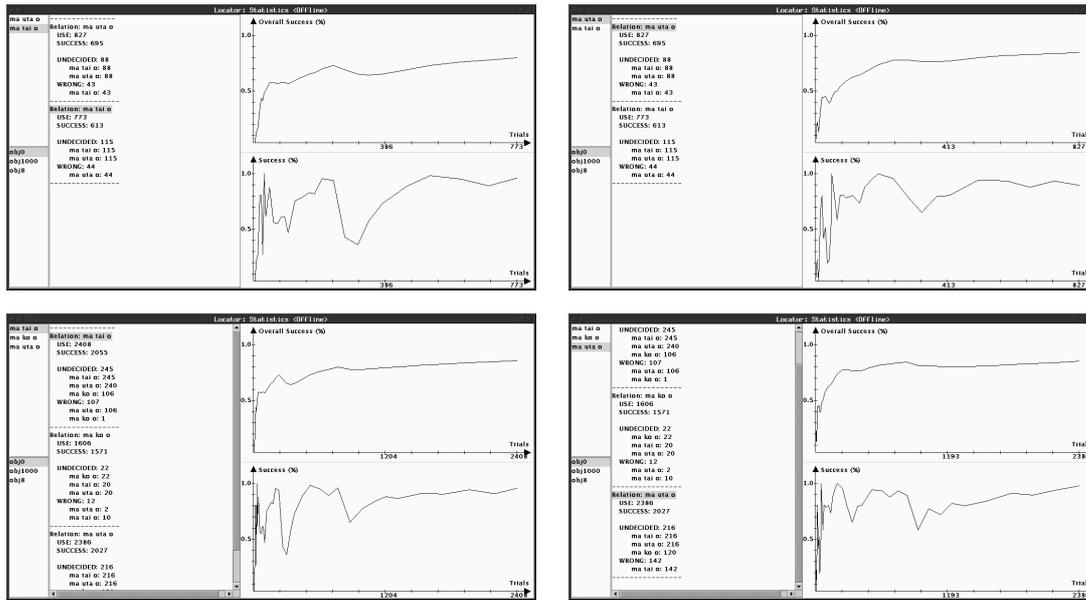


Abbildung 7.37: Experiment 4C: *ma tai o, ma uta o*, später *ma ko o*. Konzepterfolge eines Agenten für die Konzepte MA TAI O und MA UTA O nach 1600 (oben) und nach 6400 Versuchen (unten).

Die Entwicklung des Kategorisierungserfolgs und des perzeptuellen Systems während der kritischen Phase von 1600 bis 3200 Versuchen ist exemplarisch für einen Agenten in Abbildung 7.36 dargestellt. Nach einem kurzzeitigen Einbruch des Erfolgs bei Hinzunahme der Relation *ma ko o* auf ca. 65% folgt eine Phase in der sich die Kurve dem ursprünglichen Wert von ca. 90% wieder annähert. Das perzeptuelle System ändert sich insofern radikal, als der bis zu diesem Zeitpunkt nicht differenzierte Merkmalsdetektor des Merkmals 2S durch die veränderte Lernaufgabe sehr weitgehend differenziert wird. Aus Experiment 4A ist bekannt, dass Detektoren dieses Merkmals für die Konzeptbildung von MA KO O gut geeignet sind.

Ein genaueres Bild auf die Entwicklung des Kategorisierungserfolgs für die Konzepte MA TAI O und MA UTA O zeigt Abbildung 7.37. Im oberen Teil der Abbildung finden sich die Erfolgskurven nach 1600 Versuchen, im unteren Teil am Ende des Experimentes nach 6400 Versuchen. Für die erste Versuchsphase fällt zunächst auf, dass die instabile Phase für beide Konzepte die Hälfte der Zeit in Anspruch nimmt. Danach stabilisieren sich beide Konzepte auf hohem Niveau bei ca. 90%. Für die zweite Phase (ab 1600 Versuchen) zeigen sich in den lokalen Erfolgskurven, in denen der Kategorisierungserfolg relativ zum letzten Messpunkt abgetragen ist, deutlich der kurzzeitige Abfall der Kategorisierungsleistung nach Einführung der Relation *ma ko o* und der daran anschließende Anstieg auf das vorherige Niveau.

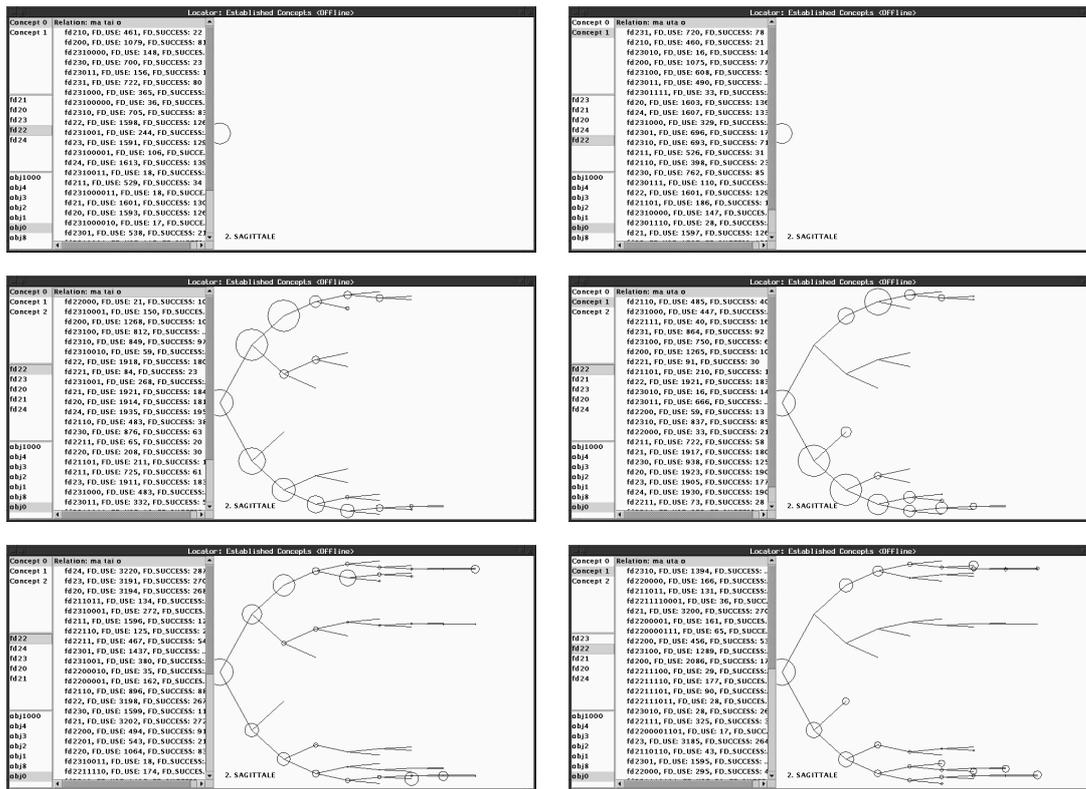


Abbildung 7.38: Experiment 4C: *ma tai o, ma uta o*, später *ma ko o*. Entwicklung der konzeptkonstituierenden Merkmalsdetektoren der Konzepte MA TAI O und MA UTA O für das Merkmal 2S (nach 1600, 2560 und 3200 Versuchen).

Bei näherer Untersuchung der konzeptkonstituierenden Merkmale bestätigt sich das entscheidende Ergebnis aus Experiment 2C auch für die Konzepte in einem absoluten Referenzrahmen. Die qualitative Veränderung erfahrener Situationen durch die Hinzunahme einer weiteren Relation in den sprachlichen Eingaben führt nicht nur zum Anlegen neuer Konzepte, um diesen Veränderungen gerecht zu werden. Vielmehr lässt sich auch eine qualitative Umstrukturierung der bereits gebildeten Konzepte beobachten. Die etablierten Analysemechanismen für die visuellen Eingaben, d.h. die differenzierten Merkmalsdetektoren, reichen offensichtlich nicht mehr aus, um die Funktionalität der Konzepte zu gewährleisten. Dies führt einerseits zu einer erneuten Modifizierung der perzeptuellen Systeme und andererseits zu der schon erwähnten inhaltlichen Neustrukturierung der vorhandenen Konzepte.

Die Modifizierung des perzeptuellen System betrifft vor allem das Merkmal ABS, dessen Ausdifferenzierung leicht zurückgenommen wird, und in besonders starkem Maße das Merkmal 2S, dessen Merkmalsdetektor vorher gar nicht dif-

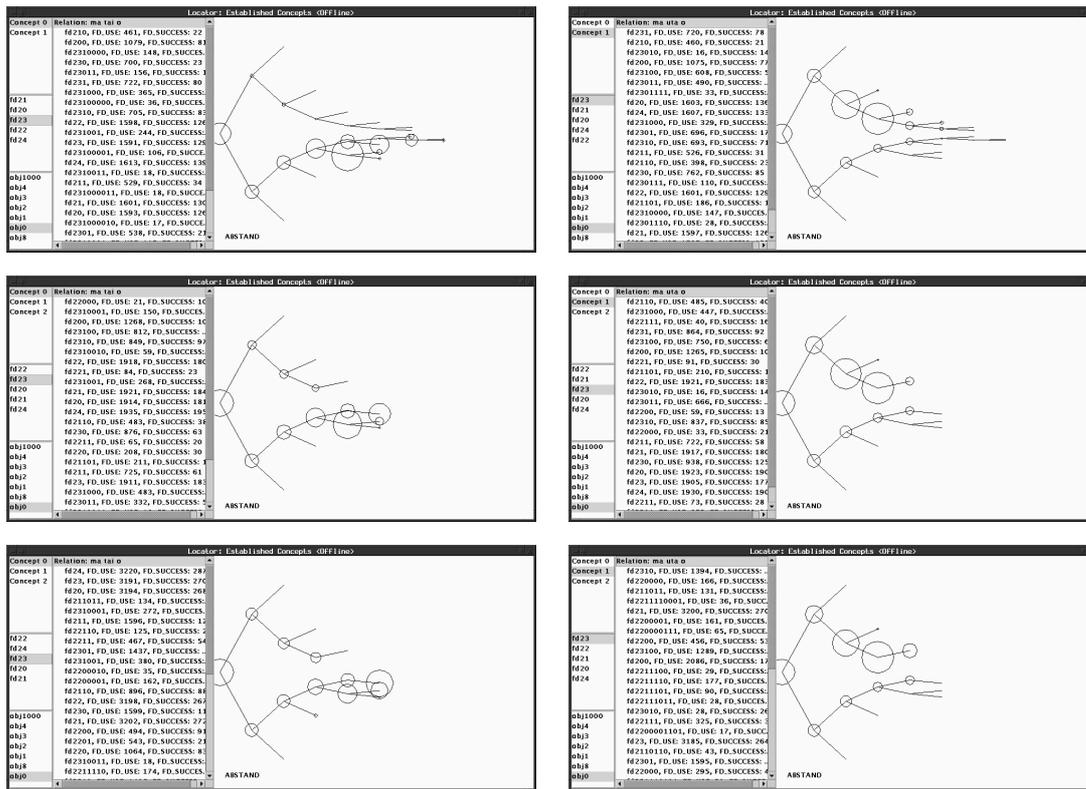


Abbildung 7.39: Experiment 4C: *ma tai o, ma uta o*, später *ma ko o*. Entwicklung der konzeptkonstituierenden Merkmalsdetektoren der Konzepte MA TAI O und MA UTA O für das Merkmal ABS (nach 1600, 2560 und 3200 Versuchen).

ferenziert war. Während der Neustrukturierung der Konzepte MA TAI O und MA UTA O werden insbesondere Merkmalsdetektoren des Merkmals 2S hinzugenommen wie in Abbildung 7.38 zu sehen ist, in der die Entwicklung konzeptkonstituierender Merkmalsdetektoren dieses Merkmals für die beiden Konzepte dargestellt ist. Die für die Konzeptetablierung verwendeten Merkmalsdetektoren für das Merkmal ABS ändern sich ebenfalls in diesem Zeitraum, wenn auch in weniger dramatischer Weise (Abbildung 7.39).

