

Günter Kochendorfer

Studien zum Spracherwerb in neuronalen Modellen

3. 8. 2002

<http://www.cortical-linguistics.de>

Redaktion: Ines Groh

Kochendörfer, Günter (2002) *Studien zum Spracherwerb in neuronalen Modellen*. Im Internet unter: <http://www.cortical-linguistics.de>

Inhalt

Vorwort	7
1 Grundlagen	11
1.1 Das Gehirn kommt in der aktuellen Spracherwerbsforschung nicht vor	
1.2 Wissenschaftstheorie	
1.3 Neurobiologie und Simulationstechnik	
2 Repräsentation und Erwerb von Konzepten	29
2.1 Kontinuität des lokalistischen Verarbeitungsprinzips	
2.2 Das Frequenzargument	
2.3 Die Bildung von Instanzen	
2.4 Verlauf der Konzeptbildung	
2.5 Prototypizität	
2.6 Vorstellungen	
2.7 Relationale Konzepte	
2.8 Redundanz und Chaos	
3 Wahrnehmung und Produktion von Sprachlauten, die Bedeutung der Lallphase im Spracherwerb	67
3.1 Verarbeitungsstrukturen auf der Ebene einzelner Sprachlaute (Perzeption)	
3.2 Lernen von Phonemen (Perzeption)	

4	STUDIEN ZUM SPRACHERWERB IN NEURONALEN MODELLEN	
	3.3 Strukturelle Voraussetzungen der Produktion von Sprachlauten, die Rolle der Lallphase	
	3.4 Der Vorgang des „Übens“	
	3.5 Das Fis-Phänomen, Umlern-Probleme	
	3.6 Diskussion konkurrierender Phonologie- Konzeptionen	
4	Erwerb und Revision lexikalischer Strukturen	89
	4.1 Was gelernt werden muß	
	4.2 Ausdrucksseiten	
	4.3 Phonologische Länge	
	4.4 Inhaltsseiten, Mehrdeutigkeit	
	4.5 Exkurs: Aufbau von Begriffshierarchien	
	4.6 Produktion	
	4.7 Revision lexikalischer Strukturen	
5	Allgemeine Überlegungen zum Erwerb der Syntax	123
	5.1 Das „Bootstrapping“-Problem	
	5.2 Die Zielstruktur des Erwerbsprozesses	
	5.3 Syntaktische Längen	
6	Einwortsätze und Zweiwortsätze	137
	6.1 Das Wortartenproblem	
	6.2 Vom Wort zum Satz	
	6.3 Vom Einwortsatz zum Zweiwortsatz	
	6.4 Nominalphrase und Verbalphrase, Erweiterung der Verbalphrase	
7	Morphologische Segmentierung und Funktion der Morphologie, das Silbenproblem	155
	7.1 Morpheme und Silben als (sub-)lexikalische Einheiten	
	7.2 Lernprobleme	
	7.3 Morphologische Segmentierung	

INHALT	5
7.4 Das morphologische Lexikon	
7.5 Diskussion	
8 Sprache und Denken	173
8.1 Sprache des Denkens	
8.2 Sprechen und Denken	
8.3 Sprachliches Relativitätsprinzip und Spracherwerb	
9 Sprachliche Universalien, Universalgrammatik	183
9.1 Elementare universelle Eigenschaften natürlicher Sprachen	
9.2 Sprache ohne Semantik	
9.3 Formen der „Kreativität“	
9.4 Spracherwerb ohne „angeborene Ideen“	
Anhang: Das Simulationsprogramm	193
A1 Systemvoraussetzungen	
A2 Aufruf und Schließen	
A3 Netzdefinition	
A4 Eingabe äußerer Ereignisse	
A5 Simulationsverlauf und Ergebnisse	
Literatur	203
Index	211

Vorwort

Manchmal sind es nicht so sehr die Inhaltsverzeichnisse, die verschiedene Bücher zu einem bestimmten Thema voneinander unterscheiden, sondern eher die sich dahinter verbergenden Inhalte selbst. Das Inhaltsverzeichnis des vorliegenden Bandes ist kaum auffällig, wenn man es mit der aktuellen Spracherwerbsliteratur vergleicht. Die Inhalte selbst sind dagegen radikal verändert. Das zeigt sich schon oberflächlich an der äußeren Form, z. B. der großen Zahl graphischer Darstellungen, die nicht Bildmaterial aus psycholinguistischen Tests, Tabellen usw. sind.

Das inhaltliche Charakteristikum der hier vorgelegten Untersuchungen ist die kompromißlose Einbeziehung des Gehirns in die Behandlung der Spracherwerbsphänomene. Obwohl eigentlich klar sein müßte, daß es hauptsächlich mentale Phänomene sind, die den Spracherwerb ausmachen, ist es, wie der Vergleich mit der existierenden Literatur zeigt, immer noch ein gewagtes Unternehmen, sich auf das Gehirn als physikalische Größe zu beziehen. Wenn in der Neuropsychologie bzw. der Neurolinguistik vom Gehirn gesprochen wird, so ist das über Verhaltensexperimente vermittelt, und neuronale Strukturen haben einen nur sehr geringen Einfluß auf die theoretischen Konzepte.

Der Grund hierfür liegt zum Teil an hinderlichen Fachtraditionen, und zwar nicht nur in der Linguistik und Psychologie, sondern auch in der Biologie und Medizin. Es ist aber auch eine besondere wissenschaftstheoretische Fundierung erforderlich, die eine verlässliche Arbeit auf dem „unübersichtlichen“ Terrain neuronaler Strukturen erst möglich macht. Das zentrale Stichwort heißt „Modellbildung“, das allerdings in einem gegenüber herrschenden Vorstellungen wesentlich verschärften Sinn gebraucht werden muß. Außerdem ist eine wesentliche Voraussetzung die Verfügbarkeit technischer Mittel, hier das Vorhandensein entsprechender

Hardware und Software zur Realisierung der Modelle als Computersimulationen. Man darf nicht vergessen, daß entsprechende Bedingungen noch vor zwei Jahrzehnten nicht gegeben waren.

Die in diesem Buch verfolgte Forschungsstrategie besteht in dem schrittweisen Versuch, Elemente, die den Status des Faktischen haben oder zugeschrieben bekommen, unter Zuhilfenahme hypothetischer Ergänzungen in ein funktionierendes Ganzes zu integrieren.

T. S. Kuhn beobachtet, daß Lehrbücher im naturwissenschaftlichen Bereich gerne so aufgebaut sind, daß der Gang der Forschung als systematische Entwicklung auf die derzeit geltenden Theorien hin erscheint. „Die Versuchung, die Geschichte rückwärts zu schreiben, ist allgegenwärtig und dauerhaft.“ (Kuhn, 1999: 149) Das gilt auch von dem hier vorliegenden Buch (das sich allerdings nicht als Lehrbuch versteht). Der mühselige und mäandrierende Weg der Entwicklung der dargestellten Ideen, gerade auch der zeitweise durch einen Versuchs-Irrtums-Prozeß gefundenen Simulationsmodelle, wird verschleiert. Andererseits wird aber durch eine solche Darstellung auch der Nachweis erbracht, daß ein „logisches“ Verständnis der Zusammenhänge möglich ist.

„Logische“ Geschlossenheit kann nicht meinen, daß alle Welträtsel gelöst werden. Die Lücken sind unübersehbar (und sie liegen teilweise in Bereichen, die von konkurrierenden Ansätzen bewältigt werden). Impliziert ist aber die Behauptung, daß solche Lücken prinzipiell, ohne Gefährdung des Gesamtbauwerks, überbrückbar sind.

Da das hauptsächlich verwendete Argumentationsinstrument Modelle in Form von Computersimulationen sind, die natürlich in einer rein beschreibenden Version nur schwer nachvollzogen werden können, war es naheliegend, die Simulationen über Links in den Text einzubeziehen, so daß am Bildschirm während der Textlektüre gleich die Veranschaulichung des Simulationsverlaufs abgerufen werden kann.

Insgesamt ist ein konstruktives Verhalten des Lesers vorausgesetzt: eher aktives Nachvollziehen als passive Zurkenntnisnahme. Veränderungen der Simulationen und Konstruktion eigener Modelle sind möglich, das Simulationsprogramm ist beigefügt, die Steuerdateien sind offen zugängliche Textdateien.

Technische Hinweise

Systemvoraussetzungen: Windows-Betriebssystem ab Windows 95 und ein Acrobat Reader ab Version 5.0. Es empfiehlt sich, im Reader die Optionen „Text glätten“ und „Bilder glätten“ einzustellen.

Die Simulationen werden durch Klick auf die Schaltfläche „Simulation bis Stop“ oder durch Betätigen bzw. Festhalten der Leertaste (letzteres ist in den meisten Fällen zu empfehlen) gesteuert. Genauere Informationen über die Funktion des Simulationsprogramms finden sich im Anhang.

Probleme, Kommentare gerne über E-Mail unter der Adresse

`kochendo@biomod.de`

Websites:

<http://www.biomod.de>

<http://www.cortical-linguistics.de>

Freiburg, im August 2002

Günter Kochendörfer

1 Grundlagen

1.1 Das Gehirn kommt in der aktuellen Spracherwerbsforschung nicht vor

Im Zentrum des Interesses bei der linguistischen Behandlung des Erstspracherwerbs steht immer noch die Beschreibung des beobachtbaren Sprachverhaltens von Kindern. In der jüngeren Vergangenheit sind allerdings wesentliche Erfolge erzielt worden bei der Entwicklung experimenteller Verfahren, die den Bereich des Beobachtbaren zu erweitern erlauben (Herzschlagratenmessung, Saugrate, konditionierte Kopfbewegungen, Messung der Fixationszeit; vgl. Hennon, Hirsh-Pasek & Golinkoff, 2000). Das hat dazu geführt, daß bestimmte kognitive Leistungen insgesamt zu früheren Zeitpunkten der kindlichen Entwicklung erkennbar werden, als in älteren Arbeiten angenommen worden ist. Damit hat sich aber nicht der grundsätzliche Forschungsstil verändert. Man stellt nach wie vor fest, daß Kinder in bestimmten Stadien der Entwicklung Äußerungen einer bestimmten Art produzieren oder verstehen können oder daß bestimmte, prinzipiell mögliche oder bei Erwachsenen vorkommende Äußerungstypen fehlen. Es werden Versuche unternommen, sich vorzustellen, wie ein entsprechender Zustand der sprachlichen Kompetenz beim Kind aussehen könnte, wobei auf existierende sprachtheoretische Konzepte Bezug genommen wird. Vor allem in psychologischen Arbeiten geht es um eine Parallelisierung von sprachlicher und kognitiver Entwicklung, das heißt, das Stadium der kognitiven Entwicklung begründet die dem Kind zur Verfügung stehenden sprachlichen Möglichkeiten.

Eine bei genauerem Hinsehen deutlich unterschiedene Herangehensweise kommt von den Problemen her, die sich aus bestimmten sprachtheore-

tischen Vorstellungen, nämlich denen der generativen Sprachtheorie, für das Verständnis des Spracherwerbs ergeben. Es wird nach der prinzipiellen Lernbarkeit der sprachlichen Kompetenz gefragt (das „logische Problem des Spracherwerbs“). Das hat zur Konsequenz, daß psycholinguistische Untersuchungen eher zweitrangig sind und daß sich auch das sprachliche Material, das vorzugsweise behandelt wird, verändert: Es sind nicht so sehr einfache kindersprachliche Ausdrücke aus den frühen Stadien der Sprachentwicklung (Beispiel: Zweiwortsätze), sondern eher spätere Konstruktionen, die der Erwachsenensprache nahe stehen (Beispiel: das Problem des Nullsubjekt-Parameters).

Für beide Herangehensweisen gilt, daß sie in der Regel auf linguistische und psychologische Beschreibungsmittel bzw. Konstrukte zurückgreifen, die außerhalb der Spracherwerbsforschung definiert sind. Es fällt auf, daß ganz unterschiedliche Beschreibungsmittel offenbar gegeneinander austauschbar sind und daß selbst innerhalb eines Paradigmas, wie es die generative Sprachtheorie darstellt, die Variabilität enorm ist. Das ist einerseits auf die prinzipiell immer noch sehr schwankende Stabilität der linguistischen Theoriebildung zurückzuführen, andererseits aber auch auf die Auffassung, daß strukturelle Details Sache der „Implementierung“ seien, so daß keine besonderen Anstrengungen bezüglich ihrer Abklärung für nötig gehalten werden.

Das Gehirn wird als Ort des Geschehens akzeptiert (auch schon bei Ferdinand de Saussure), ist aber sonst nicht *strukturell* involviert. Aussagen über die im Gehirn lokalisierten geistigen Phänomene gelten trotzdem als möglich, und mentalistische oder moderner: kognitionswissenschaftliche Behandlung setzt nicht voraus, daß strukturelle Eigenschaften des Gehirns beachtet werden.

Die Konsequenzen sind alles andere als banal. Der Vergleich der Abbildung 1.1–1 mag helfen, das weiter zu beleuchten: Wenn eine kindliche Äußerung in der üblichen phonologischen Notation festgehalten wird, kann durchaus behauptet werden, daß eine irgendwie geartete Charakterisierung der Kompetenz des Kindes vorliegt. Aber kann man das Notierte dem Gehirn des Kindes in einem buchstäblicheren Sinne, nämlich als Struktur einer mentalen Realität im physikalischen Sinne zuschreiben? Beim Beispiel des Objekts im freien Fall wird man nicht auf die Idee kommen, die Formel, die das Anwachsen der Geschwindigkeit beschreibt, in das fallende Objekt selbst hineinzuverlegen. Für physikalische Anwendungen mag das kein besonderes Problem darstellen. Was ist aber für die

Erklärung des Spracherwerbs mit der phonologischen Notation gewonnen, wenn ihr Verhältnis zu den neuronalen Realitäten ganz unbestimmt bleibt?

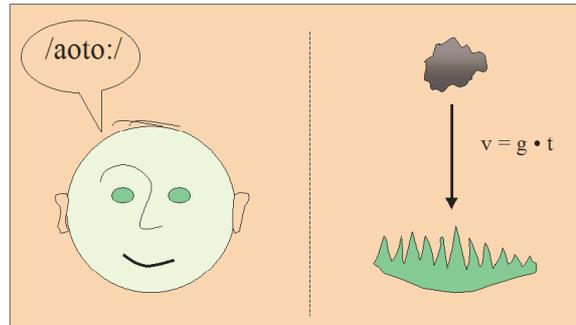


Abbildung 1.1-1: Beispiel zur strukturellen Gültigkeit von Beschreibungen. Die Geschwindigkeit eines Objekts im freien Fall kann nach der Formel $v = g \cdot t$ beschrieben werden, diese Formel besagt aber nichts bezüglich der Eigenschaften des Objekts, die dieses Verhalten hervorbringen, die Formel und ihre Struktur können dem Objekt nicht zugeschrieben werden. Wenn die Äußerung eines Kindes phonologisch notiert wird, neigt man eher dazu, der Notation eine Geltung bezüglich zugrundeliegender mentaler Strukturen zuzugestehen.

Argumente dieser Art haben in der Auseinandersetzung über die Geltung der generativen Sprachtheorie öfter eine Rolle gespielt. Man vgl. Chomsky (1975: 166 f.) und die in Kochendörfer (1989: 12 ff.) referierte Diskussion. Auch Chomsky selbst kann man das Bewußtsein, daß da ein Problem besteht, nicht absprechen, wie das folgende Zitat zeigt (Chomsky, 1999: 41):

„We do not know now what are the physical mechanisms of the language faculty, the mechanisms that enter into the representation of knowledge of language and the processing of language. Therefore we must proceed much in the way that 19th-century chemists proceeded when they studied chemical elements, organic molecules, the molecular theory of gases, and so on, all at an abstract level, abstracting away from the unknown physical

mechanisms that exhibited the properties that they investigated. In the case of language, abstracting way[sic!] from unknown mechanisms, we assume that the language faculty has an initial state, genetically determined, common to the species apart from gross pathology, and apparently unique to the human species.“

Auffallend ist, daß hier die in früheren Arbeiten von Chomsky (z. B. Chomsky, 1965 und 1980) durchaus benutzte Unterscheidung von Struktur und physikalischer Grundlage verwischt ist und zugestanden wird, daß es eigentlich sinnvoll wäre, sich primär mit der physikalischen Grundlage zu beschäftigen, wenn das nicht durch den Stand der biologischen Forschung verunmöglicht würde.