Sehr deutlich unterstrichen wird in diesem Experiment noch einmal die Wichtigkeit eines agentenorientierten Ansatzes bei der Untersuchung kognitiver Prozesse wie der Bedeutungskonstitution. In Abhängigkeit der konkreten Situationen, d.h. während der Interaktion mit der Umwelt, bilden sich die Konzepte, die zur Interpretation dieser Erfahrungen benötigt werden. Ereignen sich qualitative Veränderungen die Situationen betreffend, in die ein Agent geraten kann, muss dies zu Veränderungen in den gebildeten Konzepten führen, wie hier und in Experiment 2C gezeigt wird.

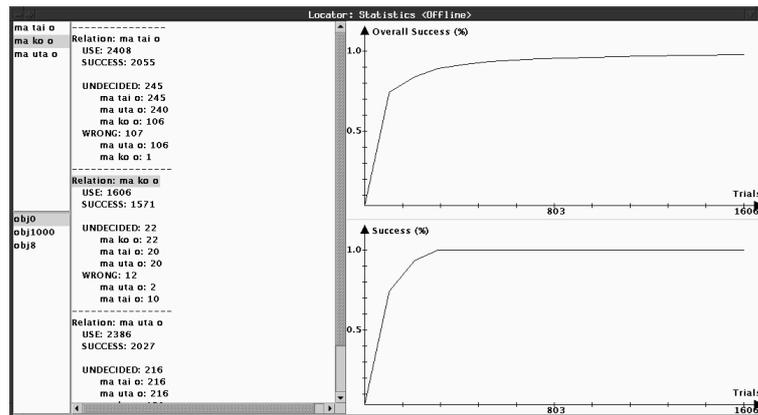


Abbildung 7.40: Experiment 4C: *ma tai o*, *ma uta o*, später *ma ko o*. Konzepterfolg eines Agenten für das Konzept MA KO O nach 6400 Versuchen.

Ein weiteres in Experiment 2C beobachtetes Phänomen tritt auch hier wieder auf. Wie in Abbildung 7.40 zu sehen, entfällt für das in der zweiten Phase neu zu etablierende Konzept MA KO O die instabile Phase. Stattdessen steigt der Kategorisierungserfolg sehr schnell auf ein hohes Niveau. Die schon in Experiment 2C angeführte Hypothese zur Erklärung dieses Phänomens trifft auch hier zu. Durch die bereits gebildeten Konzepte MA TAI O und MA UTA O ist das perzeptuelle System des Agenten schon im Sinne eines absoluten Systems vorstrukturiert. Die Bildung des Konzeptes MA KO O setzt auf diesem vorstrukturierten System auf, und führt daher direkter zum Ziel.

7.3 Diskussion

Mit den im System LOKATOR durchgeführten Experimenten wurden, wie eingangs erwähnt, insbesondere vier Aspekte verdeutlicht:

1. Sprachliche Symbole werden in sensorischen (hier: visuellen) Eingaben verankert.
2. Sprachlicher Einfluss auf nichtlinguistische Fähigkeiten manifestiert sich durch multimodale Konzeptbildung.
3. Konzepte liegen als dynamische Repräsentationen vor.
4. Universalien finden sich in Form universeller Prozesse, nicht universeller Strukturen.

Diese vier Punkte sollen hier aufgegriffen und vor dem Hintergrund der vorgestellten Ergebnisse näher erläutert werden.

Zunächst ist festzustellen, dass multimodale Konzeptbildung wie sie in LOKATOR auf der Grundlage visueller und sprachlicher Eingaben modelliert ist erfolgreich implementiert werden kann. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde ein agentenorientierter Ansatz verfolgt, der dazu zwingt, Prozesse wie Konzeptbildung in eine umfassende Architektur einzubinden. Die Untersuchung dieser Prozesse muss so immer vor dem Hintergrund der Realisierung des Gesamtsystems erfolgen, d.h. auf der Basis der durch den Agenten gegebenen sensorischen und motorischen Fähigkeiten. Während der Vorstellung der Experimente ist dieser Aspekt mehrfach erwähnt worden. Die Abhängigkeit von der gegebenen Sensorik wird in LOKATOR deutlich beim Problem der geringen Tiefenauflösung des visuellen Sensors, beispielsweise in Experiment 1B. Theoretisch könnte die *vor-/hinter*-Dichotomie ebenso wie die *rechts-/links*-Dichotomie unter Verwendung von Merkmalsdetektoren eines Merkmals erlernt werden. Hierbei handelt es sich um das Merkmal 2S, das einer der Hauptachsen menschlicher Raumwahrnehmung entspricht. Durch die geringe Tiefenauflösung des Sensors ist dieses Merkmal aber nicht so aussagekräftig wie rein theoretisch angenommen. Die Agenten in LOKATOR gleichen dieses Informationsdefizit durch Rückgriff auf Merkmalsdetektoren weiterer Merkmale aus.

Wie dieses Beispiel zeigt, sind Konzepte damit immer auf den für die Modellierung verwendeten Agenten bezogen und existieren nicht als allgemeingültige, abstrakte Konstrukte. Eine Änderung der Sensorik führt damit zwangsläufig zu inhaltlich anders strukturierten Konzepten. Dies muss nicht zwingend zu einem von außen feststellbaren Unterschied in der Kategorisierungsleistung führen. Auf diesen Punkt wird unten im Zusammenhang mit Konzepten als dynamischen Repräsentationen genauer eingegangen.

Mit einem agentenorientierten Ansatz geht das Phänomen der Situiertheit einher. Konzepte werden von einem Agenten in einer konkreten Situation während einer Interaktion mit seiner Umwelt gebildet. Daher sind sie immer auf diese Umwelt und auf diese Interaktion, also auf die erfahrene Situation, bezogen. In LOKATOR etablieren sich Situationen über die visuellen und sprachlichen Eingaben. Durch Variation der sprachlichen Eingaben konnte die Situiertheit der Konzeptbildung gezeigt werden, sehr anschaulich beispielsweise im Vergleich der Experiment 1A und 1C, in denen das gleiche Konzept RECHTS in unterschiedlichen Situationen gebildet wurde und auf Grund dessen strukturell unterschiedlich repräsentiert wurde.

Um das Phänomen einer situierten Konzeptbildung zu fassen, ist der Rückgriff auf einen dynamischen Konzeptbegriff hilfreich. Dynamik von Konzepten findet sich in LOKATOR auf unterschiedlichen Ebenen wieder. Zum einen verändern sich die Konzepte eines Agenten über die Zeit, wobei gerade zu Beginn der Konzeptbildung viele Veränderungen zu beobachten sind. Dies zeigte sich in allen Experimenten bei der Unterteilung in eine instabile Anfangsphase und eine Phase stabiler Performanz. Hat sich ein Konzept stabilisiert, führt nur noch eine radikale Änderung der Umwelt bzw. der Situationen, mit denen sich der Agent

konfrontiert sieht, zu einer Veränderung der etablierten Konzepte. Die Experimente 2C und 4C konzentrierten sich auf diesen Aspekt. Konzepte entsprechen also einer „Geschichte erfahrener Situationen“ (*engl.* history of experience). Bei einer radikalen Änderung erfahrbarer Situationen sind die etablierten stabilen Konzepte nicht mehr ausreichend, so dass sie zur Abdeckung der neuen Erfahrungen modifiziert werden müssen.

Eine weitere Ebene der Dynamik findet sich, wenn gleiche Konzepte in unterschiedlichen Agenten betrachtet werden. Da Konzepte in LOKATOR datengetrieben gebildet werden, eben eine „Geschichte der Erfahrungen“ darstellen, kann die genaue inhaltliche Strukturierung der Konzepte zwischen verschiedenen Agenten variieren. Die Experimente 2B und 4B zeigen, dass selbst bei identischen Erfahrungen Variationen möglich bleiben, wenn geringfügig andere Aspekte während der Konzeptbildung fokussiert werden.

In LOKATOR nicht realisiert ist ein dynamischer Konzeptbegriff, der von einer Repräsentation eines Konzeptes absieht und dieses lediglich aufgabenorientiert zusammensetzt, wie es beispielsweise Smith und Jones (1993) vorgeschlagen haben (Abschnitt 2.1.4). Der Aspekt der Aufgabenorientiertheit kommt aber insofern ins Spiel, als Konzepte über ihre Funktion, also in Abhängigkeit der Aufgabe, die sie lösen sollen, definiert sind. Zur Zeit beschränkt sich diese Aufgabe in LOKATOR auf die Kategorisierung der Welt, d.h. der visuellen und sprachlichen Eingaben. Lösen zwei Agenten diese Aufgaben in der gleichen Weise, haben sie die gleichen Konzepte gebildet. Da die Kategorisierungsleistung auf den vorhandenen Konzepten beruht und von einem Beobachter kein signifikanter Unterschied in dieser Leistung zwischen den Agenten festzustellen ist, verwenden sie die gleichen Konzepte für die Kategorisierung. Die Analysen der gebildeten Konzeptrepräsentationen zeigen, dass diese Konzepte deshalb trotzdem nicht inhaltlich gleich sein müssen.

Ein Ziel der Verwendung sprachlicher Eingaben als eine Basis der Konzeptbildung ist die Verankerung sprachlicher Symbole in sensorischer, hier: visueller, Wahrnehmung. Mittels der gebildeten Konzepte werden die sprachlichen Symbole, bei denen es sich um räumliche Relationen des Deutschen und des Marquesan handelt, mit Aktivierungszuständen (Merkmalsdetektoren) des perzeptuellen Systems verbunden. Damit sind zum einen die sprachlichen Symbole direkt in Teilaktivierungen des perzeptuellen Systems verankert, zum anderen „bedeutet“ die Aktivierung der entsprechenden Teilbereiche gerade die sprachliche Relation und ist durch diese beschreibbar. Konkret sind die Konzepte in LOKATOR als feste Datenstrukturen abgelegt, die im Laufe des Konzeptualisierungsprozesses aufgebaut werden. Da sie inhaltlich aus der sprachlichen Relation und den konzeptkonstituierenden Merkmalsdetektoren bestehen, ist auch eine andere Art der Etablierung denkbar, die von speziellen Datenstrukturen absieht. So könnten die konzeptkonstituierenden Merkmalsdetektoren über einen Konzeptknoten miteinander verbunden werden, so dass eine Aktivierung der entsprechenden Detektoren zu einer Aktivierung des Konzeptknotens führt, bei dem es sich beispielsweise um

einen lexikalischen Knoten für die entsprechende Relation oder um einen Knoten in einem semantischen Netz handeln könnte.