Vor diesem Hintergrund ist es nicht besonders verwunderlich, daß die physikalische Grundlage, also z. B. das Gehirn im biologischen Sinn, in der Spracherwerbsforschung bestenfalls eine sehr untergeordnete Rolle spielt. Wenn man sich in den aktuellen Überblicksdarstellungen zu orientieren versucht, dann stellt man fest, daß in Grimm (2000 Hg.), bei einem Umfang von ca. 700 Seiten, das Gehirn nur auf 16 Seiten vorkommt, und zwar im Zusammenhang mit der Behandlung kindlicher Aphasien und bei einem Überblick über die Versuche, ereigniskorrelierte Potentiale bei der Untersuchung des Spracherwerbs heranzuziehen. Bei den ebenfalls ca. 700 Seiten von Ritchie & Bhatia (1999 eds.) fehlt die Thematik Gehirn ganz, nur wenn man den konnektionistischen Modellen eine Nähe zum Gehirn zugesteht, ist wenigstens eine halbe Seite – im wesentlichen mit Literaturverweisen – zu veranschlagen.

Die konnektionistischen Modelle sind wegen ihrer Lernfähigkeit verständlicherweise auch in der Spracherwerbsforschung, wie anderswo in Psychologie und Linguistik, Hoffnungsträger, was die Annäherung an das Gehirn betrifft (vgl. Broeder & Murre, 2000 eds.). Man sollte aber beachten, daß die einzelnen Einheiten konnektionistischer Modelle, die „künstlichen Neuronen“, nur in der Tatsache ihrer netzförmigen Verschaltung (viele Eingänge, ein Ausgang) und in der relativen Primitivität ihrer Leistung (verglichen mit der Leistung eines technischen Prozessors) an der Biologie orientiert sind, nicht aber in den Details des Verhaltens in der Zeit. Auch die Gesamtarchitektur der verwendeten Netze und vor allem die verwendeten Lernprozeduren sind ganz offenbar und bekanntermaßen unbiologisch und widersprechen den Verhaltensbeobachtungen (vgl. z. B. Sharkey, Sharkey & Jackson, 2000). Das letztere muß, wenn

es um Spracherwerb geht, besonders betont werden, denn hier sollten ja gerade Lernprozesse gültig modelliert werden. Daß die konnektionistischen Modelle dennoch eine so große Rolle spielen, ist nur verständlich, wenn man berücksichtigt, daß es immer noch möglich ist, „Modelle“ ausschließlich an ihrer Prognoseleistung zu messen, das heißt an der Übereinstimmung ihres Verhaltens mit den Ergebnissen von Experimenten und Beobachtungen in dem modellierten Realitätsbereich. Unter wissenschaftstheoretischen Voraussetzungen, wie sie unten in Abschnitt 1.2 entwickelt werden, können konnektionistische Modelle des üblichen Paradigmas als prinzipiell unhaltbar abgelehnt werden. (Solange die Leitvorstellungen bei der Entwicklung „gepulster neuronaler Netze“ an den nicht-gepulsten Vorgängern orientiert sind, gilt diese Feststellung auch für diese moderne Variante; vgl. Maass & Bishop, 1999.)

Es ist klar, daß die interessantesten Phänomene des Spracherwerbs im Gehirn des Kindes lokalisiert sind. Ist es wirklich heute noch sinnvoll, das Gehirn in der Spracherwerbsforschung auszusparen? Bei Licht besehen sind die Feststellungen in dem Chomsky-Zitat oben nicht mehr ganz aktuell: Die Biologen wissen sehr viel über das Gehirn und über dessen Mechanismen, obwohl empfindliche Lücken zu verzeichnen sind, wenn es um den Bereich der Vernetzung der einzelnen Nervenzellen geht. Der Satz von Chomsky ist nur dann korrekt, wenn wir ihn so interpretieren, daß wir zwar viel über das Gehirn wissen, aber nicht wissen, wie mit diesen Bausteinen so etwas wie Sprache gewährleistet werden kann.

Der Schritt von den Bausteinen zur „komplexen“ Leistung ist tatsächlich dann naturgemäß schwierig, wenn man annimmt, daß diese Leistung sehr komplizierte Zusammensetzungen der Bausteine erfordert. In der Tat würden die im Generativismus üblichen Vorstellungen von sprachlicher Kompetenz, gerade in der „Rektions-Bindungs-Theorie“ und dem „Minimalistischen Programm“ sehr komplexe Strukturen erfordern – vorausgesetzt, daß sie korrekt sind. Die Gegenthese lautet: Die Sprache ist den Strukturen des Gehirns nahe. Die Bedingungen der Evolution lassen nichts anderes erwarten. Es ist ja doch banalerweise nicht so, daß die Sprache in der Entwicklungsgeschichte vorgegeben war und die Entwicklung des Gehirns eine Annäherung an die Sprache bedeutet hat, sondern umgekehrt: Die Strukturen des Gehirns (selbstverständlich mit einer gewissen Entwicklungsfähigkeit) müssen als vorgegeben betrachtet werden, Sprache muß auf der Basis und in enger Anpassung an diese vorgegebenen Strukturen entwickelt worden sein.

Unter dieser Voraussetzung ist es wenigstens nicht schon von vornherein aus Komplexitätsgründen unsinnig, den Versuch zu machen, die Sprachtheorie generell auf eine biologische Basis zu stellen; und es ist dann selbstverständlich, daß auch der Spracherwerbsprozeß biologisch fundiert werden muß und, ganz im Sinne Chomskys, zu einem Prüfstein für den Erklärungswert der Sprachtheorie wird.

Wissenschaftliche Konstrukte, die einen direkten *strukturellen* Bezug zu den behandelten Gegenständen haben, werden als Modelle (im wissenschaftstheoretischen Sinne) bezeichnet. Insofern ist es korrekt, die konnektionistischen Modelle als solche zu behandeln, obwohl, wie oben angedeutet, die Gültigkeit der konnektionistischen Modellstrukturen fragwürdig ist. Es liegt nahe, die Modellbildung konsequent als Mittel der Wahl für die Untersuchung und Darstellung einer biologisch fundierten Sprachtheorie und Spracherwerbtheorie einzusetzen, weil sie sozusagen selbstverständlich die geforderte strukturelle Fundierung gewährleistet. Trotzdem ist nicht zu erwarten, daß das Unternehmen sehr einfach sein wird. Im Gegenteil: biologisch adäquate Modelle auch sehr einfacher sprachverarbeitender Prozesse werden in jedem Fall so komplex werden, daß ihr Verhalten ohne technische Hilfsmittel nicht mehr überblickbar ist. Die Computersimulation ist, wie auch schon bei den klassischen konnektionistischen Modellen, unverzichtbares Werkzeug. Sie ist aber wertlos, wenn sie in der für konnektionistische Modelle typischen Unverbindlichkeit gehandhabt wird. Das Ziel muß sein, Simulationen in einer Form einzusetzen, die es erlaubt, sie wirklich so zu verwenden, wie man das theoretisch für Modelle erwartet: Der Sinn eines Modells ist es, daß es Manipulationen, Experimente, Beobachtungen erlaubt, die im Originalbereich nicht möglich sind. Zu den modellhaften Manipulationen und Experimenten gehören auch solche, die zum Aufbau eines Modells selbst führen. Der Effekt der Modellbildung kann dann auch sein, daß nicht nur existierende Beobachtungen nachgestellt werden, sondern daß, aus Zwängen heraus, die sich in der Modellbildung ergeben, neue Beobachtungen angeregt werden. Die forschungssteuernde Funktion der Modellbildung ist eine ganz entscheidende Komponente.

Es gibt viele Gesichtspunkte, die erwarten lassen, daß die Entwicklung biologisch adäquater Modelle speziell für die Spracherwerbsforschung wesentliche Fortschritte bringen wird. Man sollte die Perspektiven aber nicht zu sehr einengen: Wenn man der Meinung ist, daß die Erklärung des Spracherwerbs eine zentrale Rolle bei der Bewertung sprachtheoreti-

scher Konstrukte allgemein spielen muß, sind aus der Entwicklung realistischer Modelle des Spracherwerbs durchgreifende Konsequenzen für die Sprachtheorie insgesamt zu erwarten. Oder, noch viel allgemeiner: Der Versuch, biologische Erkenntnisse direkt mit Forschungsergebnissen aus Linguistik und Psychologie in Verbindung zu bringen, muß Rückwirkungen für alle beteiligten Fächer haben, eine ausreichende interdisziplinäre Offenheit und Diskussionsbereitschaft vorausgesetzt.

1.2 Wissenschaftstheorie

Eine weitverbreitete Auffassung über Modelle und Simulationen-als-Modelle ist, daß sie in einem gewissen Grad unvollkommen sein dürfen. Das gilt bei Simulationen vor allem für die statische Struktur, nicht so sehr für das Verhalten. Wenn also konnektionistische Modelle neuronal sein sollen (um das Beispiel des vorigen Abschnitts wieder aufzugreifen), dann gilt das mit gewissen Abstrichen. Solange nicht spezifiziert wird, wie weit die Abstriche gehen dürfen, kann ein konkretes Modell, wenn es angegriffen wird, immer damit verteidigt werden, daß es eben *nur ein Modell* sei, und konsequenterweise können dann Modelle mit einiger Phantasie ohne große Skrupel in die Welt gesetzt werden. Das ist natürlich, wenn man es sich einmal bewußt gemacht hat, eine höchst unbefriedigende Situation.

Im konkreten Fall von Modellen zu kognitiven Prozessen kann das dazu führen, daß Komponenten von Ergebnissen (bzw. erwarteten Ergebnissen) psychologischer Tests einfach direkt in Modellkomponenten umgesetzt werden. Es werden sozusagen Strukturen von Tests anstelle von mentalen Strukturen modelliert. Da das eine mit dem anderen zu tun hat, kann problemlos eine irgendwie geartete Beziehung behauptet werden.

Ein anderes, aber verwandtes Problem entsteht dann, wenn Modelle nur als „Leistungsmodelle“ bewertet werden. Leistungsmodelle sind Modelle, deren Struktur ungültig ist, das heißt, deren Struktur zur intendierten Aussage nicht beiträgt. Das Modell eines kognitiven Systems kann sich darauf beschränken, nur dessen äußeres Verhalten nachzustellen. Solange es nicht darauf ankommt zu zeigen, daß dies prinzipiell z. B. mit Computerhilfe möglich ist, beschränkt sich der Wert solcher Modelle auf den entsprechender Verhaltensbeschreibungen.

Besonders tückisch ist es, wenn der Leistungsmodellcharakter nicht offengelegt wird, sondern eine beliebige Ausdehnung der Interpretation als

„Funktionsmodell“, das heißt als Modell mit gültiger Struktur, zugelassen wird. Das ist häufig der Fall bei konnektionistischen Modellen. So bleibt es z. B. bei den für Spracherwerbsmodelle verwendeten rekurrenten Netzen (Abbildung 1.2–1; vgl. z. B. Elman et al., 1996, Dominey & Ramus, 2000) offen, inwieweit die Architektur tatsächlich strukturell ernstgemeint ist. Der zweifelhafte „neuronal“ Charakter dieser Modelle ist schon im vorigen Abschnitt angesprochen worden.

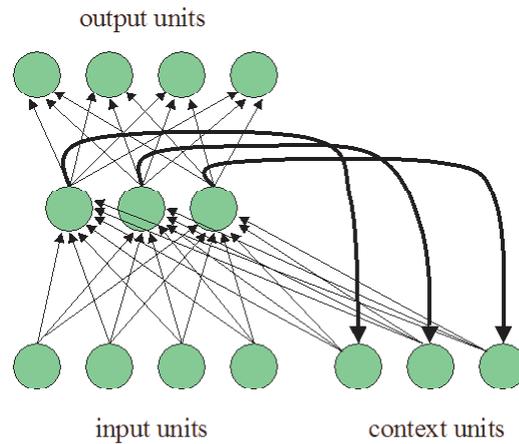


Abbildung 1.2–1: Typisches rekurrentes konnektionistisches Modell

Simulationen von Spracherwerbsprozessen mit Leistungsmodellcharakter sind sichtlich keine Hilfe bei der Herstellung struktureller Bezüge zwischen Spracherwerbtheorie und Gehirn. Dazu braucht es Funktionsmodelle, und zwar Modelle, deren strukturelle Gültigkeit ausreichend definiert und abgesichert ist. In vorangegangenen Publikationen (Kochendörfer, 1997 und 2000) ist zu diesem Zweck die „Präzisierungsforderung“ für Modelle eingeführt worden. Sie besagt:

Für jede Komponente eines korrekten Modells muß behauptet werden können,

- daß ein präzisiertes Modell denkbar ist, in dem es eine Struktur gibt, die dieser Komponente entspricht,
- ohne daß dieses präzisere Modell in Widerspruch zu akzeptierten Annahmen über die modellierte Realität gerät.

Die Abbildung 1.2-2 gibt eine schematische Veranschaulichung:

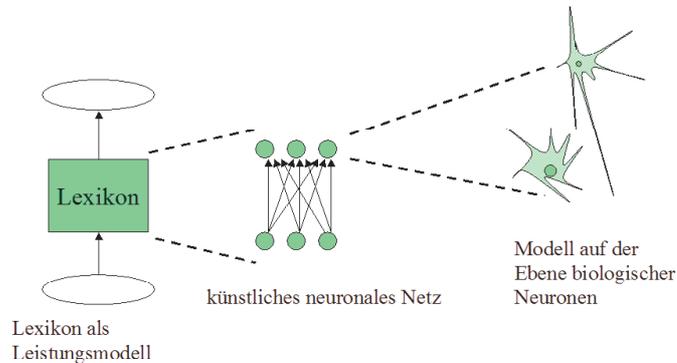


Abbildung 1.2-2: Die Präzisierungsforderung. Es soll nicht behauptet werden, daß die dargestellten Präzisierungen tatsächlich möglich sind.

Nur unter der Bedingung der Präzisierungsforderung ist es überhaupt denkbar, daß Strukturen eines Modells gültig sind. Man beachte, daß das präzisierte Modell nicht tatsächlich konstruiert zu werden braucht. Das Argument von Wexler (1999: 72) ist korrekt:

„It is sometimes said that growth/maturation theories do not have content or are vague because they do not specify the physical mechanism of maturation. But this point is invalid. To specify a theory of a phenomenon at one level, does not mean that the theory has to be specified at another level.“

Die „Theorie“ auf der realitätsnäheren Ebene braucht nicht konstruiert zu werden, sie muß nur als möglich erscheinen. Die Kritik, gegen die sich Wexler wendet, ist aber tendenziell nicht so gemeint, daß etwas nicht geleistet *ist*, sondern daß etwas wahrscheinlich nicht geleistet werden *kann*. Insofern muß das Zitat als ein Immunisierungsversuch gewertet werden, der einem durchaus gängigen Muster entspricht.