Ein wichtiger Aspekt des Systems LOKATOR ist die Frage, ob und in welcher Weise Sprache Einfluss nimmt auf nichtlinguistische kognitive Fähigkeiten. Viele empirische Evidenzen zeigen, dass diese Hypothese linguistischer Relativität nicht ausnahmslos zu verwerfen ist. In LOKATOR wird eine Möglichkeit sprachlichen Einflusses während der Konzeptbildung lokalisiert. In den vorgestellten Experimenten zeigt sich dieser Einfluss in zweifacher Hinsicht. Zunächst bestimmt die Art der sprachlichen Eingaben die Art und Komplexität der Konzeptbildungsaufgabe. Unterschiedliche sprachliche Eingaben führen hier zu inhaltlich unterschiedlich strukturierten Konzepten. Ein Effekt der sich beispielsweise im Vergleich der Experimente 1A und 1C manifestiert.

Die Agenten in LOKATOR bilden Konzepte aus der räumlichen Domäne, insbesondere Konzepte, die unterschiedlichen Rahmen räumlicher Referenz zugrundeliegen können. Auf der Basis der gleichen grundlegenden Analysemechanismen bilden die Agenten Konzepte eines relativen (Experimente 1 und 2) oder eines absoluten Referenzsystems (Experimente 3 und 4). Dies war in beiden Fällen erfolgreich möglich. Variiert wurde zwischen diesen beiden Gruppen von Agenten nur die Art der sprachlichen Eingaben. Eine der Gruppen erhielt sprachliche Eingaben auf Deutsch, die andere auf Marquesan. Die Qualität der visuellen Eingaben blieb hingegen gleich. Alle Agenten explorierten die gleiche Umwelt. Die Etablierung von Konzepten, die Relationen eines absoluten Systems entsprechen, setzt außer der Verwendung anderer Merkmalsdetektoren noch eine weitere, entscheidende Modifizierung der Auswertungsprozesse voraus: Die Etablierung eines externen Ankerpunkts als Berechnungsgrundlage für die Analyse der visuellen Eingaben. Ein solcher externer Ankerpunkt wurde von allen Agenten, die mit sprachlichen Eingaben auf Marquesan konfrontiert wurden, erfolgreich etabliert. Die qualitativ anderen sprachlichen Eingaben führten zu dieser Veränderung, so dass sich auch an dieser Stelle ein sprachlicher Einfluss auf den Konzeptbildungsprozess zeigt.

Im Zusammenhang mit einem dynamischen Konzeptbegriff und der Hypothese eines sprachlichen Einflusses stellt sich auch die Frage, wo im kognitiven System Universalien angesiedelt sind. LOKATOR gibt eine Antwort zugunsten der Existenz universeller Prozesse oder Heuristiken, die Bedingungen und Grenzen festlegen, innerhalb derer Variationen in Konzepten möglich sind. Diese universellen Prozesse werden datengetrieben innerhalb dieser Grenzen ausgebildet und stellen so das Grundgerüst für die zu bildenden Konzepte dar. Es lassen sich also zwei beschränkende Faktoren feststellen: i.) die grundlegenden, universellen Verarbeitungsroutinen, die prinzipiell einschränken, welche Konzepte überhaupt gebildet werden können und ii.) die konkret erfahrenen Situationen, welche die universellen Prozesse datengetrieben innerhalb der vorgegebenen Grenzen ausbilden.

In LOKATOR führt das dazu, dass ähnliche Situationen zu ähnlich strukturierten Konzepten oder Repräsentationen führen. Je ähnlicher die erfahrenen Situationen einander sind, desto ähnlicher sind sich auch die gebildeten Konzepte, d.h. desto enger sind auch die Möglichkeiten zur Variation. Das zeigt sich insbesondere im Vergleich der Experimente 2A mit 2B und 4A mit 4B. Diese Einschränkung der Variationsmöglichkeiten führt dazu, dass sich in den einzelnen Experimenten begrenzte Wertebereiche für die berechneten Merkmale angeben lassen, die in allen Agenten verwendet werden, die mit der gleichen Lernaufgabe konfrontiert wurden. Die Konzepte selbst unterscheiden sich inhaltlich voneinander, d.h., die konzeptkonstituierenden Merkmalsdetektoren variieren zwischen den Agenten, doch sind dieser Variation deutliche Grenzen gesetzt.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Zu Beginn dieser Arbeit wurde die Frage aufgeworfen, wie ein Lernender die in seiner Lebens- und Sprachgemeinschaft akzeptierte Form der Strukturierung der räumlichen Domäne erlernen kann, mithin wie sich die Bedeutung der wahrgenommenen Welt und der verwendeten sprachlichen Symbole konstituiert. Mit dem System LOKATOR wurde eine Antwort auf diese Frage gegeben, die sich an einer subjektivistischen Sichtweise orientiert. Bedeutung existiert nicht in einer abstrakten, objektiven Form. Stattdessen konstituiert sich Bedeutung aus den situierten und damit individuellen Interaktionen eines Agenten mit seiner Umwelt. Durch die für LOKATOR gewählte Domäne räumlicher Referenzen bezieht sich der Begriff *Bedeutung* nicht nur auf die Analyse der perzeptuellen Eingaben, sondern in besonderem Maße auf die Bedeutung sprachlicher Symbole, die solche Referenzen ausdrücken.

Die in Kapitel 3 angeführten empirischen Untersuchungen machen deutlich, dass die Art und Weise, in der einzelne Sprachen diese Domäne strukturieren, Einfluss hat auf die Art und Weise, in der nichtlinguistische kognitive Aufgaben gelöst werden. Nicht klären können diese Studien, wie und wo genau sich dieser Einfluss manifestiert. In LOKATOR wird eine sprachliche Einflussnahme während des Prozesses der Konzeptbildung lokalisiert. Dabei ist dieser Prozess multimodal, da er sich auf dreidimensionale visuelle und auf sprachliche Eingaben stützt. Konzepte werden damit zum Bindeglied zwischen perzeptuellen und sprachlichen Eingaben. Einerseits werden perzeptuelle Merkmale etabliert, selektiert und zusammengefasst, so dass eine erfolgreiche Kategorisierung möglich wird. Durch den Bezug der sprachlichen Symbole auf die perzeptuelle Modalität wird andererseits die perzeptuelle Verankerung dieser Symbole geleistet.

In Kapitel 2 wurde deutlich, dass für den Begriff des Konzeptes keine allgemein akzeptierte Definition existiert. Die Modellierung von Konzeptbildungsprozessen in LOKATOR setzte somit zunächst eine Auseinandersetzung mit den gebräuchlichsten Definitionen voraus. Die Annahme einer subjektivistischen Sichtweise legt die Adaption dynamischer Konzeptideen nahe. Traditionell wurde der Struktur von Konzepten das Hauptaugenmerk geschenkt. In objektivistischer Weise

wurde beispielsweise versucht, hinreichende und notwendige Bedingungen zu definieren, die ein Konzept ausmachen. Grundlegende Idee dynamischer Sichtweisen ist die Verschiebung des Betrachtungsfokus von objektivistischen, strukturalistischen zu subjektivistischen, prozessorientierten Erklärungen. Dabei gehen diese Ansätze teilweise so weit, Konzepte nicht länger als Repräsentationen zuzulassen, sondern lediglich als emergente Phänomene zu betrachten, die kontext- und aufgabenabhängig aus vorhanden Wissensbausteinen aufgebaut werden.

Die Modellierung von Prozessen der Konzeptbildung erfordert es, theoretische Ideen zum Begriff des Konzeptes zu explizieren. Konzepte in LOKATOR folgen den Grundideen dynamischer Ansätze ohne deren Negierung einer repräsentationalen Struktur zuzustimmen. Damit leistet das System einen Beitrag zur Propagierung und Umsetzung einer solchen Sichtweise. Zusammenfassend werden hier noch einmal die entscheidenden Aspekte Herkunft, Form, Funktion und Inhalt zur Erläuterung des Konzeptbegriffes aus Kapitel 2 aufgegriffen.

Konzepte werden situiert in der Interaktion des Agenten mit seiner Umwelt aufgebaut. Dabei spielen „angeborene“ universelle Prozesse und die situativ gewonnenen Eingabedaten zusammen. Die Herkunft von Konzepten lässt sich so weder direkt auf angeborene Strukturen noch direkt auf in der Umwelt vorhandene Strukturen zurückführen. Vielmehr kriert ein Agent in Prozessen der Selbstorganisation und Selektion eigenständig Unterscheidungsmerkmale, die für die Konzeptbildung verwendet werden.

Bei den etablierten Konzepten handelt es sich um amodale Repräsentationen. Wesentlicher Bestandteil sind Mengen von Merkmalsdetektoren, die als Analyseergebnis der perzeptuellen Eingaben der Kategorisierungs- und Konzeptualisierungskomponente vom perzeptuellen System zur Verfügung gestellt werden. Zwar abstrahieren diese Merkmalsdetektoren von den konkreten Eingabewerten und sind damit amodal, da sie aber bestimmten Eingabekanälen zugeordnet sind, bleiben sie modalitätsspezifisch. Dies gewinnt bei einer Erweiterung der sensorischen Fähigkeiten der Agenten an Bedeutung, da Merkmalsdetektoren als Analysemechanismus für alle Sensorikanäle in Frage kommen. Damit steht ein einheitliches amodales Repräsentationsformat zur Verfügung, das auf Grund der Modalitätsspezifität trotzdem die Zuordnung der verwendeten Detektoren zu ihrem perzeptuellen Ursprung und damit die Analysierbarkeit der etablierten Konzepte garantiert.

Der Inhalt der Konzepte besteht zusätzlich zu den Merkmalsdetektoren aus einem sprachlichen Symbol, das einer der räumlichen Relationen in den sprachlichen Eingaben zugeordnet werden kann. Auf diese Weise wird die perzeptuelle Verankerung von sprachlichen Symbolen von den gebildeten Konzepten geleistet. Da dieselben sprachlichen Symbole während des Prozesses der Konzeptbildung als Selektionskriterium für das Auffinden von Korrelationen zwischen den verschiedenen erfahrenen Situationen funktionalisiert werden, leisten sie ebenfalls eine sprachliche Verankerung von Perzepten. Die in den Konzepten gespeicherten Merkmalsdetektoren können als Teilaktivierung des perzeptuellen Systems

interpretiert werden, dem durch die Selektion und Zusammenfassung in einem Konzept Bedeutung zugesprochen wird. Konzepte stellen somit die Beziehung zwischen perzeptuellen und sprachlichen Eingaben her. Die Kategorisierung von Eingaben stellt eine weitere Funktion der Konzepte dar. In den Experimenten, die in den Kapiteln 6 und 7 beschrieben wurden, wird deutlich, dass Konzepte eine spezifische Art der Kategorisierung erlauben, die kompatibel mit allen — visuellen und sprachlichen — Eingaben ist.