Die Präzisierungsforderung bedeutet die Aufhebung der oben angesprochenen Unterscheidung von „Struktur“ und „physikalischer Grundlage“. Sie besagt nicht, daß ein Modell auf einer bestimmten Abstraktionsebene angesiedelt werden muß, sondern stellt im Gegenteil die Wahl einer Abstraktionsebene ausdrücklich frei und sichert die Gültigkeit auch von Modellen, die einen hohen Abstraktionsgrad haben. Im Fall der Spracherwerbsproblematik ist abzusehen, daß aus Machbarkeitsgründen

auch sehr abstrakte Modelle eine Rolle spielen werden. In der gegenwärtigen Situation, wo es unter anderem darum geht, die Präzisierbarkeit bestimmter abstrakterer Konstrukte zu zeigen, ist allerdings die neuronale Ebene der Modellierung, wie in der vorliegenden Untersuchung gezeigt werden soll, besonders vorteilhaft.

1.3 Neurobiologie und Simulationstechnik

Eine Grundannahme für die Konstruktion der im folgenden verwendeten neuronalen Simulationsmodelle ist, daß es zur Erklärung von Strukturen und Prozessen des Spracherwerbs ausreicht, das einzelne biologische Neuron als Leistungsmodell wiederzugeben und die strukturelle Gültigkeit nur für die neuronalen Verschaltungen oberhalb der Zellebene zu behaupten. Das bedeutet, daß zwar die globale Charakteristik des Modellneurons biologisch realistisch ist, daß aber nicht strukturelle Details wie Ionenkanäle, Synapsenstrukturen, Ionenströme oder die äußere Form des Neurons modellhaft wiedergegeben werden. Das einzelne Neuron wird als atomar (punktförmig) betrachtet, und die Parameter, die es bestimmen, werden als verhaltensbeschreibende Eigenschaften interpretiert. Alle modellhaft gültigen Strukturen entstehen durch Verbindungen, die die einzelnen Neuronen miteinander eingehen. Eine schematische Darstellung des Modellneurons bringt die Abbildung 1.3–1.

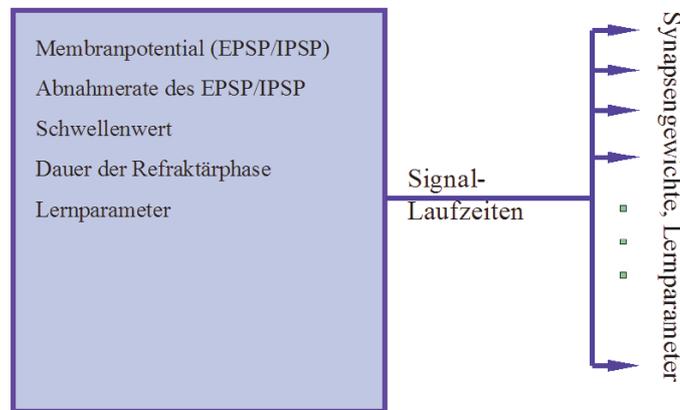


Abbildung 1.3–1: Die Spezifizierung des Modellneurons

Zu den einzelnen Parametern:

Das *Membranpotential* unterliegt, solange es nicht identisch ist mit dem Ruhepotential der Zelle, ständiger Veränderung. Es wird durch synaptischen Input erhöht oder erniedrigt und nähert sich, wenn kein synaptischer Input erfolgt, exponentiell dem Ruhepotential. Es ist in Simulationen üblich, das Ruhepotential mit 0 anzunehmen und die exzitatorischen und inhibitorischen postsynaptischen Potentiale (EPSPs und IPSPs) entsprechend zu normieren. Die Geschwindigkeit, mit der sich ein nicht durch Input verändertes Potential dem Ruhepotential nähert, ist zelltypisch und durch Lernprozesse nicht veränderbar und wird durch den Parameter *Abnahmerate des EPSP* beschrieben.

Ebenso zelltypisch und unveränderlich ist der Parameter *Schwellenwert*, der den Übergang eines EPSP in das Aktionspotential festlegt.

Der Parameter *Signallaufzeit* faßt mehrere biologisch unterscheidbare Zeitdauern zusammen. Man kann die Signallaufzeit verstehen als Zeitspanne zwischen der Spitze eines Aktionspotentials in der vorgeschalteten Zelle und der Spitze eines dadurch ausgelösten Aktionspotentials in der nachgeschalteten Zelle. Die Signallaufzeit ist also pro Verbindung, nicht pro (vorgeschalteter) Zelle zu definieren. Sie ist in der Simulation konstant, wird also durch die simulierten Lernprozesse ebenfalls nicht verändert. Mögliche Auswirkungen von Veränderungen der Myelinisierung sind ausgeklammert.

Da das Aktionspotential, also der Impuls, den eine Nervenzelle abgibt, ein Alles-oder-nichts-Signal ist, können die *Synapsengewichte* gleichgesetzt werden mit der Wirkung, die ein Aktionspotential auf das Membranpotential der nachgeschalteten Zelle hat. Es wird angenommen, daß die Synapsengewichte (nicht für alle Verbindungen) durch Lernvorgänge und Vorgänge des Vergessens veränderbar sind, daß es aber einen durch mehrere biologische Faktoren bedingten Maximalwert gibt, der für verschiedene Synapsentypen verschieden ist. Obwohl angenommen wird, daß eine einzelne Zelle nur *einen* Stoff als Neurotransmitter produziert, müssen die maximalen Gewichte der Synapsen, die diesen Transmitter verwenden, nicht gleich sein.

Die *Dauer der Refraktärphase* ist eine zelltypische Konstante. Die Refraktärphase ist unverzichtbare Voraussetzung für das Funktionieren der im folgenden konstruierten neuronalen Architekturen. Es wird im Modell allerdings nicht unterschieden zwischen absoluter Refraktärphase (die Zelle ist absolut unerregbar) und relativer Refraktärphase (die Zelle ist vorübergehend schwerer erregbar). Nachpotentiale werden ebenfalls nicht dargestellt.

Da die *Lernparameter* eine Auseinandersetzung mit der Frage der Repräsentationsform sprachlicher und nichtsprachlicher Informationen im Gehirn voraussetzen, werden sie erst in den folgenden Kapiteln an Ort und Stelle behandelt. Es gibt Lernparameter, die zellspezifisch und solche, die synapsenspezifisch sind.

Die Simulation eines neuronalen Netzes, in dem viele Berechnungsvorgänge gleichzeitig oder jedenfalls überlappend ablaufen, auf einem seriell arbeitenden Computer ist nur möglich, wenn der zeitliche Ablauf in Zeittakte unterteilt wird. Der Zustand des Gesamtsystems wird in jedem Zeittakt neu berechnet. Alle Berechnungen innerhalb eines Zeittaktes gelten als gleichzeitig, die Zeit schreitet nur von Takt zu Takt fort. Wenn wirklich ernsthaft mit Zeitdauern gearbeitet werden soll, ist eine zeitliche Festlegung der Taktdauer erforderlich, z. B., wie in den folgenden Simulationen, auf 1 Millisekunde. Künstliche neuronale Netze arbeiten typischerweise ohne eine solche Festlegung und sind dann zeitlich nicht interpretierbar. Die Festlegung der Taktdauer wirkt sich entsprechend auf die Festlegung der zeitbezogenen Parameter aus.

Das durch die Parameter bestimmte und durch die Taktung überformte Verhalten des Modellneurons ist in Abbildung 1.3-2 schematisch dargestellt.

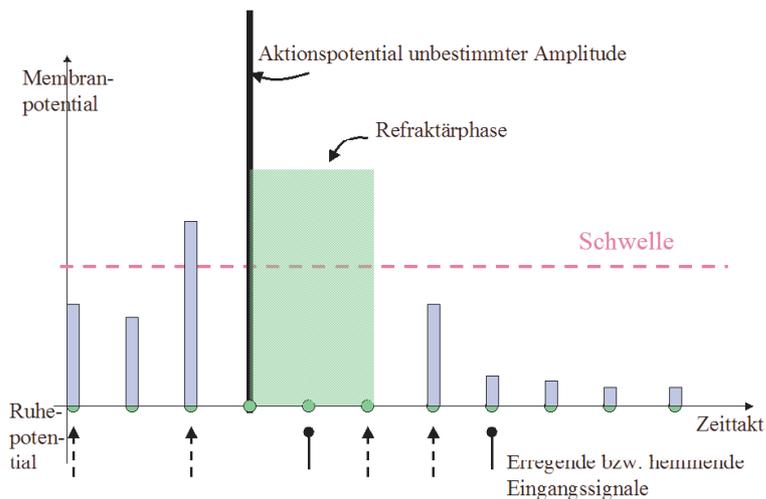


Abbildung 1.3-2: Schema zum Verhalten des Modellneurons. Dargestellte Abläufe (von links nach rechts): zeitliche Summation mit Auslösung eines Aktionspotentials und anschließender Refraktärphase, während der Input-Ereignisse wirkungslos bleiben; Verrechnung eines erregenden und eines hemmenden Inputs; Abklingen eines erregenden Potentials.

Das Simulationsprogramm stellt nur Mechanismen bereit zur Realisierung von Netzen aus Modellneuronen wie oben beschrieben. Die einzige darüber hinausgehende Hilfskonstruktion betrifft die Eingabe externer Erregungen dadurch, daß in einer Eingabedatei festgelegt werden kann, in welchen Zeittakten welche Zellen überschwellig erregt werden sollen. Das hat z. B. zur Folge, daß eine spontan aktive Zelle mit einer erregenden Verbindung auf sich selbst versehen sein und extern gestartet werden muß. Eine Möglichkeit zur abkürzenden Definition von Spontanaktivität einer bestimmten Frequenz ist nicht vorgesehen.

Später, wenn es um Lernvorgänge geht, wird wichtig, daß auch hier alle Vorgänge durch Eigenschaften der Zellen selbst ermöglicht werden und kein Apparat vorgesehen ist, der sozusagen das neuronale Netz überblickt und strukturell anpaßt.

Eine Beschreibung der Programmfunktionen und der erforderlichen Steuerdateien wird im Anhang aus Kochendörfer (2000) wieder abgedruckt.

Wir beschließen diesen Abschnitt mit einer Serie von Simulationsbeispielen, die ebenfalls Kochendörfer (2000) entnommen sind. Es sollen dabei vor allem die unterschiedlichen graphischen Notationsformen eingeführt werden, die von dem eingesetzten Simulationsprogramm vorgesehen sind und später für die Darstellung der neuronalen Spracherwerbsvorgänge verwendet werden. Die Architekturen sind bewußt einfach gehalten.

Wir beginnen mit einer ganz elementaren Anordnung aus zwei Neuronen, von denen eines eine externe Erregung bekommt, aufgrund deren es ein einzelnes Aktionspotential abgibt und ein unterschwelliges EPSP in einer nachgeschalteten Zelle auslöst. Da keine weitere Erregung erfolgt, klingt das EPSP exponentiell ab. Die Abbildung 1.3-3 zeigt einen typischen Simulationszustand, in einer optisch anschaulichen graphischen Darstellung.

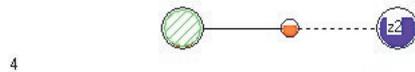


Abbildung 1.3-3: Zustand aus einem Simulationsexperiment mit zwei Neuronen. Die Zahl 4 ganz links unten bezeichnet den Zeittakt, zu dem der Zustand gehört. Die beiden Zellen sind durch große Kreise dargestellt. Die Zelle links (*z1*) ist in der Refraktärphase, die durch Schraffur dargestellt ist. Eine feuernde Zelle wird auf dem Simulationsbildschirm

ganz rot ausgefüllt. Die Zelle $z1$, deren Identifikation in der Abbildung durch die Schraffur verdeckt ist, hat eine Verbindung zu $z2$, das Synapsengewicht ist durch den kleinen, teilweise rot ausgefüllten Kreis symbolisiert. Bei einer Synapse mit überschwelligem Gewicht wäre dieser Kreis ganz ausgefüllt. Ein Aktionspotential läuft auf dieser Verbindung von der durchgezogenen zur gestrichelten Linie. Innerhalb der Zelle $z2$ ist, die Zellidentifikation umfließend, der Pegel des EPSP angedeutet, der in der Simulation allmählich absinkt.

Simulation:

neuron1v.bat [sspw.in.exe "EPSP-1" neuron1.net neuron1.ein Z 50 v]

In manchen Fällen ist es informativer, nicht nur einzelne aufeinanderfolgende Zustände in zeitlicher Folge, sondern den Verlauf eines Prozesses überblickshaft dargestellt zu bekommen. Das kann durch eine vage an Oszilloskopbilder erinnernde Veranschaulichung geschehen, wie sie in Abbildung 1.3–4 wiedergegeben ist. Der Prozeß ist derselbe, wie in der vorangegangenen Simulation.



Abbildung 1.3–4: Oszilloskopartige Darstellung. Die Zahl 104 links unten bezeichnet wieder den aktuellen Zeittakt. Oberhalb der Identifikationen $z1$ und $z2$ ist der Verlauf der Aktivierungen festgehalten, die Zeitachse verläuft von oben nach unten, es wird in der Senkrechten pro Zeittakt ein Pixel geschrieben. Die senkrechte Linie kann als Symbolisierung des Ruhepotentials interpretiert werden, eine waagrechte Linie bzw. blau (im Druck schwarz) gefärbte Fläche rechts davon stellt ein höheres, links davon ein niedrigeres Potential dar. Aktionspotentiale werden durch eine Linie dargestellt, die den Ruhepotentialpegel durchkreuzt. Man sieht in der Abbildung das Aktionspotential in $z1$, auf einen überschwelligen Reiz folgend, und das allmähliche exponentielle Abklingen des EPSP in $z2$.

Simulation:

neuron1g.bat [sspw.in.exe "EPSP-2" neuron1.net neuron1.ein Z 50 G]

Eine neuronale Grundfunktion ist die zeitliche Summation von Potentialen. Wenn die Zelle $z1$ in der Anordnung der vorangegangenen Simulationen wiederholt feuert, addieren sich die Potentiale auf $z2$, und $z2$ gibt ebenfalls ein Aktionspotential ab, vorausgesetzt, der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Erregungen ist ausreichend klein und die Leistungsfähigkeit der synaptischen Verbindung (das Synapsengewicht) ist ausreichend groß, so daß der Schwellenwert tatsächlich überschritten wird (Abbildung 1.3–5).



Abbildung 1.3–5: Zeitliche Summation

Simulation:

neuron2.bat [sspw.in.exe "Summation-1" neuron2.net neuron2.ein G Z 50]

Abschließend eine Simulation mit einer Architektur aus drei Zellen:

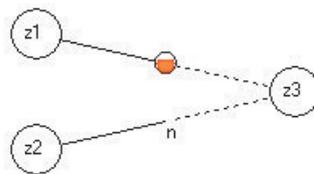
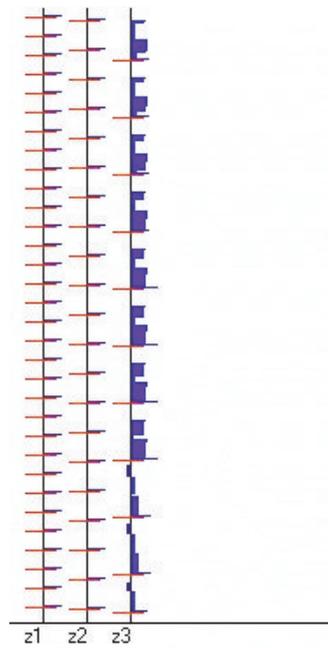


Abbildung 1.3–6: Simulation mit drei Zellen

Die Zelle $z2$ in Abbildung 1.3–6 ist eine hemmende Zelle, kenntlich an dem n auf der Verbindung zu $z3$, das hier anstelle des kleinen Kreises für das Verbindungsgewicht steht. $z1$ und $z2$ geben regelmäßig Impulse auf $z3$ ab, die dort summiert werden. Das Ergebnis ist ein verblüffend unregelmäßiger Verlauf, wie ausschnittsweise in Abbildung 1.3–7 wiedergegeben, den ohne die Demonstration durch die Simulation, da ja doch die Input-Signale vollständig regelmäßig sind, kaum jemand erwarten würde.



354

Abbildung 1.3–7: Simulationsverlauf der Simulation mit drei Zellen

Simulationen:

Bemerkung zur Netzdefinition: Da das Simulationsprogramm, wie oben beschrieben, nur Neuronenfunktionen gewährleistet, muß das mit gleicher Frequenz fortdauernde Feuern der Zellen $z1$ und $z2$ durch eine neuronale Hilfschaltung bewirkt werden. Es sind zwei Zellen ($zh1$ und $zh2$) hinzugefügt, die

unsichtbar bleiben und durch eine entsprechend verzögerte Verbindung auf sich selbst zurück die gewünschten Frequenzen erzeugen. Die Frequenzen können durch Ändern der Laufzeiten auf diesen Verbindungen beeinflusst werden.

Variante mit Darstellung von Zellkreisen:

```
neuron3v.bat [sspwin.exe "Summation-2" neuron3.net neuron3.ein v Z 50]
```

Verlaufssimulation:

```
neuron3g.bat [sspwin.exe "Summation-3" neuron3.net neuron3.ein G Z 50 d 3]
```


2 Repräsentation und Erwerb von Konzepten

2.1 Kontinuität des lokalistischen Verarbeitungsprinzips

Konzepte sind Wortbedeutungen (Bedeutungen lexikalischer Einheiten), Wahrnehmungskategorien, denen keine Wortbedeutungen entsprechen müssen, Vorstellungskomplexe, Laute (auf der Ebene der Phoneme), syntaktische Kategorien wie Nomen, Nominalphrase usw.

Konzepte sind mentale *Einheiten*. Auch wenn Konzepte aus Komponenten zusammengesetzt gedacht werden, muß es doch eine Art Zusammenschluß geben, der ein Konzept als Einheit erkennbar macht. Daß wir uns in unserem Zusammenhang auf Konzepte als *mentale* Einheiten beschränken, ist selbstverständlich.

Es gibt in der Literatur mehr oder weniger weite Definitionen dessen, was als Konzept bezeichnet wird. Manchmal werden in der Linguistik Wortbedeutungen von Konzepten abgegrenzt, Konzepte werden dann als nichtsprachliche inhaltliche Gebilde aufgefaßt. Ebenfalls gute linguistische Tradition ist es, daß Wortbedeutungen als Konzepte bezeichnet und dem mentalen Niederschlag der akustischen Wortform gegenübergestellt werden (F. de Saussure).

Wir verwenden hier demgegenüber eine maximal allgemeine Definition: Konzept ist alles, was der Kategorisierung dient. Damit ist von vornherein die Erwartung impliziert, daß die Kategorisierung und das Konzept als ihre Grundlage in allen mentalen Modalitäten gleichartig strukturiert sind.

Gleichzeitig wird damit natürlich die Frage aufgeworfen, wie die mentale Repräsentation von Konzepten überhaupt zu denken ist. Wenn wir „neuronalen“ Entwürfe dazu heranziehen – das sind in diesem Fall vor allem Entwürfe, die im Paradigma des Konnektionismus entwickelt worden sind –, dann gibt es zwei Möglichkeiten: das lokalistische und das verteilte Repräsentationsprinzip. Da der Sprachgebrauch bezüglich dieser Begriffe nicht ausreichend einheitlich ist, soll hier zunächst festgelegt werden, was damit gemeint sein soll.

Die Abbildung 2.1–1 zeigt zwei dreischichtige neuronale Netze, in denen schematisch – einmal verteilt, einmal lokalistisch – das Konzept TISCH dargestellt ist.

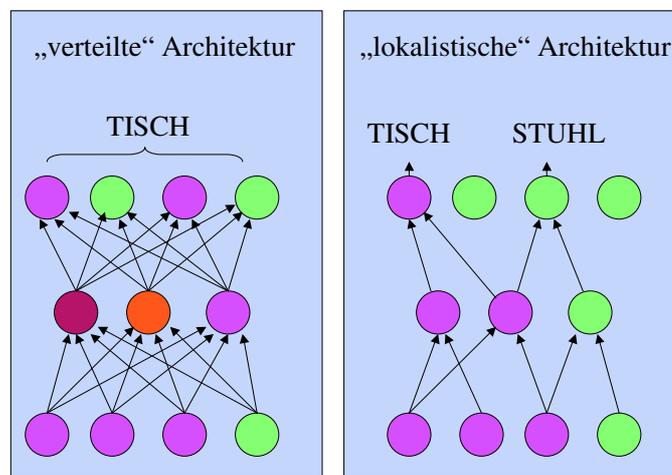


Abbildung 2.1–1: Verteilte und lokalistische Repräsentation des Konzepts TISCH

Es ist sofort deutlich, daß ein wesentlicher Unterschied zwischen den Architekturen der Abbildung 2.1–1 darin besteht, daß bei dem verteilten Netz das Konzept TISCH durch die Gesamtheit der Output-Einheiten getragen wird, während im lokalistischen Netz eine spezialisierte Einheit dafür zuständig ist. Man darf bei verteilter Repräsentation nach der Bedeutung eines Aktivationsmusters über mehrere Einheiten oder alle Einheiten einer Schicht fragen; das ist bei einer lokalistischen Repräsen-

tation sichtlich unsinnig. Die einzelnen Einheiten sind – lokalistisch – mit Bedeutungen versehen, die ggf. auch als Konkurrenzen gelten.

Ein Problem in dieser Hinsicht stellen Systeme dar, die zwar als verteilt bezeichnet werden, die aber doch Einheiten verwenden, die für sich genommen nicht sozusagen „anonym“ sind, sondern als sog. „Microfeatures“ betrachtet werden und mit einer speziellen Interpretation versehen sind. Letztlich kann jedes verteilte System als Microfeature-System reinterpreted werden, ohne daß sich an seiner Leistung oder seinem Verhalten etwas ändert. Die lokalistische Architektur in Abbildung 2.1–1 ist aber insofern kein Microfeature-System, als man zwar die (in der Abbildung unbenannten) Einheiten der Eingabeschicht als Microfeatures sehen kann, wohl kaum aber die Einheiten der Ausgabeschicht. Der Übergang von der Eingabe- zur Ausgabeschicht kann als Hierarchiebildung verstanden werden. Die Geltung der Einheiten in der Ausgabeschicht ist komplexer als die der Einheiten in der Eingabeschicht. Das ist bei dem verteilten System nicht der Fall. Verteilte Systeme sind metaphorisch gesprochen „flache“ Systeme. Auch stärker an der Biologie orientierte Architekturvorstellungen, bei denen Konzepte durch synchrone Aktivität verstreuter Neuronen repräsentiert werden, führen zu flachen Systemen (vgl. Engel, König & Singer, 1993; Roth, 1997: 263 ff.; Diesmann, Gewaltig & Aertsen, 1999).

Für die spezialisierten Einheiten eines lokalistischen Systems hat sich die Bezeichnung „Großmutterzellen“ eingebürgert. Die Großmutterzelle ist eine Zelle, die dann aktiviert ist, wenn die je individuelle Großmutter wahrgenommen wird. Es gibt in der Literatur viele Argumente gegen die Großmutterzellen-Theorie. In Kochendörfer (1999a) wird gezeigt, daß diese Argumente kaum haltbar sind. Die Alternative lokalistisch vs. verteilt muß neu diskutiert werden. Wie arbeitet das Gehirn wirklich?

Auf relativ sicherem Boden kann man sich bewegen bezüglich der Repräsentationsformen an der motorischen Peripherie und der Sinnesperipherie.

Man kann versuchen, sich eine verteilte Repräsentation der Motorik und damit verteilte Ansteuerung der Muskulatur vorzustellen, also eine Ansteuerung über ein spezifisches Erregungsmuster auf Bahnen und unter Verwendung von Zellen, die für die Ansteuerung vieler motorischer Elemente zuständig sind. Das müßte schematisch so aussehen, wie in Abbildung 2.1–2 dargestellt. Man beachte die Notwendigkeit von Schaltungen, die eine Signaldekodierung leisten!

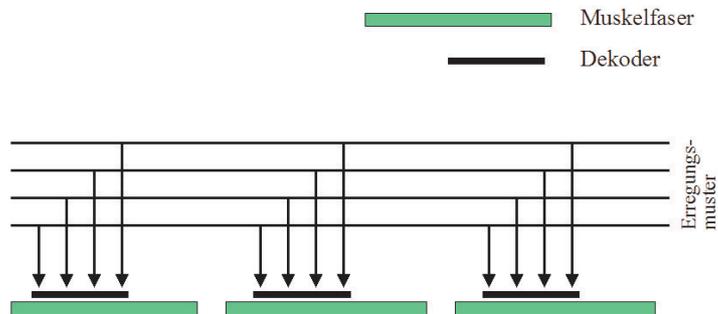


Abbildung 2.1–2: Verteilte Ansteuerung von Muskelfasern, schematisch

Ein kurzer Blick in ein beliebiges Lehrbuch zur Physiologie zeigt, daß die biologische Realität anders aussieht. Es gilt nicht die Ansteuerung durch ein spezifisches Erregungsmuster, sondern durch ein spezifisches Motoneuron, wie in Abbildung 2.1–3 angedeutet.

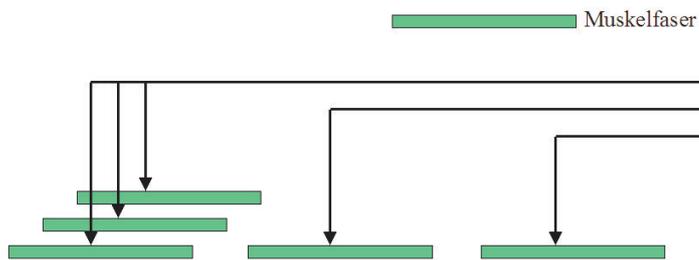


Abbildung 2.1–3: Lokalistische Ansteuerung von Muskelfasern, schematisch. Die Pfeillinien stellen Axone bzw. Axonverzweigungen von Motoneuronen dar. Ein Motoneuron kann mehrere Muskelfasern innervieren.

Das lokalistische Prinzip gilt nicht nur für die äußerste Peripherie, sondern (wieder nach Lehrbuchangaben, z. B. Kandel, Schwartz & Jessell, 1996: 507-510) mindestens auf einer bestimmten Abstraktionsebene auch

noch für die motorischen Felder der Großhirnrinde, die somatotop organisiert sind.

Das für die Linguistik wichtigste Beispiel für die Sinnesperipherie ist das Gehör. Das Sinnesorgan im Ohr ist nicht wie ein technisches Mikrofon strukturiert, und das Schallereignis wird dort nicht digitalisiert, etwa in dem Sinne, daß Amplituden von akustischen Schwingungen (hier ist nicht Schalldruck gemeint!) in entsprechend hoher Abtastrate numerisch dargestellt würden, was in eine verteilte Repräsentation übersetzt werden könnte, sondern es gilt das tonotope Prinzip: Es gibt Sinneszellen, die auf Sinustöne einer bestimmten Frequenz spezialisiert sind. Die Anordnung der Frequenzspezialisten auf dem Corti-Organ der Cochlea ist streng linear, wie die Abbildung 2.1–4 schematisch zeigt.

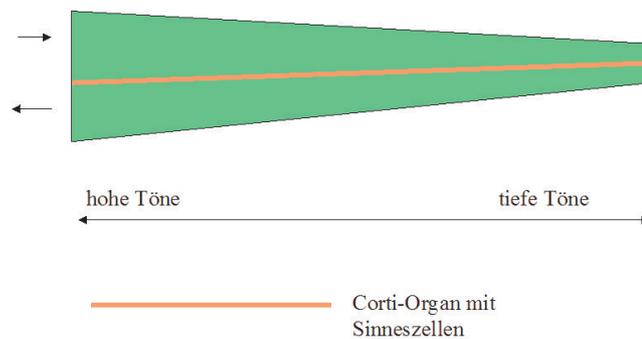


Abbildung 2.1–4: Tonotope Organisation des Corti-Organs, schematisch. Die schneckenförmig gewundene Cochlea ist aufgerollt gedacht, links das ovale (oben) und das runde Fenster (unten). Die hauptsächlich für die afferente Erregung verantwortlichen Sinneszellen des Corti-Organs, die inneren Haarzellen, liegen in einer Reihe auf der Basilarmembran.

Analog zur Motorik kann man auch hier im sensorischen Bereich die tonotope Organisation noch im Kortex nachweisen.

Wir können also zusammenfassend festhalten, daß jedenfalls an der äußersten Peripherie das lokalistische Repräsentationsprinzip gilt. Die These,

die hier formuliert und im folgenden schrittweise weiter ausgearbeitet werden soll, ist nun, daß das lokalistische Prinzip nicht nur an der Peripherie, sondern auch im Kortex durchgängig gilt, bildlich gesprochen vom Ohr bis zum Muskel entsprechend der Veranschaulichung in Abbildung 2.1–5.

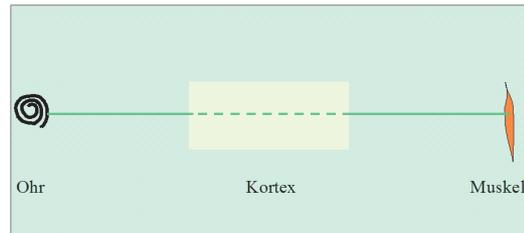


Abbildung 2.1–5: Kontinuität der lokalistischen Verarbeitung, Ausdehnung des lokalistischen Verarbeitungsprinzips von der Peripherie (durchgezogene Linie) auf die zentrale kortikale Verarbeitung (gestrichelte Linie)

Es soll an dieser Stelle auf eine Reihe zusätzlich stützender Argumente stichwortartig hingewiesen werden, deren Bedeutung später deutlicher sichtbar werden wird:

- Für verteilte Systeme sind bisher keine biologisch realistischen Lernalgorithmen gefunden worden;
- verteilte Systeme beschränken das Ausmaß an Parallelverarbeitung (Alternativen können nicht gleichzeitig repräsentiert werden);
- verteilte Systeme haben Probleme mit der Sequentialität von Sprache;
- Nachweis „komplexer“ Zellen im Kortex, die mit der „flachen“ verteilten Architektur nicht zu vereinbaren sind.

Konnektionistische lokalistische Modelle finden sich bei Grainger & Jacobs (1998 eds.), man vgl. auch Schade (1999).