Die mit LOKATOR durchgeführten Experimente unterstreichen die Wichtigkeit eines situierten Ansatzes bei der Untersuchung von Prozessen der Konzeptgenese. In der Einleitung wurde die Unterscheidung zwischen einer *interlingualen*, einer *intersubjektiven* und einer *intrasubjektiven* Ebene eingeführt. Die Experimente berücksichtigen alle diese Ebenen. *Interlingual* meint, dass sich Situiertheit bei Betrachtung verschiedener Sprachen nachweisen lässt. Während im Deutschen die räumliche Domäne in einer Weise strukturiert wird, die mit einem relativen Referenzsystem kompatibel ist, verwendet das Marquesan hier ein absolutes System. Durch den Vergleich der Konzepte, die bei der Verwendung der verschiedenen Sprachen etabliert wurden, konnten die Effekte situierter Konzeptbildung gezeigt werden. Unter dieser Prämisse ist es möglich die Experimente 1 und 2 von den Experimenten 3 und 4 abzugrenzen. Situiertheit auf *intersubjektiver* Ebene schlägt sich nieder in inhaltlich unterschiedlichen Konzepten von Agenten, die mit qualitativ gleichen Eingaben konfrontiert wurden. Dieser Effekt zeigte sich durchgängig in allen Experimenten. Die von den jeweils fünf Agenten eines Durchgangs etablierten Konzepte erlaubten zwar die erfolgreiche Kategorisierung der Eingabendaten, waren aber inhaltlich nicht identisch. Trotzdem konnten Wertebereiche für die Merkmale ermittelt werden, innerhalb derer eine Variation möglich war. Die Experimente 2B und 4B zeigen zudem, dass das Phänomen Situiertheit auch auf *intrasubjektiver* Ebene nachweisbar ist. In diesen Experimenten wurde jeweils die Explorationsgeschichte eines Agenten abgespeichert und vier weiteren Agenten oktroyiert. Dadurch wurden jeweils fünf Agenten mit identischen visuellen und sprachlichen Eingaben konfrontiert (2B für ein relatives, 4B für ein absolutes System). Auch hier lassen sich Variationen in den etablierten Konzepten feststellen, wobei diese allerdings sehr viel geringer ausfallen. Insgesamt wird durch die Ergebnisse aller Experimente die Anwendbarkeit eines nicht objektivistischen, dynamischen Ansatzes unterstützt. In allen Fällen etablierten die Agenten in Abhängigkeit der konkret erfahrenen Situationen Konzepte, die zum einen eine erfolgreiche Kategorisierung der Eingabedaten erlaubten und zum anderen die in den sprachlichen Eingaben vorgegebene Art der Strukturierung der räumlichen Domäne repräsentieren.

Damit wird in LOKATOR die Annahme negiert, bei Konzepten handele es sich um universale Strukturen. Stattdessen finden sich Universalien in Form universeller Prozesse, die sich an drei Stellen innerhalb des Systems lokalisieren lassen. Hierbei handelt es sich zunächst um die sensorischen Kapazitäten der einzelnen Agenten, zu denen auch die auf den dreidimensionalen Eingabebildern automa-

tisch ausgeführten Transformationen und Berechnungen zählen und die in Kapitel 5.3 ausführlich erläutert wurden. Weiterhin lassen sich die für die Analyse der visuellen Eingaben verwendeten Merkmalsdetektoren als universelle Prozesse identifizieren (Kapitel 5.3.2.4). Alle Agenten starten mit den gleichen grundlegenden Detektoren, die aber im Laufe der Zeit in situierter Weise modifiziert werden, und so schließlich eine agentenspezifische Analyse der Eingabedaten erlauben. Ebenfalls universell sind die Prozesse der Kategorisierungs- und Konzeptualisierungskomponente (Kapitel 5.5), die unter Verwendung der multimodalen Eingaben die Bildung geeigneter, d.h. auf die erfahrenen Situationen bezogener, Konzepte realisieren.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis neben der erfolgreichen Implementierung einer prozessorientierten Sichtweise zeigt sich in den Experimenten 2C und 4C. Die Annahme dynamischer Konzepte resultiert nicht zwangsläufig in der Aufgabe stabiler Konzepte. Nach der Etablierung der Konzepte wurden die Agenten mit Situationen konfrontiert, die mit den bisher gebildeten Konzepten nicht ausreichend kategorisiert werden konnten. Dadurch wurde es notwendig neue Konzepte anzulegen und die bisherigen zu modifizieren. In diesen Experimenten wird deutlich, dass es sich bei den Konzepten tatsächlich um dynamische Entitäten handelt. Zusätzlich wird noch einmal unterstrichen, dass das Phänomen Situiertheit eine entscheidende Rolle während der Konzeptbildung spielt. Nach der Etablierung der Konzepte zeigt sich in der ersten Phase der Experimente eine stabile Kategorisierungsleistung. Durch die Veränderung erfahrbarer Situationen kommt es hier zu Beginn der zweiten Phase zu einem Einbruch. Nach kurzer Zeit haben sich auf Grund der veränderten Lage neue Konzepte gebildet und die alten wurden modifiziert, so dass wiederum eine stabile Performanz feststellbar ist. Die im Laufe der Zeit sich herauskristallisierenden stabilen Konzepte bleiben dynamisch. Wenn sich die Umwelt der Agenten in einer Weise ändert, durch die die vorhandenen Konzepte inadäquat werden, werden sie automatisch wieder in den Konzeptualisierungsprozess miteinbezogen.

An dieser Stelle stellt sich die Frage, was die Konvergenz der Konzepte auf ein stabiles Niveau bedingt und wann genau eine solche Konvergenz ausbleibt. Diese Frage ist mit der aktuellen Versuchsanordnung nur bedingt zu beantworten. Die Analyse der Kategorisierungsleistung für unzureichende Ankerpunkte in den Experimenten 1A und 2A zeigte, dass in diesen Fällen der Prozess der Konzeptbildung nicht erfolgreich war. Dies zeigen auch die Erfolgskurven der beteiligten Konzepte. In Abbildung 8.1 sind beispielhaft für einen Agenten die Kurven für die Konzepte RECHTS und LINKS dargestellt, die für den Ankerpunkt *obj8* (Zaun) gebildet wurden. Da keine Korrelation zwischen den Positionen der Objekte in der Szene und den sprachlichen Lokalisationen in Bezug auf den hier gewählten Ankerpunkt besteht, ist es dem Agenten auch nicht möglich, stabile Konzepte zu etablieren. Ein Faktor erfolgreicher Konzeptbildung ist also das Vorhandensein von Korrelationen zwischen den visuellen und sprachlichen Eingaben.

Eine weitere, leider ungeklärte Frage betrifft die formalen Unterschiede zwi-

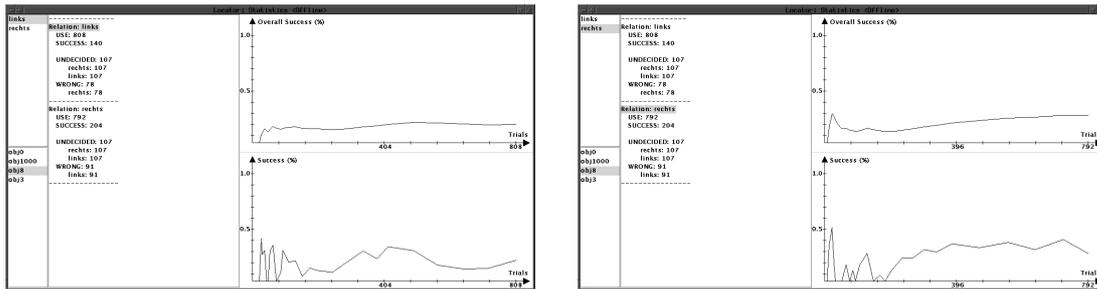


Abbildung 8.1: Konzepterfolg der Konzepte LINKS und RECHTS für den Ankerpunkt *obj8* (Zaun). Es ist keine erfolgreiche Kategorisierung möglich.

schen den Situationen. Zwar konnte gezeigt werden, dass die erfahrenen Situationen wichtig für den Erfolg des Konzeptbildungsprozesses und für die Ausprägung der etablierten Konzepte sind. Dies wurde insbesondere in Experiment 4A deutlich, in dem sich auf Grund der erfahrenen Situationen in zwei Agenten ein Konzept bildete, das einem absolut verankerten LINKS entsprach. Unklar bleibt aber, durch welche situativen Faktoren die gefundenen Variationen zwischen verschiedenen Agenten tatsächlich ausgelöst werden. Ein möglicher nächster Arbeitsschritt ist somit die Ableitung situativer Faktoren, die bestimmte Konzeptausprägungen bedingen. Hier bietet die Verwendung eines Simulationssystems große Vorteile, da die Umwelt der Agenten komplett kontrollierbar ist und auf diese Weise gezielt Einfluss genommen werden kann auf die erfahrbaren Situationen. Dieser Vorteil der totalen Kontrolle zeigt sich auch bei den bereits durchgeführten Experimenten. So konnten die Ursachen bestimmter Effekte wie beispielsweise die Probleme des Erwerbs der Konzepte VOR und HINTER direkt bestimmt werden. In diesem Fall war die geringe Tiefenauflösung des visuellen Sensors Verursacher des Effektes.

Wie sind die mit LOKATOR erzielten Ergebnisse in Bezug auf andere Modellierungsversuche der Konzeptbildung zu bewerten? Ein Vergleich mit Regiers Modell (Kapitel 4.7) liegt nahe, da er zum einen ebenfalls die räumliche Domäne verwendet und zum anderen auch von der Annahme universeller Prozesse anstelle universeller Strukturen ausgeht. Durch die konsequente Anwendung der von Franklin und Graesser (1996) vorgeschlagenen Agentendefinition lassen sich in LOKATOR wichtige Fortschritte gegenüber Regiers Modell aufzeigen. Das neuronale Netz interagiert nicht mit einer Umwelt, sondern erhält künstlich generierte, zweidimensionale Bilder als Eingaben, auf denen außer zwei abstrakten geometrischen Objekten, die Trajektor und Landmark darstellen, keine weiteren Objekte zu sehen sind. Welches der beiden Objekte Trajektor und welches Landmark ist, wird dem System zudem vorgegeben. Um in diesem Modell den Erwerb deiktischer Konzepte möglich zu machen, musste ein deiktisches Zen-

trum mit eindeutiger Ausrichtung in das Bild eingebaut werden. Dabei änderte sich die Interpretation des Bildes von einer Seitenansicht zu einer Aufsicht. Da das neuronale Netz der Agentendefinition nicht genügt, kann es nicht selbst als dieses Zentrum dienen. Zudem ist eine solche beliebige Interpretation des Eingabebildes möglich. Die Agenten in LOKATOR bewegen sich dagegen explorierend durch ihre Umwelt. Dabei nehmen sie diese Umwelt mit der ihnen zur Verfügung stehenden Sensorik wahr, die ein dreidimensionales Eingabebild liefert. Da die Agenten selbst Teil der Umwelt sind, stehen sie apriori als deiktisches Zentrum zur Verfügung mit einem klar definierten oben und vorn. Im Zuge des Erwerbs absoluter Systeme ist eine Abstraktion von diesem Selbstbezug notwendig, bei der aber weiterhin die durch den Agenten definierte Vertikale beachtet wird.

Regier konzentriert seine Untersuchungen auf Sprachen, die zwar deutliche Variationen in der Art der Strukturierung der räumlichen Domäne zeigen, aber alle einen relativen Referenzrahmen realisieren. Die Modellierung in LOKATOR geht in diesem Punkt einen Schritt weiter, indem auf der Grundlage der gleichen univereellen Prozesse referenzsystemübergreifend Konzeptbildung modelliert wird. Die Ergebnisse der in den Kapiteln 6 und 7 beschriebenen Experimente machen den Vorteil deutlich, den die Verwendung von Merkmalsdetektoren anstelle neuronaler Netze zur Analyse der perzeptuellen Eingaben bietet. Eine detaillierte Analyse der tatsächlich emergierten und verwendeten Merkmale bzw. Merkmalsbereiche ist einfach durchführbar. Damit sind spezifische Aussagen über die Zusammensetzung der Konzepte und die tatsächlichen Variationsbereiche möglich.

Die sprachlichen Eingaben beschränken sich bei Regier auf räumliche Präpositionen, die als Interpretation der Ausgabeknoten verwendet werden. Nach der *Mutual Exclusivity Hypothesis* stellen sie zu Beginn der Lernphase positive Beispiele der gewünschten Kategorisierung und negative der unerwünschten dar und werden entsprechend in die Modifizierung der Gewichtsmatrix einbezogen. Dieser Exklusivitätsanspruch der sprachlichen Eingaben wird mittels eines Parameters im Laufe der Zeit verringert. In LOKATOR werden die sprachlichen Eingaben dagegen von Anfang an als positive Beispiele verwendet, da sie die allgemein in der Sprachgemeinschaft akzeptierte Form konzeptueller Strukturierung tradieren. Schlägt eine Kategorisierung fehl, so wird dies nicht als negative Evidenz für das fälschlicherweise verwendete Konzept interpretiert. Es wird vielmehr angenommen, das zur Kategorisierung eigentlich anzuwendende Konzept sei noch nicht ausreichend entwickelt.

Die Agenten erhalten vollständige Sätze als sprachliche Eingaben, aus denen dann die benannten Objekte, d.h. Figur und Grund, sowie die benannte räumliche Relation gefiltert werden (Kapitel 5.4). Das hierzu notwendige syntaktische Wissen ist in den Finite State Transducern (FST) der konzeptuellen Verarbeitung kodiert und damit vorgegeben. Im Fokus dieser Arbeit steht der Konzeptbildungsprozess, so dass möglichen Prozessen des Erwerbs syntaktischen Wissens keine Aufmerksamkeit geschenkt wurde. Für eine Weiterentwicklung des Gesamtsystems wäre dies aber ein lohnenswerter Ansatzpunkt, da auch hier von

der Annahme situierter Bildungsprozesse ausgegangen werden kann.

Die mit LOKATOR geleistete perzeptuelle Verankerung sprachlicher Symbole über die etablierten Konzepte stellt eine intensionale Semantik der beteiligten räumlichen Ausdrücke dar. Die Analyse der Konzepte erlaubte die Angabe der Merkmale bzw. Merkmalsbereiche, innerhalb derer verwendete Konzepte variieren können. Diese Art der perzeptuellen Verankerung ist kompatibel mit den Annahmen Jackendoffs, der für die von ihm entwickelte konzeptuelle Semantik gerade von *I-Konzepten*, d.h. von intensionalen Konzepten bzw. konzeptuellen Primitiven ausgeht (Kapitel 2.1.2). Siskind hat in seinem System ABIGAIL die Verankerung der von ihm verwendeten Primitive vorgegeben (Kapitel 4.8). Werden die in LOKATOR gebildeten Konzepte als räumliche konzeptuelle Primitive verstanden, leistet das System diesen Schritt selbstständig. Eine naheliegende Erweiterung besteht nun in der Ausformulierung eines semantischen Repräsentationssystems der räumlichen Domäne, das auf eben diesen Primitiven basiert und sich an Jackendoffs konzeptueller Semantik orientiert.

Die in verschiedenen Sprachen realisierten Rahmen räumlicher Referenz zeigen mögliche Variationen in der semantischen und konzeptuellen Strukturierung dieser Domäne. Aufgrund der unterschiedlichen Implikationen, die sich aus der Benutzung eines spezifischen Referenzrahmens ergeben, sind Rahmen räumlicher Referenz als Beispieldomäne gut geeignet. Die Modellierung von Prozessen der Bedeutungskonstitution ist in LOKATOR für Dreipunktlokalisationen relativer und absoluter Referenzrahmen realisiert. Für die Beschränkung auf diese beiden Referenzrahmen und auf diese Art der Lokalisation gibt es folgende Gründe. Die logischen Implikationen, die sich aus dem Vergleich der Referenzrahmen ergeben, sind insbesondere zwischen relativen und absoluten Systemen besonders ausgeprägt, so dass die Wahl auf diese fiel. Wie in Kapitel 5.6 erläutert wurde, ist es möglich, intrinsische Referenzrahmen als Spezialfall relativer zu behandeln, indem die etablierten Konzepte nicht länger im Agenten selbst verankert, sondern dynamisch dem intrinsisch gerichteten Referenzobjekt oktroyiert werden.

Der Verzicht auf egozentrische Lokalisationen in relativen (z.B. *Die Kuh steht vor mir*) bzw. semi-egozentrische in absoluten Referenzrahmen (z.B. *Die Kuh steht seewärts von mir*) stellt ebenfalls kein prinzipielles Problem der hier beschriebenen Modellierung dar. Der Agent selbst ist in diesen Äußerungen als Referenzobjekt enthalten. Da er als Ursprung des Koordinatensystems, in dem das dreidimensionale Eingabebild definiert ist, immer Teil der visuellen Wahrnehmung ist, werden alle Merkmalsberechnungen auch für den Agenten als mögliches, an der Referenz beteiligtes Objekt ausgeführt. Eine Erweiterung auf diese Lokalisationen könnte sich daher auf die Umstrukturierung der verwendeten FSTs innerhalb der konzeptuellen Verarbeitung beschränken.

Die Einschränkung der sensorischen Fähigkeiten auf das visuelle System und das Nichtvorhandensein einer Gedächtniskomponente, abgesehen von den Konzepten, die als Repräsentation der Erfahrungsgeschichte eines Agenten auch eine Art Gedächtnisfunktion ausüben, geht einher mit einer Beschränkung der Veran-

kerung absoluter Systeme in der visuellen Modalität. Durch die rein visuelle Verankerung (in den durchgeführten Experimenten bezogen auf den Berg) handelt es sich eigentlich nicht um ein rein absolutes System, wie es durch kardinale Richtungen (z.B. Kompassrichtungen) ausgedrückt würde, sondern eher um ein absolut intrinsisches System. Nach Levinson (persönliche Kommunikation, 28.2.2001) gibt es Indizien dafür, dass Kinder bei der Akquisition absoluter Referenzrahmen in einem ersten Schritt mit einer solchen objektbezogenen Verankerung starten. Ähnliches berichtet Brown (persönliche Kommunikation, 9.12.1999), die anführt, dass bei ihren tzeltalsprechenden Informanten die Anordnung der Schlaf- und Kochhütten insofern fest vorgegeben ist, als die Schlafhütte bergaufwärts liegt (*uphill*). Gebräuchlich sind daher Ausdrücke wie *Ich gehe bergauf*, wenn jemand von der einen in die andere Hütte wechselt. Brown hält es daher nicht für ausgeschlossen, dass Kinder zunächst die Relationen entsprechend objektbezogen verwenden¹.

Absolute System, die auf kardinalen Richtungen wie beispielsweise Kompassrichtungen basieren, lassen sich mit den in LOKATOR zur Verfügung stehenden Agenten zur Zeit nicht erlernen. In einem solchen Fall muss von den visuellen Eingaben in viel stärkerem Maße abstrahiert werden. Unabdingbar ist in einem solchen Fall beispielsweise eine Gedächtniskomponente, um Funktionen wie mentale Buchführung der Bewegungen des Agenten zu leisten. Auf diese Weise könnte die aktuelle Ausrichtung des Agenten in Bezug auf ein externes, festes Koordinatensystem ermittelt werden.

Die der Modellierung in LOKATOR zugrundeliegende Agentendefinition von Franklin und Graesser legt besonderes Gewicht auf die Interaktion eines Agenten mit seiner Umwelt. Im Rahmen des Handlungsauswahlparadigmas von Franklin kommt hierbei der Auswahl einer geeigneten Handlung große Bedeutung zu. Bei den Agenten in LOKATOR handelt es sich um reaktive Agenten, deren Handlungen in der Exploration ihrer Umwelt bestehen. Ausgewählt werden sie als Reaktion auf die konkrete Situation, in der sich ein Agent befindet, d.h. in Abhängigkeit davon, ob es möglich ist nach vorn zu gehen. Für die hier untersuchten Fragestellungen war diese vom Simulationssystem LOKUTOR übernommene Verhaltensmodellierung auf der Grundlage einer behaviorbasierten Subsumptionsarchitektur ausreichend. Eine sinnvolle und wünschenswerte Erweiterung des Systems LOKATOR stellt der Einbezug der etablierten Konzepte in die Auswahl geeigneter Handlungsroutrinen dar. Als Szenario denkbar ist hier beispielsweise eine Simulation der im Rahmen des Raumprojektes am MPI in Nijmegen ausgeführten Tischexperimente (Kapitel 3.4). Diese machten Gebrauch von den logischen Implikationen der unterschiedlichen Referenzrahmen zum Nachweis der Hypothese sprachlicher Einflussnahme auf nichtlinguistische kognitive Fähigkeiten.

¹Hier wird noch einmal deutlich, dass bisher kaum belastbare Ergebnisse zum Erwerb absoluter Systeme zur Verfügung stehen. Dadurch kann in Bezug auf die dabei ablaufenden Mechanismen leider lediglich von Indizien und Vermutungen ausgegangen werden.

Die Auswahl geeigneter Handlungsrouinen stellt genau eine solche nichtlinguistische kognitive Fähigkeit dar. Notwendig für eine solche Erweiterung ist neben der Realisierung entsprechender Behaviormodule zur Manipulation von Objekten vor allem eine Gedächtniskomponente, um die Ausgangsszenen zu speichern und bei der Handlungsauswahl berücksichtigen zu können.

Abschließend lässt sich festhalten, dass zwei grundlegende Aspekte die Arbeit an dieser Dissertation leiteten. Die Modellierung von Prozessen des Konzepterwerbs, die unterschiedlichen Systemen räumlicher Orientierung zugrundeliegen, war erfolgreich möglich, wie sich anhand der durchgeführten Experimente zeigte. Durch die Annahme universeller Prozesse statt universeller Strukturen wird die Frage motiviert, welche Prozesse genau als universell vorausgesetzt werden müssen. Für das System LOKATOR waren dies die Verarbeitungsprozesse des visuellen und konzeptuellen Systems, sowie die Kategorisierungs- und Konzeptualisierungsprozesse. In diesem Zusammenhang wird nochmals die Notwendigkeit eines agentenorientierten Ansatzes deutlich. Die grundlegenden und universellen Analyseprozesse werden im Laufe der Zeit agentenspezifisch modifiziert. Zur Zeit beschränkt sich diese Modifizierung noch auf die Prozesse des visuellen Systems. Oben wurde schon angedeutet, dass auch für das konzeptuelle System, d.h. für die Prozesse der Sprachverarbeitung, eine solche, durch die situative Einbettung des Agenten angestossene, Modifizierung denkbar ist.

Anhang A

Die Umwelt in Lokator

In diesem Anhang findet sich eine Übersicht der in der Simulation verwendeten Objekte. Bis auf das Känguruh, das aus einem Modellarchiv im WWW stammt, wurden alle Objekte mit Hilfe des Programmes AC3D erstellt und nach VRML (*engl.* Virtual Reality Markup Language) exportiert.