2.2 Das Frequenzargument

Die Aktivität eines Motoneurons führt zur Kontraktion der ihm zugeordneten Muskelfasern. Eine Steigerung der Kraft am Muskel kann durch Vermehrung der Zahl aktiver Motoneuronen erzielt werden. Es spielt hier aber auch die Frequenz eine Rolle, mit der die Motoneuronen feuern:

„Die zweite Form der Kraftregelung ist dem ZNS über eine Steigerung der Erregungsrate der Motoneurone gegeben. Eine Frequenzsteigerung von 8 auf 30 s^{-1} entspricht dem Übergang vom unvollkommenen zum vollkommenen Tetanus (s. unten), wobei die Kraft auf das rund 10fache ansteigt. Der Frequenzbereich zwischen 30 und 120 s^{-1} dient zur Variation der Verkürzungsgeschwindigkeit, wobei Erregungsraten zwischen 80 und 120 s^{-1} nur für etwa 10 ms während ballistischer Bewegungen (Wurf, Sprung) vorkommen. Die maximale Frequenz, mit der wir bei repetitiver antagonistischer Muskelaktivierung die Finger hin- und herbewegen können, liegt bei 8 s^{-1} .“ (Schmidt, 1995 Hg.: 88)

Eine ganz analoge Rolle spielt die Frequenz im Hörnerven:

„Die Länge des Schallreizes wird durch die Dauer der Aktivierung der afferenten Nervenfasern verschlüsselt. Die Kodierung unterschiedlicher Schalldruckpegel gelingt durch die Entladungsrate der erregten Neurone. Mit Zunahme des Schalldruckpegels steigt die Entladungsrate. Allerdings kann eine einzelne Nervenfasern eine bestimmte höchste Entladungsrate nicht überschreiten. Nimmt der Schalldruckpegel trotzdem weiter zu, werden zunehmend Nachbarfasern mitaktiviert.“ (Schmidt, 1995 Hg.: 324)

Es gibt also sowohl an der Sinnesperipherie als auch an der motorischen Peripherie die Möglichkeit, Intensität durch die Frequenz von Aktionspotentialen zu repräsentieren. Die Frage ist, ob diese Möglichkeit der Frequenzkodierung auch für zentralere Verarbeitungsschichten anzunehmen ist. Ein Repräsentationsproblem, das hier Entscheidungshilfen anbietet, ist die Frage nach der Art der Repräsentation von Phonemen. In konnektionistischen Modellen wie TRACE (McClelland & Elman, 1986) wird selbstverständlich eine Intensitätskodierung auf Phonemebene angenommen, es bleibt aber unklar, wie diese Intensitätskodierung in Netzen aus *biologischen* Neuronen realisiert sein könnte.

Eine sehr einfache Überlegung zeigt, daß mit einer Frequenzkodierung von Intensitäten im Sprachverstehensprozeß schon auf der Ebene der

Phoneme nicht mehr zu rechnen ist, woraus sich ergibt, daß auch bei der weitergehenden Verarbeitung Frequenzkodierung keine Rolle spielen kann. Wenn wir den akustischen Verlauf eines einfachen Lexems wie „Zelle“ betrachten, das vollständig aus kurzen Phonemen besteht, so stellen wir fest, daß bei nicht allzu schneller Redeweise durchschnittlich eine Zeitspanne von etwa 60 ms auf das einzelne Phonem entfällt. Wenn wir eine Abhängigkeit der Produktion und Perzeption des Nachfolgephonems von der des Vorgängerphonems annehmen, müßten die mehreren eine Intensitätskodierung realisierenden Aktionspotentiale in einer Zeitspanne von 60 ms realisiert werden (Abbildung 2.2-1).

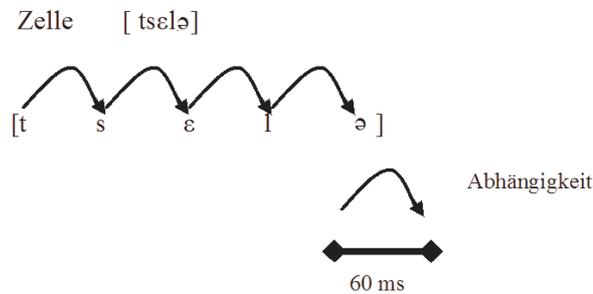


Abbildung 2.2-1: Zeitverhältnisse bei der Produktion und Perzeption von Kurzphonemen. Die Bögen können als Verbindungen von Punkten angesehen werden, die jeweils innerhalb des zu einem Laut gehörigen Schallereignisses liegen. Man kann in Spektrogrammen – bei konstanter Sprechgeschwindigkeit – relativ regelmäßige Punktfolgen dieser Art in die Lautsequenz hineinlegen.

Wenn wir innerhalb von 60 ms auch nur drei Aktionspotentiale unterbringen wollten, würde das an einem einzelnen Neuron eine Frequenz von mehr als 50 s^{-1} bedeuten. Das widerspricht aber den Beobachtungen: Frequenzen im Kortex in Bereichen, die einigermaßen sicher mit zentraler, relativ peripheriefernere Verarbeitung zu tun haben, liegen typisch bei vielleicht $15\text{-}20 \text{ s}^{-1}$. Das heißt, in der Zeitspanne, die für ein Kurzphonem zur Verfügung steht, hat nur ein einziges Aktionspotential Platz. Es gibt andere Argumente, die in dieselbe Richtung deuten, so z. B. die in Reaktionszeitexperimenten erreichbaren Geschwindigkeiten,

die eine Auswertung von frequenzkodierter Information auf mehreren Stufen nicht zulassen.

Es ist also von den beobachteten Frequenzen her nicht gut denkbar, daß im Kortex bei zentralen Verarbeitungsprozessen Frequenzkodierung, also die Darstellung von Intensitäten, eine Rolle spielt. Wir müssen, unter Beibehaltung der Hypothese des lokalistischen Verarbeitungsprinzips, im Kortex mit „Einzelimpulskodierung“ rechnen. Da ein einzelner Impuls, der in seiner Amplitude und seinem zeitlichen Verlauf zelltypisch ist und nicht systematisch verändert werden kann, für sich genommen nur ausdrücken kann, ob eine Information vorhanden ist oder nicht, funktioniert Einzelimpulskodierung nur unter Annahme des lokalistischen Prinzips: Information wird durch die Kombination von Impuls und Großmutterzelle kodiert.

Man sollte das nicht so verstehen, daß so etwas wie ein binärer Code verwendet wird; dem binären Code würde die Null fehlen, da es im Kortex – im Unterschied zur Computerarchitektur – keine Taktung gibt.

Im Zusammenhang mit der Entwicklung gepulster neuronaler Netze werden verschiedene Formen von Kodierung untersucht, die zum Teil eine länger zurückreichende biologische Tradition haben und die nicht mehr die Intensitätsdarstellung durch längere Impulszüge voraussetzen, also ggf. als Alternative zur Einzelimpulskodierung aufgefaßt werden könnten:

- die Darstellung analoger Werte durch zeitliche Distanzen einzelner Aktionspotentiale („*delay coding*“);
- die Darstellung analoger Werte durch die Zahl aktivierter Neuronen („*population coding*“);
- die Darstellung analoger Werte durch den Grad der Synchronizität („*temporal correlation coding*“), Synchronizität wird auch zur Darstellung von Zusammengehörigkeit (Lösung des Bindungsproblems, populäre Darstellung bei Engel, König & Singer, 1993) verwendet.

Alle diese Kodierungsprinzipien haben nicht zur Entwicklung von Modellen geführt, die erwarten lassen, daß damit auch zusammenhängende komplexere Leistungen vom Zuschnitt der Sprachverarbeitung auf biologisch plausible Weise erbracht werden könnten; vgl. zusammenfassend Maass (1999) und Gerstner (1999).

Wenn es einen Übergang von Frequenzkodierung zu Einzelimpulskodierung und umgekehrt gibt, sind entsprechende Umkodierungsprozesse erforderlich, wie in Abbildung 2.2–2 angedeutet.

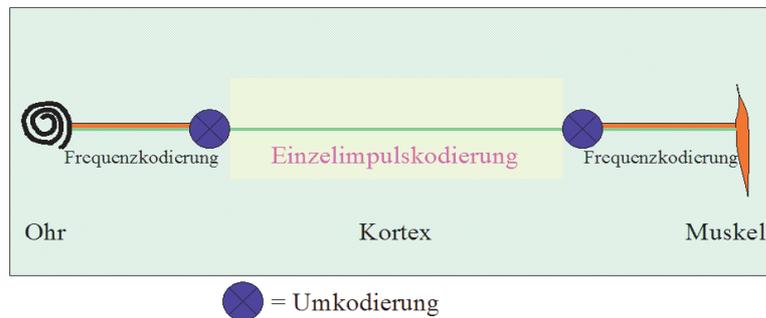


Abbildung 2.2–2: Kontinuität der lokalistischen Verarbeitung, Frequenzkodierung an der Peripherie, Einzelimpulskodierung bei der zentralen Verarbeitung.

Wir können also zusammenfassend die These ableiten, daß zentrale Verarbeitungsstrukturen Großmutterzellen(!) mit Einzelimpulskodierung(!) verwenden. An der Peripherie werden Intensitäten frequenzkodiert. Repräsentationen sind überall lokalistisch. (Verteilte Systeme sind mit Einzelimpulskodierung nicht möglich, sofern sie auf die Weitergabe von Erregungsintensitäten angewiesen sind.)

2.3 Die Bildung von Instanzen

Einige grundlegende Annahmen über die mentale Datenverarbeitung werden hier als selbstverständlich vorausgesetzt, so die Nichttrennung von Speicherung und Verarbeitung. Es ist nicht anzunehmen, daß im Gehirn Bereiche, die ausschließlich der Speicherung von Informationen dienen, Bereichen gegenüberstehen, die die Verarbeitungsalgorithmen enthalten und ausführen. Die Vorstellung vom Informationstransport aus einem Speicher in eine Verarbeitungsstruktur oder zwischen verschiedenen Speichern ist, wenn man von ganz vagen, metaphorischen Interpretationen absieht, nicht haltbar. Großmutterzellen kann man nicht transportieren. (Zum Problem des Verhältnisses von Langzeitgedächtnis und Kurzzeitgedächtnis vgl. Kochendörfer, 1999a.)

In demselben Sinne kann man auch nicht sagen, daß die Großmutterzelle, jetzt wörtlich genommen, das Konzept GROSSMUTTER *enthält*. Die Großmutterzelle ist banalerweise, wie alle Neuronen, für sich selbst völlig

neutral gegenüber der dargestellten Information. Versuche, Information molekular innerhalb der Zelle repräsentiert zu denken, scheitern an dem damit verbundenen Zugriffsproblem.

Wie kommt eine Großmutterzelle zu ihrer Bedeutung? Es gibt Neuronen, deren Bedeutung angeboren ist. Das gilt von den Neuronen des Spiralganglions im Ohr, die, wie die ihnen zugeordneten Sinneszellen, bestimmten Schallfrequenzen zugeordnet sind (siehe den Abschnitt 2.1). Dasselbe gilt selbstverständlich auch für die Motoneuronen im Rückenmark, die einen fest zugeordneten muskulären Bereich innervieren. Die Großmutterzelle für das Konzept FAHRRAD kann aber nicht durch Vererbung ihre Bedeutung erhalten, sondern nur über einen Lernprozeß in Anpassung an eine Umgebung, in der Fahrräder als reale Objekte oder wenigstens in der Kommunikation vorkommen. Das heißt für ein System, in dem es keinen Informationstransport gibt: Großmutterzellen erhalten ihre Bedeutung, soweit sie nicht angeboren ist, durch ihre mehr oder weniger indirekte Verbindung mit der Sinnesperipherie bzw. mit der Motorik. Man beachte, daß das auch für „abstrakte“ Konzepte gilt. Wenn in die Einheiten von neuronalen Modellen inhaltliche Bezeichnungen geschrieben werden, muß das als eine Abkürzung für Verbindungsstrukturen gesehen werden, die letztlich in der Sinnesperipherie bzw. in der motorischen Peripherie usw. verankert sind. (Peripherie muß in einem sehr weiten Sinn verstanden werden.)

Es genügt also nicht zu sagen, daß es die Position im neuronalen Netz ist, die die Bedeutung einer Zelle bestimmt, oder gar, daß das Gehirn aufgrund der Position der Zelle „weiß“, was sie bedeutet. *Konstitutiv ist die Verbindung mit der Peripherie.* Zellen erhalten ihre Bedeutung durch Verbindung mit bereits bedeutungshaltigen Zellen bzw. mit Komplexen solcher Zellen. Dies ist auch der Grund, warum die atomistische Auffassung von Konzepten, wie sie von Fodor (1998) vertreten wird, für das Gehirn unhaltbar ist.

Die folgenden Überlegungen beziehen sich zunächst auf Prozesse in Verstehensrichtung („Bottom-up-Prozesse“), auf Prozesse in Produktionsrichtung („Top-down-Prozesse“) wird später mehrfach Bezug genommen. In Verstehensrichtung setzt die „Definition“ einer Zelle einen Lernprozeß voraus, der im wesentlichen durch eine Aktivität bereits definierter Zellen getrieben sein muß. Der Lernprozeß bedeutet, daß Konzepte an der Wirklichkeit orientiert werden. Dieser Lernprozeß ist ein Prozeß der Instanzenbildung, die bereits definierten Zellen werden als „Typzellen“,

die zu definierenden als „Instanzen“ bezeichnet. Es können mehrere Typzellen zur Definition einer Instanz herangezogen werden, oder es können auch einzelne Typzellen Instanzen bilden (Abbildung 2.3-1).

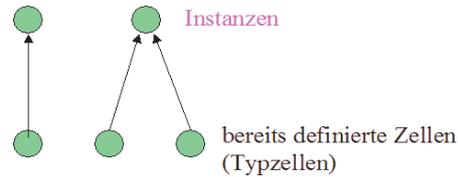


Abbildung 2.3-1: Typzellen und Instanzen

Die Annahme des erforderlichen Lernprozesses stößt auf die Schwierigkeit, daß neuronale Verbindungen nicht innerhalb der dafür anzunehmenden Zeitspannen neu wachsen können. Die Lösung, die im Gehirn realisiert ist, besteht darin, daß ein Überangebot potentieller Verbindungen vorhanden ist, die bei Bedarf verstärkt werden können (schematisch in Abbildung 2.3-2).

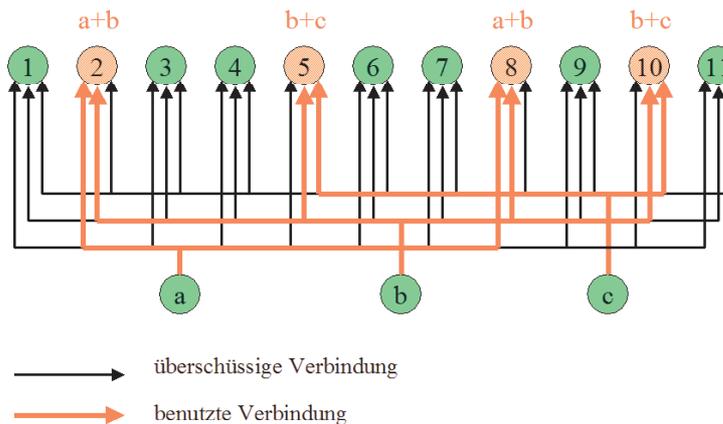


Abbildung 2.3-2: Schema zum Prinzip der Instanzenbildung. Warum gerade die Zelle 2 auf die Kombination $a + b$, die Zelle 5 für $b + c$ spezialisiert ist usw., mag hier offenbleiben.

Ideen zum synaptischen Lernen sind auch heute noch der sogenannten Hebb-Regel verpflichtet. Sie lautet:

„When an axon of cell *A* is near enough to excite cell *B* or repeatedly or persistently takes part in firing it, some growth process or metabolic change takes place in one or both cells such that *A*'s efficiency, as one of the cells firing *B*, is increased.“ (Hebb, 1949: 62)

Die bloße Idee der Verstärkung von Synapsen durch Benutzung (also ohne Berücksichtigung der dadurch ausgelösten Reaktion in der nachgeschalteten Zelle), die manchmal als Interpretation daraus entwickelt wird, ist in der folgenden Simulation realisiert. Es wird eine Architektur verwendet, in der zwei Typzellen (*t1* und *t2*) mit fünf potentiellen Instanzenzellen (*i1* bis *i5*) verknüpft sind. Es soll damit der Fall simuliert werden, daß *einzelne* Typzellen Instanzen, also sozusagen Kopien von sich bilden. Gefordert ist natürlich, daß im Normalfall Instanzen nicht mehrdeutig sein, das heißt nicht mehreren Typen zugeordnet sein dürfen, es sei denn, diese Typen bilden ein zusammengehöriges Bündel von definierenden Merkmalen. Da der Input im Fall des Simulationsexperiments in einer regelmäßigen Abfolge von zeitlich deutlich getrennten Impulsen auf *t1* und *t2* besteht, sollte das Ergebnis darin bestehen, daß die Mengen der den Typzellen jeweils zugeordneten Instanzen disjunkt sind. Im Ausgangszustand sind alle Synapsen so schwach, daß keine der Instanzenzellen überschwellig erregt werden kann. Der Lernprozeß besteht in der Verstärkung der Synapsen um einen festgelegten Betrag bei jeder Aktivierung. In Annäherung an die biologische Realität wird angenommen, daß der „Lernschritt“ pro Aktivierung nicht überall gleich ist.