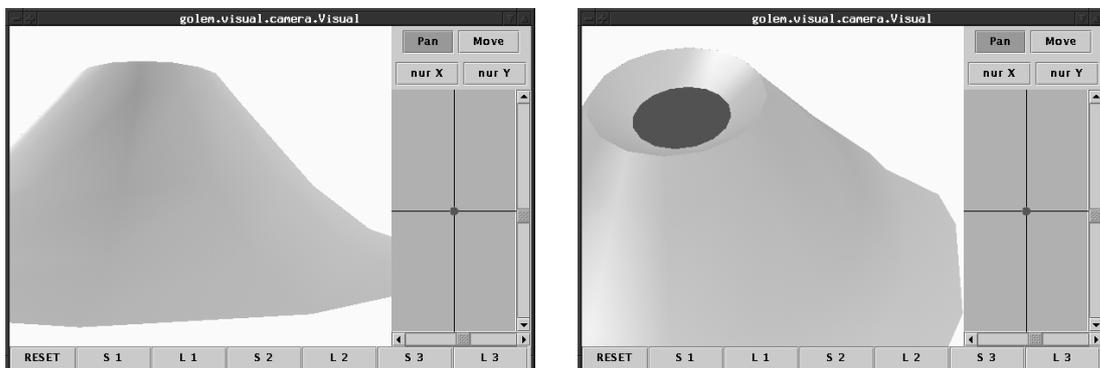


Abbildung A.1: Der als Ankerpunkt des absoluten Systems dienende Berg. Links von der Seite aus betrachtet, rechts von oben.

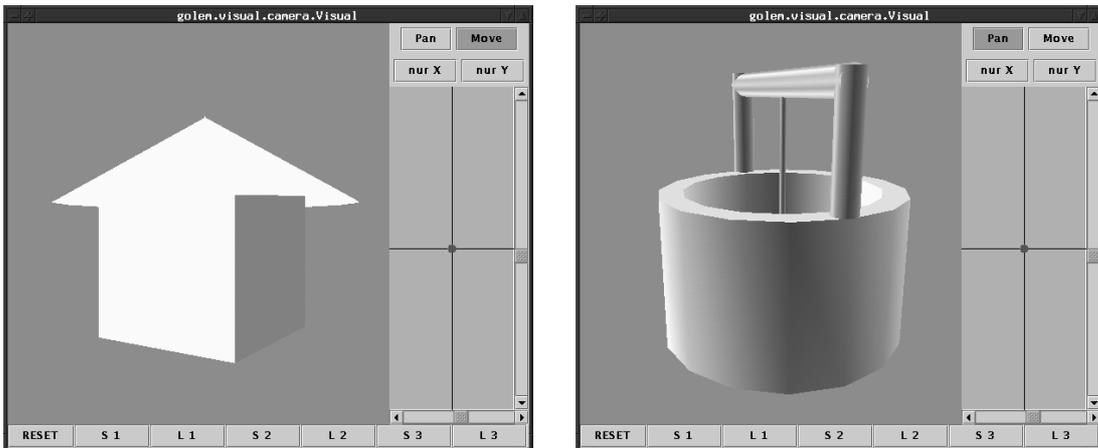


Abbildung A.2: Haus (links) und Brunnen (rechts).

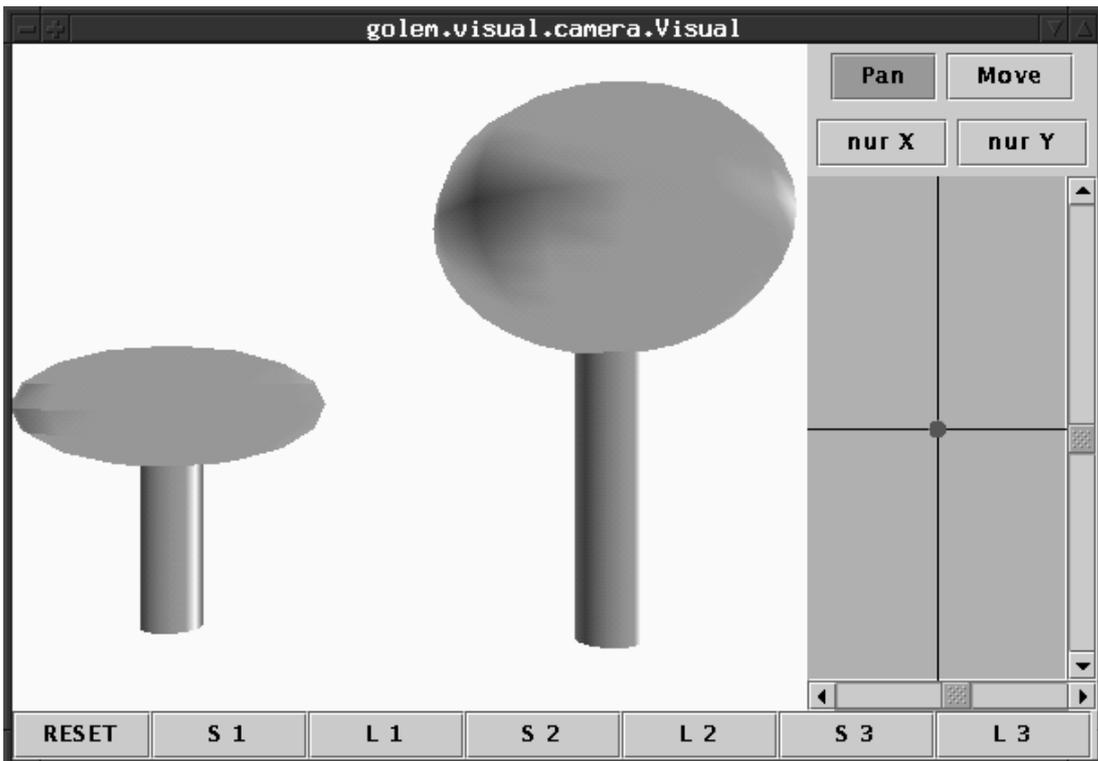


Abbildung A.3: Es stehen sowohl kleine als auch große Bäume zur Verfügung.

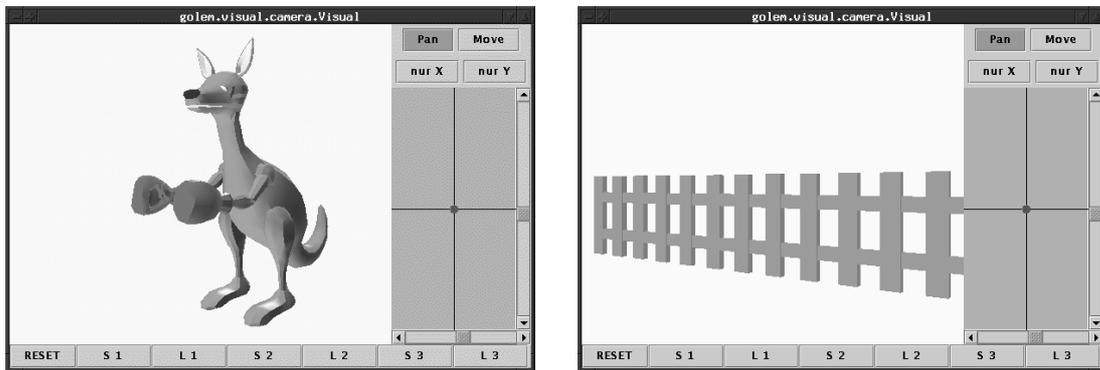


Abbildung A.4: Känguruh (links) und Zaun (rechts).

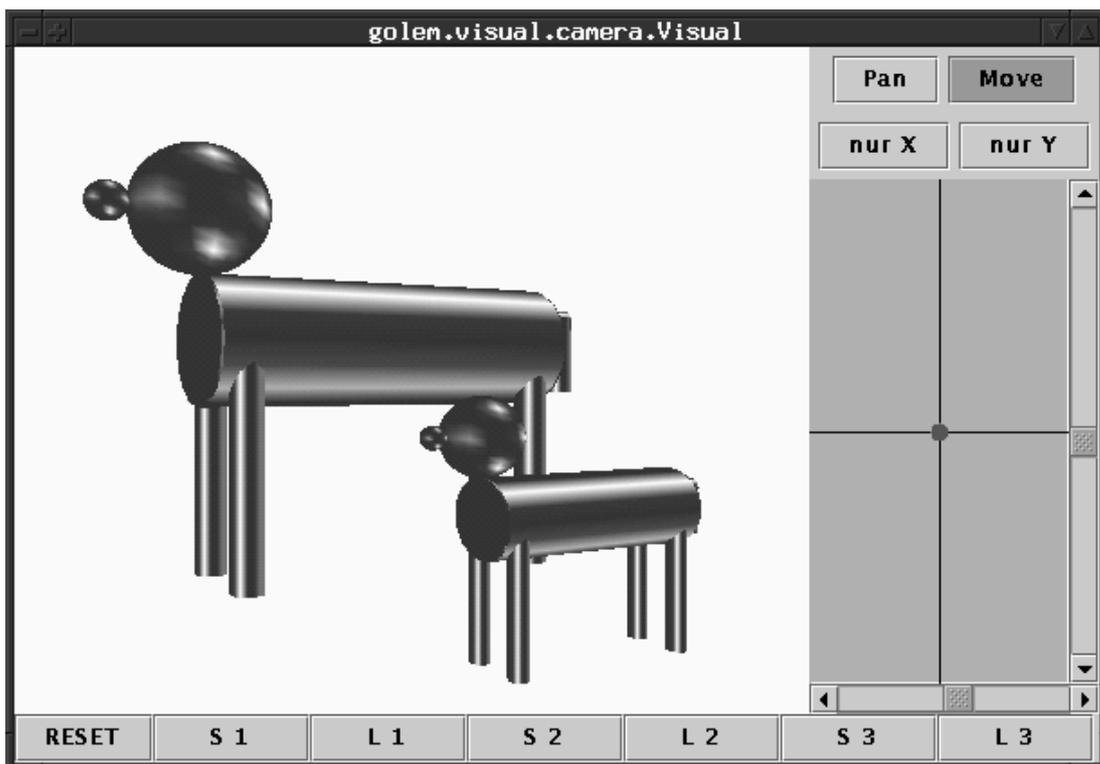


Abbildung A.5: Kleines und großes Tier. Das große Tier wird auch als Kuh referenziert.

Literaturverzeichnis

- Baars, B. J. (1988). *A cognitive theory of consciousness*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Baars, B. J. (1996). *In the Theater of Consciousness : The Workspace of the Mind*. Oxford: Oxford University Press.
- Barsalou, L. W. (1992). *Cognitive Psychology - An Overview for Cognitive Scientists*. Lawrence Erlbaum Associates.
- Barsalou, L. W. (1993). Challenging Assumptions About Concepts. *Cognitive Development*(8), 169-180.
- Barsalou, L. W. (1999). Perceptual Symbol Systems. *Behavioral and Brain Science*, 22, 577-660.
- Belke, E., & Meyer, A. S. (im Druck). Tracking the time course of multidimensional stimulus discrimination: Analyses of viewing patterns and processing times during same-different decisions. *European Journal of Cognitive Psychology*.
- Belpaeme, T., Steels, L., & Looveren, J. V. (1998). The construction and acquisition of visual categories. In A. Birk & J. Demiris (Hrsg.), *Proceedings of the 6th European Workshop on Learning Robots*. Springer.
- Birbaumer, N., & Schmidt, R. F. (1991). *Biologische Psychologie* (2. Aufl.). Berlin: Springer.
- Bowerman, M. (1996). Learning How to Structure Space for Language: A Cross-linguistic Perspective. In P. Bloom, M. A. Peterson, & L. Nadel (Hrsg.), *Language and Space* (S. 385-436). Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Bowerman, M., & Choi, S. (2001). Shaping meanings for language: universal and language-specific in the acquisition of spatial semantic categories. In M. Bowerman & S. C. Levinson (Hrsg.), *Language acquisition and conceptual development* (S. 475-511). Cambridge: Cambridge University Press.

- Bowerman, M., & Levinson, S. C. (Hrsg.). (2001). *Language acquisition and conceptual development*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Brooks, R. A. (1991). Intelligence Without Representation. *Artificial Intelligence*, 47, 139-159.
- Brown, C. H. (1983). Where do cardinal direction terms come from? *Anthropological Linguistics*, 25(1), 121-161.
- Bruner, J., Goodnow, J., & Austin, G. (1999 [1956]). The Process of Concept Attainment. In E. Margolis & S. Laurence (Hrsg.), *Concepts: core readings* (S. 101–123). Cambridge, M.A.: MIT Press. (originally appeared in: Bruner, J., Goodnow, J., und Austin, G. (1956) *A Study of Thinking*, Transaction Publishers)
- Bußmann, H. (1990). *Lexikon der Sprachwissenschaft*. Stuttgart: Kröner.
- Cangelosi, A., & Harnad, S. (2000). The adaptive advantage of symbolic theft over sensorimotor toil: grounding language in perceptual categories. *Evolution of Communication (Special Issue on Grounding Language)*.
- Cangelosi, A., & Parisi, D. (1998). The emergence of a “language“ in an evolving population of neural networks. *Connection Science*(10), 83–97.
- Choi, S., & Bowerman, M. (1991). Learning to express motion events in English and Korean: The influence of language-specific lexicalization patterns. *Cognition*(41), 83-121.
- Clark, A. (1997). *Being There: Putting Brain, Body, and World Together Again*. MIT Press.
- Cognition 65. (1998). *Special Issue on Similarity*. Elsevier Science.
- Deacon, T. (1997). *The symbolic species – the co-evolution of language and the humana brain*. London: Penguin Books.
- Drozd, K., & Weijer, J. van de (Hrsg.). (1997). *Annual report 1997*. Nijmegen: Max-Planck-Institut für Psycholinguistik.
- Edelman, G. M. (1987). *Neural Darwinism - The Theory of Neurological Group Selection*. Basic Books.
- Edelman, G. M. (1992). *Göttliche Luft, vernichtendes Feuer*. Piper.
- Faucounnier, G. (1985). *Mental spaces*. Cambridge, MA.: MIT Press.
- Fillmore, C. (1982). Towards a descriptive framework for spatial deixis. In R. Jarvella & W. Klein (Hrsg.), *Speech, place, and action*. London: Wiley.

- Franklin, S. (under review). „Conscious“ Software: A Computational View of Mind. *Behavioral and Brain Sciences*.
- Franklin, S., & Graesser, A. (1996). Is It an Agent, or Just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents. In J. P. Müller, M. J. Woolridge, & N. R. Jennings (Hrsg.), *Intelligent Agents III. Agent Theories, Architectures, and Languages*. (S. 21-35). Springer.
- Franklin, S., & Graesser, A. (1998). A Software Agent Model of Consciousness. In *Conscious Learning in an Adaptive Software Agent — Proceedings of the 2nd Asia Pasific Conference on Simulated Evolution and Learning*.
- Franklin, S. P. (1995). *Artificial minds*. MIT Press.
- Gapp, K.-P. (1994a). *Basic Meanings of Spatial Relations: Computation and Evaluation in 3D Space* (Tech. Rep. Nr. 101). Saarbrücken: Sonderforschungsbereich 314, Projekt VITRA, Universität des Saarlandes.
- Gapp, K.-P. (1994b). *From Vision to Language: A Cognitive Approach to the Computation of Spatial Relations in 3D Space* (Tech. Rep. Nr. 110). Saarbrücken: Sonderforschungsbereich 314, Projekt VITRA, Universität des Saarlandes.
- Gapp, K.-P. (1995). *An Empirically Validated Model for Computing Spatial Relations* (Tech. Rep. Nr. 118). Saarbrücken: Sonderforschungsbereich 314, Projekt VITRA, Universität des Saarlandes.
- Gazdar, G., & Mellish, C. (1989). *Natural language processing in LISP*. Wokingham: Addison-Wesley.
- Geenhoven, V. V., & Warner, N. (Hrsg.). (1999). *Annual report 1999*. Nijmegen: Max-Planck-Institut für Psycholinguistik.
- Gelman, S. A. (1996). Concepts and Theories. In R. Gelman & T. K.-F. Au (Hrsg.), *Perceptual and Cognitive Development* (S. 117-150). Academic Press.
- Gopnik, A., Meltzoff, A., & Kuhl, P. (1999). *How babies think: The science of childhood*. London: Weidenfeld & Nicolson.
- Grabowski, J. (1999). *Raumrelationen — Kognitive Auffassung und sprachlicher Ausdruck*. Wiesbaden: Westdeutscher Verlag.
- Gumperz, J., & Levinson, S. C. (1996a). Introduction: linguistic relativity re-examined. In J. Gumperz & S. C. Levinson (Hrsg.), *Rethinking linguistic relativity* (S. 1-18). Cambridge University Press.

- Gumperz, J., & Levinson, S. C. (Hrsg.). (1996b). *Rethinking linguistic relativity*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Harnad, S. (1987). Psychophysical and cognitive aspects of categorical perception: A critical overview. In S. Harnad (Hrsg.), *Categorical perception* (S. 1–25). Cambridge: Cambridge University Press.
- Harnad, S. (1990). The Symbol Grounding Problem. *Physica D*(42), 335–346.
- Herrmann, T. (1990). Vor, hinter, rechts und links: das 6H-Modell. *Zeitschrift für Literaturwissenschaft und Linguistik*(78), 117–140.
- Herrmann, T., & Schweizer, K. (1998). *Sprechen über Raum - Sprachliches Lokalisieren und seine kognitiven Grundlagen*. Bern: Verlag Hans Huber.
- Herzog, G., Blocher, A., Gapp, K.-P., Stopp, E., & Wahlster, W. (1996). VITRA: Verbalisierung visueller Information. *Informatik Forschung und Entwicklung*, 11(1), 12–19.
- Hickmann, M. (2000). Linguistic relativity and linguistic determinism: some new directions. *Linguistics*, 38(2), 409–434.
- Hofstadter, D. R., & Mitchell, M. (1994). The Copycat Project: A Model of Mental Fluidity and Analogy-Making. In K. J. Holyoak & J. A. Barnden (Hrsg.), *Advances in Connectionist and Neural Computation Theory, Vol. 2: Analogical Connections*. Norwood, N. J.: Ablex Publishing Corporation.
- Howard, I. P. (1973). Orientation and motion in space. In E. C. Cartarette & M. Friedman (Hrsg.), *Handbook of Perception, Vol. II: Biology of Perceptual Systems* (S. 291–315). New York: Academic Press.
- Howard, I. P. (1982). *Human Visual Orientation*. Chichester, New York, Brisbane, Toronto: John Wiley & Sons.
- Humboldt, W. von. (1968 [1836]). *Über die Verschiedenheit des menschlichen Sprachbaues und ihren Einfluß auf die geistige Entwicklung des Menschengeschlechts*. Bonn: Dümmler.
- Jackendoff, R. (1990). *Semantic Structures*. MIT Press.
- Jackendoff, R. (1999 [1989]). What Is a Concept, That a Person May Grasp It? In E. Margolis & S. Laurence (Hrsg.), *Concepts: core readings* (S. 305–333). Cambridge, M.A.: MIT Press. (originally appeared in: *Mind and Language* 4, 1989)
- Jones, S. S., & Smith, L. B. (1993). The Place of Perception in Children's Concepts. *Cognitive Development*(8), 113–139.

- Kanerva, P. (1988). *Sparse Distributed Memory*. Cambridge, M.A.: MIT Press.
- Keil, F. C. (1989). *Concepts, kinds, and cognitive development*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Keil, F. C. (1991). The emergence of theoretical beliefs as constraints on concepts. In S. Carey & R. Gelman (Hrsg.), *The epigenesis of mind: Essays on biology and cognition*. Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- Kita, S., & Dickey, L. W. (Hrsg.). (1998). *Annual report 1998*. Nijmegen: Max-Planck-Institut für Psycholinguistik.
- Klinke, R. (1985). Physiologie des Gleichgewichtssinnes, des Hörens und des Sprechens. In R. F. Schmidt & G. Thews (Hrsg.), *Physiologie des Menschen* (S. 300–327). Berlin: Springer.
- Lakoff, G. (1987). Cognitive models and prototype theory. In U. Neisser (Hrsg.), *Concepts and conceptual development: Ecological and intellectual factors in categorization* (S. 63–100). Cambridge University Press.
- Lakoff, G. (1999 [1987]). Cognitive models and prototype theory. In E. Margolis & S. Laurence (Hrsg.), *Concepts: core readings* (S. 391–421). Cambridge, M.A.: MIT Press. (originally appeared in: U. Neisser (Hrsg.) *Concepts and Conceptual Development*, 1987, Cambridge University Press)
- Langacker, R. W. (1987). *Foundations of cognitive grammar. vol. 1: Theoretical prerequisites*. Stanford: Stanford University Press.
- Langacker, R. W. (1991). *Concept, image, and symbol. the cognitive basis of grammar*. Berlin, New York: Mouton de Gruyter.
- Laurence, S., & Margolis, E. (1999). Concepts and Cognitive Science. In E. Margolis & S. Laurence (Hrsg.), *Concepts: core readings* (S. 3–81). Cambridge: MIT Press.
- Lee, D. N. (1974). Visual information during locomotion. In R. B. MacLeod & J. H. L. Pick (Hrsg.), *Perception: essays in honor of J. J. Gibson* (S. 250–267). Ithaca: Cornell University Press.
- Lee, D. N., & Aronson, E. (1974). Visual proprioceptive control of standing in human infants. *Perception and Psychophysics*, 15, 529–532.
- León, L. de. (1994). Exploration in the acquisition of geocentric location by Tzotzil children. *Linguistics*, 32, 857–884.
- Levelt, W. J. M. (1982b). Cognitive styles in the use of spatial direction terms. In R. J. Jarella & W. Klein (Hrsg.), *Speech, place, and action: studies in deixis and related topics* (S. 251–266). New York: Wiley and Sons.