Simulation:

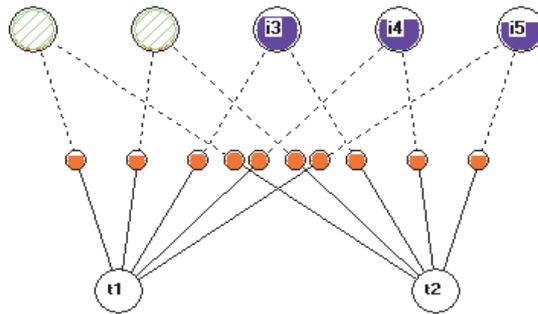
inst1.bat [sspwin.exe Instanzenbildung-1 inst1.net inst.ein Z 50 V]

Man beobachte während des Simulationsvorgangs den allmählichen Anstieg der „Pegelstände“ in den kleinen Kreisen, die die Synapsengewichte symbolisieren.

Die Abbildung 2.3–3 zeigt ein ganz brauchbares Zwischenstadium aus dieser Simulation und das Endstadium nach Ablauf der vorgesehenen Inputfolge. Während im Zwischenstadium noch eine Differenzierung der

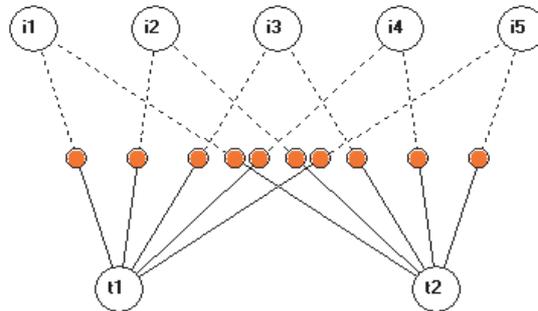
Synapsengewichte zu erkennen ist, derart, daß $t2$ mit den Instanzen $i1$ und $i2$ überschwellig verknüpft ist (beide in der Refraktärphase) und entsprechend $t1$ mit $i4$ und $i5$, sind im Endstadium beide Typzellen mit allen Instanzenzellen gleichstark verbunden, was der Idee der Instanzenbildung widerspricht.

(a) Zwischenstadium:



155

(b) Endstadium:

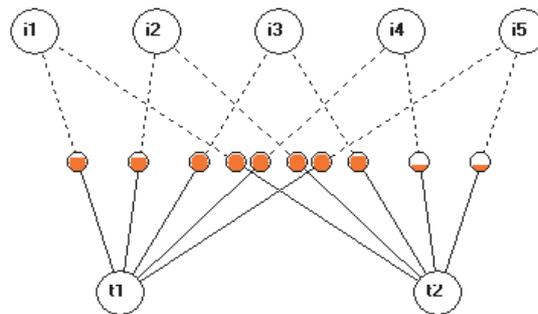


418

Abbildung 2.3–3: Simulationsergebnisse

Eine Lösung des Problems kann nur darin bestehen, daß der Lernvorgang zu einem geeigneten Zeitpunkt abgebrochen wird und die Synapsengewichte fixiert werden. Ein vergleichbarer Abschluß des Lernvorgangs wird

bei der Langzeitpotenzierung im Hippokampus diskutiert (vgl. Kandel, Schwartz & Jessell, 1996 Hg.: 702 f.). Auch für den *Zeitpunkt* des Lernstops scheint es nur eine Lösung zu geben: Der Lernvorgang ist abgeschlossen, wenn eine Instanzenzelle aufgrund des Inputs feuert. Mit der Einführung dieser modifizierten Lernregel funktioniert die Instanzenbildung wie gewünscht. Das Endstadium zeigt Abbildung 2.3–4.



418

Abbildung 2.3–4: Simulation der Instanzenbildung mit Lernstop

Simulation:

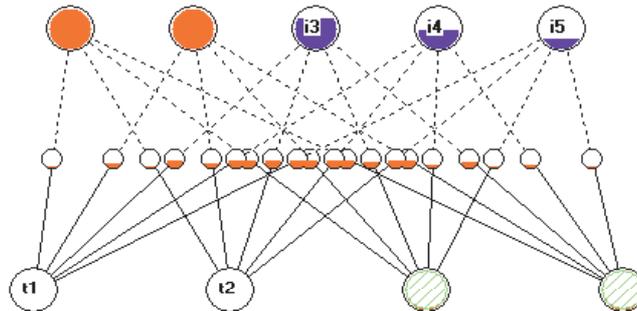
inst2.bat [sspwin.exe Instanzenbildung-2 inst2.net inst.ein Z 50 V]

Technische Hinweise zum Verständnis der Netzdefinition:

Der „Lernstop“ wird in der Simulation durch die Parameter „Zellplastizität“ und „Zunahmerate der Zellplastizität pro Spike“ realisiert. Der Parameter Zellplastizität kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Ein hoher Wert (in der Simulation) bedeutet eine hohe Lernbereitschaft und gleichzeitig eine hohe Abnahmerate der Synapsengewichte. Der Parameter „Zunahmerate der Zellplastizität pro Spike“ ist in der Simulation negativ, das heißt, er bewirkt Abnahme: der Wert der Zellplastizität wird bei einer Zunahmerate von -0.9999 bei jedem Feuern der Zelle mit $1 - 0.9999$, also 0.0001 , multipliziert.

Das gezeigte Verfahren zur Instanzenbildung funktioniert auch für den Fall, daß mehrere Typen (= „Merkmale“) innerhalb eines kleinen Zeitfensters als Komponenten eines Wahrnehmungsvorgangs eine „komplexe“ Instanz bilden. Zur Demonstration wird das bisher verwendete Netz um zwei Typzellen erweitert. Außerdem ist eine entsprechende Reduzierung

der Lernraten erforderlich. Der Input besteht in Abfolgen von Paaren $t1 + t2$ bzw. $t3 + t4$. Die Abbildung 2.3–5 zeigt einen Simulationszustand nachdem der Lernprozeß abgeschlossen ist, bei Eingabe von $t3 + t4$.



244

Abbildung 2.3–5: Simulation der Instanzenbildung für Merkmalsbündel. Die Zellen $t3$ und $t4$ sind in der Refraktärphase, sie haben in den Instanzen $i1$ und $i2$ Aktionspotentiale ausgelöst (die entsprechenden Identifikationen sind verdeckt). Man kann anhand der Verbindungsgewichte abschätzen, daß $i1$ und $i2$ durch die Kombination $t1 + t2$ nicht überschwellig erregbar sind.

Simulation:

inst3.bat [sspwin.exe Instanzenbildung-3 inst3.net inst3.ein Z 50 V]

Bei der genaueren Analyse des Lernergebnisses stellt man fest, daß die Instanz $i3$ nicht nur durch $t1 + t2$, sondern auch durch $t1 + t3$ überschwellig erregt wird. Dieser unerwünschte Effekt wird durch Einführung des Parameters „Fixations-Zeitfenster“ verhindert. Vgl. zu diesem Parameter und seiner Funktion Kochendörfer (2000: 53) und weiter unten Abschnitt 4.2.

Simulation:

instx.bat [sspwin.exe Instanzenbildung-4 instx.net instx.ein Z 50 V]

Der beschriebene Instanzenbildungsprozeß ist für ein lokalistisches System unverzichtbar. Zu den Voraussetzungen, die er verlangt, gehört vor allem eine ausreichende Menge potentieller, durch Lernen verstärkbarer Verbindungen. Man beachte dazu, daß auf einem einzelnen Neuron im

Kortex durchaus (größenordnungsmäßig) 10 000 Synapsen gezählt werden können. Es sind verschiedene Erklärungen für diese Verbindungsdichte möglich. Man kann z. B. anführen, daß einzelne Verbindungen einfach nicht ausreichend leistungsfähig sind, um eine überschwellige Erregung auszulösen. Es gibt aber durchaus auch „monosynaptische“ Phänomene im Nervensystem! Bei verteilten konnektionistischen Modellen besteht eine Tendenz, eine möglichst dichte Verknüpfung neuronaler Einheiten anzunehmen (häufig wird jede Einheit mit jeder verknüpft gedacht); die biologische Plausibilität dieser Modelle ist aber, wie schon mehrfach erwähnt, aus anderen Gründen zweifelhaft. Auf diesem Hintergrund ist die Erklärung der Verbindungsdichte und der geringen Wirksamkeit fast(!) aller Verbindungen aus dem Bedürfnis der Instanzenbildung heraus eine elegante Möglichkeit.

Ein anderer interessanter Aspekt ist, daß der Instanzenbildungsprozeß in der beschriebenen Form, vor allem die Instanzenbildung für Merkmalsbündel, nur funktionieren kann, wenn ein ausreichend großer Abstand zwischen den Aktionspotentialen an einer einzelnen Zelle und damit eine biologisch ausreichend verlässliche Unterscheidung von Gleichzeitigkeit einerseits und Abfolge andererseits gewährleistet ist. Das bedeutet praktisch, daß eine Voraussetzung für die Instanzenbildung die Einzelimpulskodierung ist. Daraus wiederum folgt die Parallelisierung von Lernvorgängen (die nicht Vorgänge des Vergessens sind) und Einzelimpulskodierung und ihre Beschränkung auf den Kortex, wie in Abbildung 2.3–6 schematisch dargestellt.

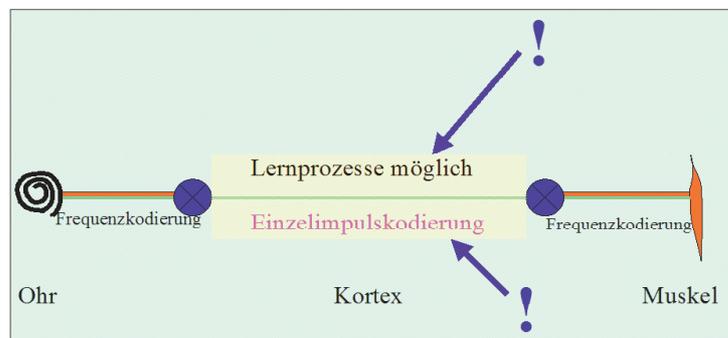


Abbildung 2.3–6: Zusammenhang Einzelimpulskodierung – Lernfähigkeit

Instanzenbildung für Merkmalsbündel ist nichts anderes als ein elementarer Prozeß der Konzeptbildung. Die Instanzenbildung stellt die Mechanismen für entsprechende Kategorisierungsvorgänge bereit. Einfache Kategorien basieren auf wiederholter Wahrnehmung, bei der Annahme einer allmählichen Verstärkung von Synapsengewichten im Lauf der Instanzenbildung kommt es zu einer Abstraktion von nur momentanen Eigenschaften. Es werden also tatsächlich auch überlebensrelevante Konzepte gebildet, nämlich solche, die auf eine gewisse Erscheinungsvielfalt von Wahrnehmungsexemplaren anwendbar sind.

Komplexere Formen und spezielle Probleme der Konzeptbildung werden in den folgenden Abschnitten behandelt.

2.4 Verlauf der Konzeptbildung

Bei Oerter & Dreher (1998: 605) findet sich folgende Bemerkung:

„Das Kind, das zum ersten Mal einen Hund sieht, schließt in den Begriff ‘Hund’ ein einziges Exemplar ein. Der Erwachsene versteht unter dem gleichen Begriff alle Hunde, die jemals gelebt haben und leben werden, ja alle denkbaren Hunde, also auch solche, die nie existieren werden.“

Eine Kategorie, die ein einzelnes Exemplar einschließt, ist eine Kategorie, die durch relativ viele Merkmale bestimmt wird. Der Begriff des Erwachsenen ist demgegenüber eine Abstraktion, die durch weniger Merkmale bestimmt sein kann. Die Entwicklung geht, so gesehen, von konkreten zu abstrakten Begriffen.

Die entgegengesetzte Entwicklung wird in der strukturalistischen Linguistik aus entsprechenden Beobachtungen abgeleitet: Die Konzeptentwicklung beginnt mit Konzepten, die durch wenige Merkmale gekennzeichnet sind. Diese Konzepte werden dann im Verlauf durch Hinzufügen weiterer Merkmale präzisiert. (Verschiedene Möglichkeiten der Konzeptbildung werden bei Szagun, 1996: Kap. 4, dargestellt.)

Wie sieht der Verlauf der Konzeptentwicklung in der Sicht der neuronalen Modellierung aus? Wie komplex können frühe Instanzen werden, das heißt, wieviele Merkmale können durch eine einzelne Instanz gebündelt werden? Entstehen Instanzen mit vielen Merkmalen besonders früh?

Wir behandeln diese Fragen zunächst mit der Konstruktion eines etwas komplexeren Modells zur Instanzenbildung, dessen Architektur in Abbildung 2.4–1 dargestellt ist.

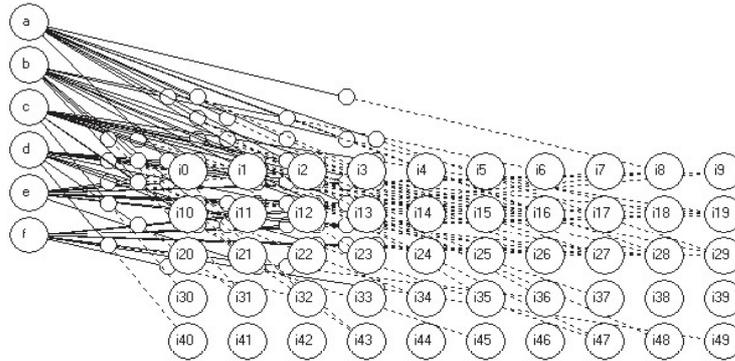


Abbildung 2.4–1: Architektur zur Bildung komplexer Instanzen; Erläuterungen im Text

Das Netz hat 50 Zellen, die „Merkmale“ nicht gerechnet. Es sind 6 Merkmale vorhanden (in der Abbildung ganz links), sie haben jeweils 12 potentielle zufällig bestimmte und zunächst sehr schwache Verbindungen mit den Instanzenzellen. Es gibt keine weiteren Zellverbindungen. Die Lernbereitschaft/Lernrate ist bei allen Instanzenzellen gleich. Der Input besteht in der gleichzeitigen Erregung aller Merkmalszellen, die mehrfach im Abstand von 80 Zeittakten wiederholt wird.

Der Verlauf der Simulation, das heißt die zu einem bestimmten Zeittakt gebildeten Instanzen sind in der folgenden Tabelle festgehalten:

Zeittakt	Instanzen	Zahl der Merkmale
164	i16	5 Merkmale
244	i28 i27 i19	4 Merkmale
324	i29 i14 i8 i2	3 Merkmale
564	i47 i43 i36 i32 i31 i26 i21 i18 i15 i14 i13 i9 i3 i1 i0	2 Merkmale

Tabelle 2.4–1: Verlauf der Instanzenbildung in einem Netz mit 50 Instanzenzellen und 6 Merkmalszellen bei gleichförmiger Erregung aller Merkmalszellen im Abstand von 80 Zeittakten

Simulation:

prostud1.bat [sspwin.exe Instanzenbildung-5 prostud1.net prostud1.ein Z 20 V]

Wie man es aufgrund des Inputs auch erwartet hätte, werden hier tatsächlich Instanzen für größere Merkmalsbündel früher gebildet als solche für kleinere. Es ist aber auch auffällig, daß eine – theoretisch mögliche – Instanz für 6 Merkmale *nicht* gebildet wird und die Zahl der Instanzen immer größer wird, je kleiner die Zahl der sie bildenden Merkmale ist. Das Balkendiagramm in Abbildung 2.4–2 zeigt einen annähernd exponentiellen Zusammenhang.

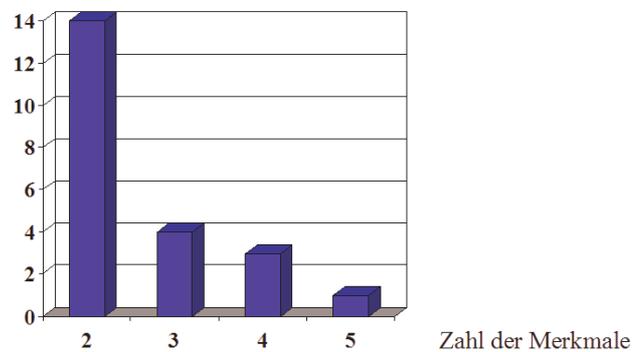


Abbildung 2.4–2: Balkendiagramm zur Abhängigkeit der Zahl gebildeter Instanzen von der Zahl der sie definierenden Merkmale

Das kann zunächst einmal als Hinweis dafür betrachtet werden, daß es eine Ressourcenbeschränkung gibt, was die Bildung sehr komplexer Instanzen angeht: Es ist nicht gewährleistet, daß sehr komplexe Konzepte überhaupt gebildet werden können ... unter der Voraussetzung, daß sie *in einem Schritt* gebildet werden müssen. Der Unterschied von einschrittiger zu mehrschrittiger Konzeptbildung ist in Abbildung 2.4–3 veranschaulicht. Die Konsequenzen der Möglichkeit einer mehrschrittigen Konzeptbildung sind nicht sofort klar und bedürfen einer ausführlicheren Diskussion.

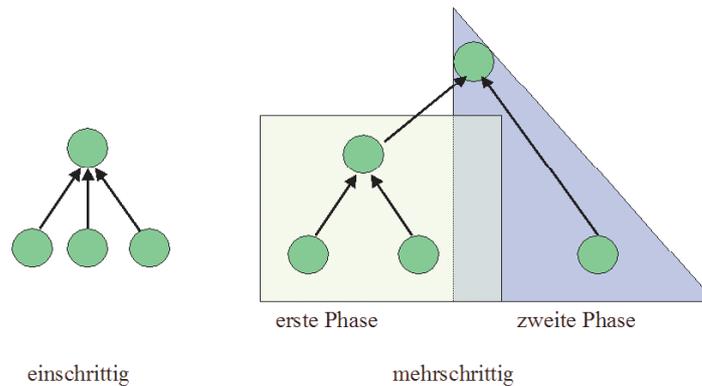


Abbildung 2.4–3: Einschrittige vs. mehrschrittige Konzeptbildung

Was hier als „mehrschrittige Konzeptbildung“ bezeichnet ist, bedeutet letztlich den Aufbau von Konzept*hierarchien*. An dieser Stelle ist deshalb ein kleiner Exkurs zum Thema Hierarchiebildung allgemein angebracht. Die Vorstellung von hierarchischen Strukturen ist in der Linguistik in mehreren Zusammenhängen anzutreffen. Am augenfälligsten ist der Bereich der Syntax. Argumente, die für eine hierarchische Beziehung zwischen verschiedenen syntaktischen Kategorien sprechen, sind so stabil, daß sie kaum ernsthaft angezweifelt werden können. Auch die Realität semantischer Hierarchien wird im allgemeinen nicht bezweifelt. Für beide Bereiche gibt es auch neurolinguistische Evidenzen. Für ein neuronales Modell ergibt sich allerdings sofort die Frage, wieviele Ebenen solche Hierarchien haben (dürfen) und wie diese Ebenen und der Zusammenhang zwischen ihnen prinzipiell in einer neuronalen Architektur realisiert zu denken sind.

Die Abbildung 2.4–4 bringt ein Schema zur Schichtung des Kortex. Nach allgemeiner Ansicht sind die Funktionseinheiten des Kortex (Zellen, die an der gleichen Verarbeitungsaufgabe innerhalb eines engen Zeitfensters beteiligt sind) senkrecht zur Oberfläche angeordnet. Wenn wir aber einen senkrechten Ausschnitt aus der Schichtung betrachten, so wiederholen sich hier nicht mehrfach gleiche Streifenmuster, sondern es ist offenbar so, daß der Kortex in der Senkrechten nur *eine* Verarbeitungsebene umfaßt, die sich aus unterschiedlichen Komponenten zusammensetzt.

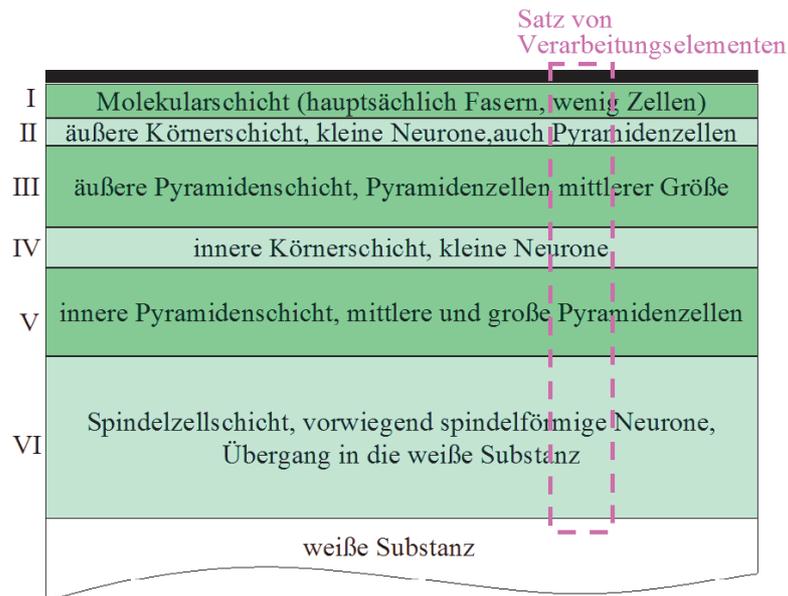


Abbildung 2.4–4: Schichtung des Kortex nach Angaben bei Schmidt & Thews (1985: 158); vgl. auch Klinke & Silbernagl (1996)

Das bedeutet, daß, wenn wir Hierarchien gleichartiger Verarbeitungsschritte und entsprechender Strukturen (also z. B. Konzepthierarchien) annehmen wollen, solche Hierarchien nur entstehen können, wenn die Kortexarchitektur „gefaltet“ ist, das heißt, wenn es möglich ist – und wenn die entsprechenden neuronalen Verbindungen vorhanden sind –, daß ein Verarbeitungsprozeß über mehrere der senkrechten Verarbeitungseinheiten nacheinander laufen kann. Bei dieser Annahme, die in Abbildung 2.4–5 schematisch dargestellt ist, ist dann auch die Zahl der Hierarchieebenen unkritisch, es ist aber wahrscheinlich, daß Beschränkungen, z. B. durch zeitliche Parameter, gegeben sind. (Vgl. Kochendörfer, 1997 und 2000.)

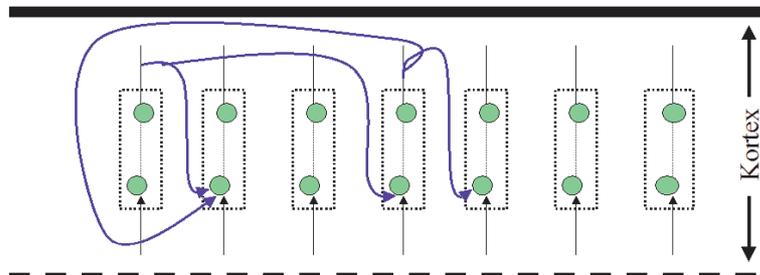


Abbildung 2.4–5: Schema zur „gefalteten“ Architektur des Kortex

Wir kehren an dieser Stelle zum Problem der Ressourcenbeschränkung bei der Bildung komplexer Konzepte zurück. Wie wirkt sich eine Ressourcenbeschränkung bei Annahme einer mehrschrittigen Konzeptbildung aus? Eine Argumentationshilfe gibt Abbildung 2.4–6:

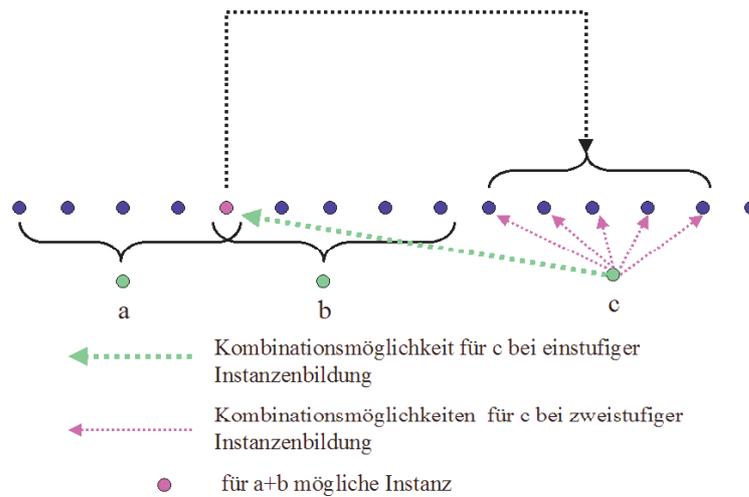


Abbildung 2.4–6: Schema zur mehrschrittigen Konzeptbildung; weitere Erläuterungen im Text

Die Abbildung 2.4–6 zeigt zwei Typzellen (Merkmale), die jeweils potentielle Verbindungen zu 5 Instanzenzellen haben (was natürlich eine unrealistisch geringe Zahl ist). Es wird angenommen, daß in diesem Fall gerade *eine* Instanz für die Kombination $a + b$ gebildet wird. Die Bildung einer Instanz für die Kombination $a + b + c$ ist also nur dann möglich, wenn das Merkmal c eine potentielle Verbindung mit dieser (potentiellen) Instanz für $a + b$ hat. Wenn wir dagegen annehmen, daß die Instanz für $a + b$ ihrerseits wieder Instanzen bildet, ist die Ausgangssituation für die Bildung der Instanz $a + b + c$ sehr viel günstiger.

In dem Simulationsexperiment zu Beginn dieses Abschnitts werden öfter zwei Instanzen für ein und dieselbe Zweierkombination von Merkmalen gebildet. Beispiele:

- für $a + f$ die Instanzen $i32$ und $i36$,
- für $a + c$ die Instanzen $i3$ und $i13$.

Es können ggf. sehr viele Instanzen für ein und dieselbe Merkmalskombination gebildet werden. Das führt zu einer weiteren Erhöhung der Kombinationsmöglichkeiten, wenn man eine mehrstufige Konzeptbildung zuläßt.

Diese Überlegungen haben prinzipielle Konsequenzen für Hypothesen bezüglich des Ablaufs der Konzeptentwicklung. Wenn der Fall eintritt, daß eine komplexe Instanz in einem Schritt nicht gebildet werden kann (und auch dann, wenn sie gebildet werden kann), ist es möglich, daß nach längerem Lernprozeß über mehrere Schritte komplexe Konzepte als Instanzenhierarchien aufgebaut werden. Da die Vernetzungskomplexität eine kritisch begrenzte Ressource ist, ist es für die Konzeptbildung wichtig, daß die Möglichkeit des mehrschrittigen Aufbaus genutzt wird. Je komplexer (= spezifischer und merkmalsreicher) ein Begriff ist, desto eher kann man annehmen, daß er schrittweise, also auch zeitlich in mehreren Phasen gebildet worden ist. Oder: Obwohl es nicht ausgeschlossen ist, daß einige komplexe Konzepte gerade in einem sehr frühen Entwicklungsstadium in einem Schritt gebildet werden, dürfte es doch der Regelfall sein, daß die Vorstellung von der schrittweisen Verfeinerung der Konzepte die Entwicklung korrekt beschreibt.

Wenn wir hier einmal etwas kurzschlüssig Konzepte mit Wortbedeutungen gleichsetzen, kann man darauf hinweisen, daß im Spracherwerb tatsächlich sehr verallgemeinerte Wortbedeutungen („Wauwau“ für HUND

und KUH) und sehr spezielle Wortbedeutungen („Blume“ für die Rose im Vorgarten) beobachtet werden können. Die neuronale Modellbildung erklärt sowohl die häufigeren Übergeneralisierungen als auch die selteneren Überdiskriminierungen im Spracherwerb.

An dieser Stelle sind zwei ergänzende Hinweise am Platz. Der eine betrifft die Beschränkung des verwendeten Simulationsexperiments. Das Simulationsexperiment ging davon aus, daß der Input eine größere Anzahl von Merkmalen konstant in ausreichend dichter Wiederholung liefert. Die Realität ist aber ein ständiger Wechsel des Merkmalsangebots. Man muß zufrieden sein, wenn wenige Merkmale ausreichend häufig auftreten. Was ergibt sich unter dieser Bedingung?

Wir verwenden zur Demonstration eine Simulation, bei der gegenüber der bisher in diesem Abschnitt verwendeten nur der Input so verändert ist, daß abwechselnde Dreiergruppen aus den 6 Inputmerkmalen gebildet sind:

```
a 0 b 0 c 0
b 80 c 80 d 80
c 160 d 160 e 160
d 240 e 240 f 240
a 320 b 320 c 320
b 400 c 400 d 400
c 480 d 480 e 480
d 560 e 560 f 560
a 640 b 640 c 640
b 720 c 720 d 720
c 800 d 800 e 800
d 880 e 880 f 880
a 960 b 960 c 960
*** 3000
```

Simulation:

```
prostud2.bat [sspwin.exe Instanzenbildung-6 prostud1.net prostud2.ein Z 15 V]
```

Bei dieser Simulation werden nur noch in Zeittakt 804 zwei Instanzen gebildet: *i19* und *i16*, jeweils für die drei Merkmale *c*, *d* und *e*, in beiden Fällen mit der gleichen charakteristischen Abstufung der Synapsengewichte (c 50,86% + d 46,36% + e 29,74% des Schwellenwerts). Das ist die zuletzt eingegebene Kombination; *e* war im Zeittakt 804 5mal, *d*

8mal und c 9mal in der Eingabe. Konzepte für überlappende Merkmalsbereiche werden damit zuerst erworben. Sie können später, also in einem Verfahren der mehrstufigen Konzeptbildung, weiter spezialisiert werden.

Der zweite ergänzende Hinweis betrifft das Schicksal der früh (einschrittig) gebildeten komplexen Konzepte. Sie dürften häufig Anlaß für spätere Revisionen geben. Bei früh und rasch gebildeten komplexen Konzepten ist die Wahrscheinlichkeit groß, daß das ihnen zugrunde liegende Objekt oder Verhalten aus irgendwelchen Gründen aus dem Wahrnehmungsbereich verschwindet. Das Konzept wird ggf. als Ganzes vergessen: die Synapsen werden zurückgebildet, allerdings nur solche, die wenig frequente Komponenten des Konzepts betreffen. Der Vergessensprozeß bewirkt, daß die Instanz irgendwann wieder als potentielle Instanz für Lernprozesse zur Verfügung steht. In dem Augenblick, in dem die Instanz wieder als potentielle Instanz zur Verfügung steht, kann sie zu einer Instanz vorzugsweise für eine Kombination derjenigen Komponenten werden, deren Synapsen nicht abgebaut worden sind. Das kommt einem Übergang von einem spezielleren zu einem allgemeineren Konzept gleich, ist also eine Art Abstraktionsprozeß. Es sollte beachtet werden, daß solche Revisionsprozesse sehr langsam sind. Außerdem ist anzunehmen, daß parallel, auch solange das komplexe Konzept noch existiert, Instanzen für frequentere Komponentenbündel gebildet werden.