- Levinson, S. C. (1996a). Frames of Reference and Molyneux's Question: Crosslinguistic Evidence. In P. Bloom, M. A. Peterson, & L. Nadel (Hrsg.), *Language and Space* (S. S. 109-169). Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Levinson, S. C. (1996b). Introduction to Part II - Universals and Variation in Language and Culture. In J. J. Gumperz & S. C. Levinson (Hrsg.), *Rethinking linguistic relativity* (S. 133-144). Cambridge: Cambridge University Press.
- Levinson, S. C. (1996c). Relativity in Spatial Conception and Description. In J. J. Gumperz & S. C. Levinson (Hrsg.), *Rethinking linguistic relativity* (S. 177-202). Cambridge University Press.
- Levinson, S. C. (1997). From outer to inner space: linguistic categories and non-linguistic thinking. In J. Nuyts & E. Pederson (Hrsg.), *Language and conceptualization* (S. 13-45). Cambridge University Press.
- Levinson, S. C. (2001). Covariation between spatial language and cognition, and its implications for language learning. In M. Bowerman & S. C. Levinson (Hrsg.), *Language acquisition and conceptual development* (S. 566-588). Cambridge: Cambridge University Press.
- Lokutor. (2001). <http://coli.lili.uni-bielefeld.de/lokutor/index.shtml>.
- Lucy, J. A. (1992). *Grammatical categories and cognition : a case study of the linguistic relativity hypothesis*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Lucy, J. A., & Gaskins, S. (2001). Grammatical categories and the development of classification preferences: a comparative approach. In M. Bowerman & S. C. Levinson (Hrsg.), *Language acquisition and conceptual development* (S. 257-283). Cambridge: Cambridge University Press.
- Maaß, W. (1995). *How Spatial Information Connects Visual Perception and Natural Language Generation in Dynamic Environments: Towards a Computational Model* (Tech. Rep. Nr. 116). Saarbrücken: Sonderforschungsbereich 314, Projekt VITRA, Universität des Saarlandes.
- Maaß, W., Baus, J., & Paul, J. (1995). *Visual Grounding of Route Descriptions in Dynamic Environments* (Tech. Rep. Nr. 117). Saarbrücken: Sonderforschungsbereich 314, Projekt VITRA, Universität des Saarlandes.
- Madole, K. L., & Oakes, L. M. (1999). Making Sense of Infant Categorization: Stable Processes and Changing Representations. *Developmental Review*, 19, 263-296.
- Mandler, J. M. (1992). How to Build a Baby: II. Conceptual Primitives. *Psychological Review*, 99(4), 587-604.

- Mandler, J. M. (1996). Preverbal Representation and Language. In L. N. P. Bloom, M. A. Peterson (Hrsg.), *Language and Space* (S. 365-384). MIT Press.
- Mandler, J. M. (2000). Perceptual and Conceptual Processes in Infancy. *Journal of Cognition and Development*, 1, 3-36.
- Margolis, E., & Laurence, S. (Hrsg.). (1999). *Concepts: core readings*. Cambridge: MIT Press.
- Marr, D. (1982). *Vision*. San Francisco: Freeman.
- Milde, J.-T., & Ahlers, T. (1999). The Communicative Agent Lokutor. In I. Wachsmuth & B. Jung (Hrsg.), *KogWis99* (S. 300-301). Bonn: infix.
- Miller, G. A., & Johnson-Laird, P. N. (1976). *Language and Perception*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Millikan, R. G. (1998). A common structure for concepts of individuals, stuffs, and real kinds: More Mama, more milk, and more mouse. *Behavioral and brain sciences*, 21, 55-100.
- Mind & Language 4. (1989). *Special Issue: What is A Concept?* Oxford: Basil Blackwell.
- Minsky, M. (1975). A framework for representing knowledge. In P. Winston (Hrsg.), *The Psychology of Computer Vision* (S. 211-277). New York: McGraw-Hill.
- Olson, G. M., & Laxar, K. (1973). Asymmetries in processing the terms right and left. *Journal of Experimental Psychology*, 100, 284-290.
- Osherson, D. N., & Smith, E. E. (1999 [1981]). On the Adequacy of Prototype Theory as a Theory of Concepts. In E. Margolis & S. Laurence (Hrsg.), *Concepts: core readings* (S. 261-278). Cambridge: MIT Press. (originally appeared in *Cognition* 9, 1981)
- Quine, W. V. O. (1960). *Word and Object*. Cambridge, Ma.: MIT Press.
- Ramamurthy, U., Franklin, S., & Negatu, A. (1998). Learning Concepts in Software Agents. In *From Animals to Animats IV — Proceedings of the 5th International Conference of the Society for Adaptive Behavior (SAB98)*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Regier, T. (1995). A Model of the Human Capacity for Categorizing Spatial Relations. *Cognitive Linguistics*, 6(1), 63-88.

- Regier, T. (1996). *The Human Semantic Potential - Spatial Language and Constrained Connectionism*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Regier, T. (1997). Constraints on the learning of spatial terms: A computational investigation. In R. L. Goldstone, D. L. Medin, & P. G. Schyns (Hrsg.), *Perceptual learning* (S. 171-217). Academic Press.
- Regier, T., & Carlson, L. (im Druck). Grounding spatial language in perception: An empirical and computational investigation. *Journal of Experimental Psychology*.
- Rehm, M. (1998). *Entwurf eines Systems zur Versprachlichung der Handlungssequenzen eines teilautonomen Roboters*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Fakultät für Linguistik und Literaturwissenschaft, Technische Fakultät, Universität Bielefeld.
- Rehm, M. (1999). Sprachgenerierung auf der Grundlage konzeptueller Strukturen. In J. Gippert & P. Olivier (Hrsg.), *Multilinguale Corpora – Codierung Strukturierung, Analyse* (S. 282–291). Prag: enigma.
- Rehm, M., & Goecke, K. U. (2000). Perception, Concepts and Language: RoAD and IPaGe. In *Proceedings of the 18th International Conference on Computational Linguistics* (S. 1091–1095). Morgan Kaufman Publishers.
- Rips, L. J. (1975). Inductive judgments about natural categories. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 14, 665–681.
- Rosch, E. (1999 [1978]). Principles of Categorization. In E. Margolis & S. Lawrence (Hrsg.), *Concepts: core readings* (S. 189–206). Cambridge, M.A.: MIT Press. (originally appeared in E. Rosch und B. Lloyd (Hrsg.) *Cognition and Categorization*, 1978, Lawrence Erlbaum Associates)
- Rosser, R. (1994). *Cognitive Development - Psychological and Biological Perspectives*. Allyn and Bacon.
- Roy, D., & Pentland, A. (1998a). Learning words from natural audio-visual input. In *Int. Conference on Spoken Language Processing, Vol. 4*. Sydney, Australien.
- Roy, D., & Pentland, A. (1998b). World learning in a multimodal environment. In *ICASSP*. Seattle, WA.
- Roy, D., & Pentland, A. (1998c). *Multimodal Adaptive Interfaces - Vision and Modeling* (Tech. Rep. Nr. 438). MIT, Media Lab.
- Ruiter, J. P. de, & Wilkins, D. (Hrsg.). (1996). *Annual report 1996*. Nijmegen: Max-Planck-Institut für Psycholinguistik.

- Schank, R. C. (1972). Conceptual Dependency: A Theory of Natural Language Understanding. *Cognitive Psychology*, 3, 552-631.
- Schyns, P. G., & Rodet, L. (1997). Categorization Creates Functional Features. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 23(3), 681-696.
- Senft, G. (1994). Ein Vorschlag, wie man standardisiert Daten zum Thema "Sprache, Kognition und Konzepte des Raumes" in verschiedenen Kulturen erheben kann. *Linguistische Berichte*(154), 413-429.
- Senft, G. (1995). Sprache, Kognition und Konzepte des Raumes in verschiedenen Kulturen. *Kognitionswissenschaft*(4), 166-170.
- Senft, G., & Smits, R. (Hrsg.). (2000). *Annual report 2000*. Nijmegen: Max-Planck-Institut für Psycholinguistik.
- Siskind, J. M. (1995). Grounding Language in Perception. *Artificial Intelligence Review*(8), 371-391.
- Siskind, J. M. (1996). A computational study of cross-situational techniques for learning word-to-meaning mappings. *Cognition*(61), 39-91.
- Skarda, C. A., & Freeman, W. J. (1987). How brains make chaos in order to make sense of the world. *Behavioral and Brain Sciences*, 10, 161-195.
- Smith, L. B., & Jones, S. S. (1993). Cognition Without Concepts. *Cognitive Development*(8), 181-188.
- Smith, L. B., & Katz, D. B. (1996). Activity-Dependent Processes in Perceptual and Cognitive Development. In R. Gelman & T. K.-F. Au (Hrsg.), *Perceptual and Cognitive Development* (S. 413-445). Academic Press.
- Steels, L. (1995). Building Agents out of Autonomous Behavior Systems. In L. Steels & R. Brooks (Hrsg.), *The Artificial Life Route to Artificial Intelligence: Building Embodied, Situated Agents* (S. 83-121). Hillsdale and Hove: Lawrence Erlbaum Associates.
- Steels, L. (1996a). Perceptually grounded meaning creation. In M. Tokoro (Hrsg.), *Proceedings of the International Conference on Multi-Agent Systems* (S. 338-344). AAAI Press.
- Steels, L. (1996b). Emergent Adaptive Lexicons. In P. Maes (Hrsg.), *From Animals to Animats 4: Proceedings of the 4th International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*. Cambridge MA: MIT Press.

- Steels, L. (1997). The Origins of Syntax in Visually Grounded Robotic Agents. In *International Joint Conference of Artificial Intelligence* (S. 1632–1641).
- Steels, L. (1999). *The Talking Heads Experiment*. Special pre-edition for LABORATORIUM, Antwerpen.
- Steels, L. (2000). A Brain for Language. In *The ecological brain*. Sony CSL-Paris 2000 Symposium.
- Steels, L., & Brooks, R. (Hrsg.). (1995). *The Artificial Life Route to Artificial Intelligence: Building Embodied, Situated Agents*. Hillsdale and Hove: Lawrence Erlbaum Associates.
- Steels, L., & Kaplan, F. (1999). Bootstrapping Grounded Word Semantics. In T. Briscoe (Hrsg.), *Linguistic evolution through language acquisition: formal and computational models*. Cambridge University Press.
- Steels, L., & McIntyre, A. (1998). Spatially distributed naming games. *Advances in Complex Systems*, 1(4), 301–324.
- Steels, L., & Vogt, P. (1997). Grounding adaptive language games in robotic agents. In P. Husbands & I. Harvey (Hrsg.), *Fourth European Conference on Artificial Life*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Talmy, L. (1983). How language structures space. In H. Pick & L. Acredolo (Hrsg.), *Spatial orientation: Theory, research, and application*. New York: Plenum Press.
- Talmy, L. (1991). Paths to Realization: A Typology of Event Conflation. In *Proceedings of the Seventeenth Meeting of the Berkeley Linguistics Society* (S. 480–519).
- Thelen, E., & Smith, L. B. (1994). *A Dynamic Systems Approach to the Development of Cognition and Action*. MIT Press.
- Tversky, B. (1991). Spatial mental models. *The psychology of learning and motivation*, 27, 109–145.
- Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (1991). *The Embodied Mind*. Cambridge, M.A.: MIT Press.
- Vater, H. (1996). Textuelle Funktionen von Tempora. In G. Harras & M. Bierwisch (Hrsg.), *Wenn die Semantik arbeitet (Klaus Baumgärtner zum 65. Geburtstag)* (S. 237–255). Tübingen: Niemeyer.
- Waßner, U. H. (1999). Geschlossene Klassen? In 34. *Linguistisches Kolloquium*. Germersheim.

- Whorf, B. L. (1956). *Language, Thought and Reality*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Wilson, R. A., & Keil, F. C. (Hrsg.). (1999). *The MIT encyclopedia of the cognitive sciences*. Bradford Books.
- Winer, B. J. (1971). *Statistical principles in experimental design*. New York, u.a.: McGraw Hill.
- Wittgenstein, L. (1953). *Philosophical investigations*. Oxford: Blackwell.
- Zadeh, L. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8, 338–353.
- Zeki, S. M. (1993). *A Vision of the Brain*. Blackwell Publishers.