2.5 Prototypizität

Die im vorangegangenen Abschnitt verwendeten Simulationsexperimente suggerieren, daß es möglich ist, Konzepte als Bündel notwendiger und hinreichender Bedingungen zu verstehen. Wenn man diese Vorstellung mit der realen Kategorisierung und den zugrundeliegenden „natürlichen“ Objekten konfrontiert, kann man leicht feststellen, daß hier Probleme auftreten. Bei den Objekten in Abbildung 2.5–1 ist es sicherlich unmöglich, einen einheitlichen, abgeschlossenen Merkmalsatz für das Konzept KANNE anzugeben, der eine stabile Abgrenzung zu dem Konzept KRUG leisten würde. Beobachtungen in psychologischen Experimenten zur Kategorisierung zeigen, daß Versuchspersonen in der Lage sind, Exemplare als „bessere“ oder „schlechtere“ Vertreter einer Kategorie zu bewerten, was zu der Auffassung geführt hat, daß Kategorien prinzipiell unscharf begrenzt sind (der Krug als relativ schlechtes Exemplar einer Kanne). Die „Prototypentheorie“ der Kategorisierung ist

ein Versuch, mit solchen Problemen zurechtzukommen (vgl. insgesamt Kleiber, 1998; Rosch, 1975; Rosch & Mervis, 1975; Lakoff, 1987; Taylor, 1995).



Abbildung 2.5-1: Schwierige Exemplare

Eine neuronale Theorie der Konzeptbildung muß in der Lage sein, den beschriebenen Phänomenen Rechnung zu tragen. Vom Standpunkt der neuronalen Modellierung her betrachtet, fällt eine vielfach favorisierte Lösung des Kategorisierungsproblems, die Kategorisierung durch *holistischen* Vergleich mit einem Prototypen (vgl. Aitchison, 1997), sofort aus. Konzepte sind zwar in gewissem Sinne holistisch, wenn man die Großmutterzellen-Theorie akzeptiert; ein Vergleich muß sich aber immer auf definierende Komponenten beziehen.

Bei der Suche nach einer Lösung kann man sich auf den Standpunkt stellen, daß die Konzeptbildungs-als-Instanzenbildung, falls sie korrekt ist, letztlich von sich aus aufgrund ihrer Beschränkung durch die angeborenen neuronalen Grundlagen und unter der Voraussetzung, daß diese neuronalen Grundlagen richtig interpretiert worden sind, eine „prototypisch“ funktionierende Kategorisierung gewährleisten müßte.

Das folgende Simulationsexperiment verwendet die neuronale Architektur des vorigen Abschnitts mit den Wiederholungen des vollen Merkmalsatzes als Input, setzt aber die Lernrate von 8% auf 9,2% des Schwellenwerts herauf.

Simulation:

prostudx.bat [sspwin.exe Prototypen prostudx.net prostudx.ein Z 20 V]

Das in Tabelle 2.5-1 festgehaltene Ergebnis entspricht zunächst insofern den Erwartungen, als die Instanzen schneller aufgebaut werden.

Zeittakt	Instanzen	Zahl der Merkmale
164	i28 i27 i19 i16	4 Merkmale
244	i29 i14 i8 i2	3 Merkmale
484	i47 i43 i36 i32 i31 i26 i21 i18 i15 i14 i13 i9 i3 i1 i0	2 Merkmale

Tabelle 2.5-1: Verlauf der Instanzenbildung in einem Netz mit 50 Instanzenzellen und 6 Merkmalszellen bei gleichförmiger Erregung aller Merkmalszellen im Abstand von 80 Zeittakten; Lernrate 9,2% des Schwellenwerts

Eine Besonderheit zeigt aber jetzt die Instanz *i16*. Sie hat Verbindungen zu den Merkmalen *a*, *c*, *d*, *e* und *f*. Alle Verbindungen haben eine Stärke von 27,2% des Schwellenwerts. Das bedeutet, daß, obwohl es fünf Verbindungen gibt, doch nur vier erregt sein müssen, um ein Aktionspotential auf *i16* auszulösen (vgl. die Tabelle). Noch interessanter: Es ist gleichgültig, welche vier der fünf Verbindungen in einem speziellen Fall erregt sind.

Das Konzept, das durch die Instanz *i16* gebildet wird, ist damit variabel bzw. „unscharf“. Am Beispiel der Kategorie KANNE: Ein Exemplar der Kategorie Kanne kann entweder aus Porzellan, mit Tülle, für heiße Getränke, mit Deckel und mit Henkel sein, oder aus Glas, mit Tülle, für heiße Getränke, mit Deckel und mit Henkel; man wird aber auch eine Kanne ohne Deckel, aus Porzellan, mit Tülle und Henkel als Kanne erkennen usw.

Wenn man sich genauer mit den Hintergründen dieser Besonderheit der Instanzenbildung beschäftigt (vgl. Kochendörfer, 1997 und 2000), stellt man fest, daß die prototypische Organisation zwar nicht notwendig entsteht, daß sie aber auch nicht systematisch vermieden werden kann (falls man ein Interesse daran hätte). Die Bildung unscharfer Kategorien ist also einfach ein (äußerst günstiges) Abfallprodukt der für ein lokalistisches System typischen Art des Erwerbs von Konzepten.

Damit ist allerdings noch nicht erklärt, wie es zu den Urteilen über „bessere“ und „schlechtere“ Exemplare einer Kategorie kommt. Das bessere Exemplar kann nicht das sein, das einen einzelnen Konzeptknoten mit mehr Merkmalen versorgt (dem Konzeptknoten ist es gleichgültig, wieviele Merkmale ihn zum Feuern bringen). Wenn viele Merkmale der Kategorie in einem Exemplar vorhanden sind und das Exemplar eine

relativ hohe Auftretenshäufigkeit hat, gibt es aber mehr aktivierte Instanzen davon und damit mehr Chancen der Weiterverarbeitung. Auf dieser Tatsache kann die Einschätzung der Exemplarqualität beruhen. Simulationsbeispiele dazu finden sich in Kochendörfer (2000). Der Bewertungsvorgang selbst setzt in jedem Fall Vorstellungsprozesse voraus, von denen im folgenden Abschnitt die Rede sein wird.

Schlußfolgerungen: In einem neuronalen lokalistischen System kann die Kategorisierung nur durch Aktivierung von Merkmalspezialisten erfolgen. Im Konzepterwerb entstehen zwangsläufig (aber nicht immer) prototypisch organisierte Kategorien. Es gibt keinen unüberbrückbaren Gegensatz zwischen Merkmalssemantik und Prototypensemantik. Anders als in der klassischen Merkmalssemantik sind die Merkmale allerdings gewichtet. Ein Summationsprozeß führt zur Kategorisierung! „Gute“ Exemplare sind solche, die möglichst viele Instanzen erregen. Trotz der Variabilität der Konzepte ist die Einheit des Konzepts nicht in Gefahr.

2.6 Vorstellungen

Konzepte (vollständig) erworben zu haben bedeutet auch, sie zum Gegenstand von Vorstellungen machen zu können. Für die Modellierung von Vorstellungen sind folgende Stichpunkte wesentlich:

- Vorstellungen setzen Erfahrungen voraus, Spuren von Erfahrungen können durch den Vorstellungsprozeß auch kombiniert bzw. manipuliert werden.
- Die Produktion von Vorstellungen erfolgt gezielt, nicht über einen Trial-and-error-Prozeß (= orientiert sich an Zusammenhängen, die über Erfahrungen erworben worden sind).
- Es wird ein „Zugriff“ von „innen“ nach „außen“ (= top down) vorausgesetzt.
- Alle Verbindungen im Gehirn sind unidirektional: also ist eine Parallelisierung von Bottom-up-Bahnen und Top-down-Bahnen erforderlich.

Für ein lokalistisches System gilt zusätzlich:

- Eine bloße Top-down-Aktivierung des Konzeptknotens (= einer entsprechenden top-down orientierten Großmutterzelle) genügt nicht (bringt keine Vorstellung mit Eigenschaften zustande).
- Vorstellungen müssen als Ersatzwahrnehmungen betrachtet werden.

Man vergleiche Kosslyn (1994) zu visuellen Vorstellungen: Das Generieren von Vorstellungen ergibt in PET-Experimenten (PET = Positronen-Emissions-Tomographie) Aktivierungen im primären visuellen Kortex (V1), die topologisch mit den Vorstellungen assoziiert sind. Verletzungen im primären visuellen Kortex stören Vorstellungen in spezifischer Weise.

Obwohl die Erregung einer top-down orientierten Großmutterzelle noch keine Vorstellung zustande bringt, muß man doch annehmen, daß sie der Ausgangspunkt des Prozesses ist. Die Top-down-Erregung läuft dann über die entsprechenden Bahnen in Richtung Sinnesperipherie. Eine Ersatzwahrnehmung kann daraus nur werden, wenn man annimmt, daß es eine Rückspiegelung in das Wahrnehmungssystem gibt. Da Konzepte gegenüber originaler Wahrnehmung immer abstrahiert sind, hat die Ersatzwahrnehmung nicht die gleiche „Buntheit“ wie eine originale Wahrnehmung. Die Idee der Rückspiegelung ist in der Linguistik als Voraussetzung für das Monitoring (z. B. Levelt, 1989) eine notwendige Annahme. Die Abbildung 2.6–1 gibt eine schematische Darstellung dieser Verhältnisse.

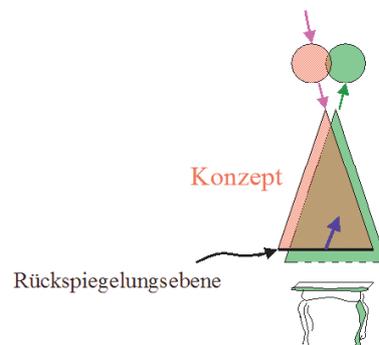


Abbildung 2.6–1: Schema eines Vorstellungsvorgangs mit Rückspiegelung. Die Kegel der Verbindungen, die bottom-up zu der die Konzept-einheit bildenden Großmutterzelle und der Verbindungen, die von der top-down gerichteten entsprechenden Zelle in Richtung Peripherie führen, sind exakt parallel zu denken. Vgl. Kochendörfer (2002).

Das Lernen von Konzepten muß, um Vorstellungen zu ermöglichen, den Aufbau von Top-down-Bahnen einschließen. Zellen des Top-down-Systems heißen im folgenden „prädiktive Zellen“ (nach einer ihrer Funktionen). Das Top-down-System heißt „prädiktives System“.

Wenn der bottom-up gerichtete Instanzenbildungsprozeß divergente Strukturen erzeugt, da ja eine Komponente in verschiedenen Konzepten vertreten sein kann, sind entsprechende Top-down-Bahnen konvergent. In Abbildung 2.6-2 muß *entweder* die Verbindung a *oder* die Verbindung b das Feuern der prädiktiven Zelle *p* auslösen. Prädiktive Zellen sind ODER-Zellen. Damit ist der koinzidenzbasierte Lernprozeß der Instanzenbildung ungeeignet für den Aufbau dieser Verbindungen.

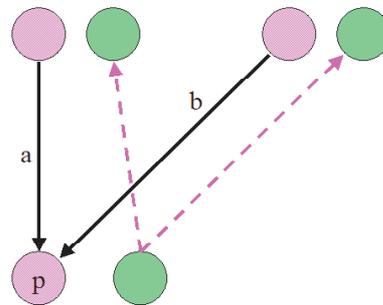


Abbildung 2.6-2: Parallele Organisation von Bottom-up- und Top-down-Strukturen

Da ODER-Zellen Verbindungen aufbauen müssen, nachdem sie gefeuert haben, und eine andauernde Lernbereitschaft den gewünschten Effekt nicht bringt, muß die Begrenzung der Lernbereitschaft auf andere Weise gesteuert sein als bei instanzenbildenden Zellen. Es kommt letztlich nur ein Einfluß „von dritter Seite“ in Frage: Die ODER-Zelle ist lernbereit, wenn sie über eine feste Verbindung erregt worden ist. Diese feste Verbindung muß funktional etwas mit den aufzubauenden Verbindungen zu tun haben. Das bedeutet im Falle der prädiktiven Verbindungen, daß sie von den bottom-up-orientierten Zellen ausgehen sollte, um die Parallelität der beiden Aktivationsrichtungen zu gewährleisten (siehe Abbildung 2.6-3).

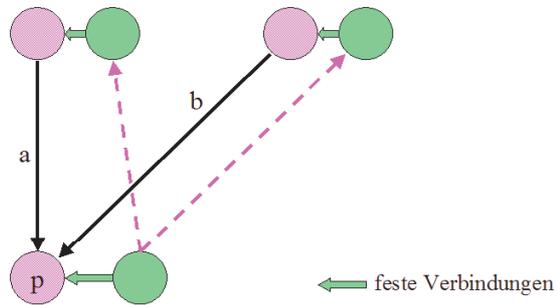


Abbildung 2.6-3: Bottom-up- und Top-down-Strukturen mit festen Verbindungen

Bei dieser Anordnung entstehen Top-down-Verbindungen z. B. bei zwei rasch aufeinanderfolgenden Bottom-up-Erregungen („Doppelwellentheorie“), wie die vereinfachende Simulation (Abbildung 2.6-4) demonstrieren soll.

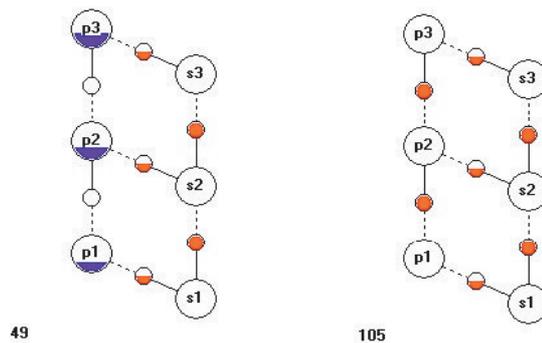


Abbildung 2.6-4: Stark vereinfachende Simulation zur Bildung von Top-down-Verbindungen. Links: Wirkung eines einzelnen Impulses auf s_1 in Zeittakt 0; die Top-down-Verbindungsgewichte sind unverändert. Rechts: Wirkung zweier Impulse in kurzem Abstand (Zeittakt 50 und Zeittakt 63). Die Top-down-Verbindungsgewichte erhalten überschwellige Werte.

Simulation:

topdx.bat [sspin.exe Top-down-Verbindungen topdx.net topdx.ein Z 50 V]

Technische Hinweise zum Verständnis der Netzdefinition:

Die Lernbereitschaft der Zelle wird wieder, wie bei der Instanzenbildung, durch die Parameter „Zellplastizität“ und „Zunahmerate der Zellplastizität pro Spike“ gesteuert. Der Parameter Zellplastizität kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Ein hoher Wert (in der Simulation) bedeutet eine hohe Lernbereitschaft. Der Anfangswert ist ein Wert nahe Null. Der Parameter „Zunahmerate der Zellplastizität pro Spike“ ist positiv und nahe 1, das heißt, beim Feuern der Zelle wird die Lernbereitschaft drastisch erhöht. Sie sinkt aber mit der Zeit („Abnahmerate der Zellplastizität pro Zeittakt“) rasch ab.

Dieses Beispiel soll zeigen, daß es prinzipiell möglich ist, die erforderlichen prädiktiven Verbindungen durch Lernvorgänge aufzubauen. Selbstverständlich wird, wie bei der Instanzenbildung, eine ausreichende Zahl potentieller Verbindungen vorausgesetzt. Realistischere Simulationen werden später konstruiert.

2.7 Relationale Konzepte

Es ist eine Standardkritik gegenüber Theorien, die Konzepte aus Komponenten aufgebaut denken, daß damit zwar konkrete Objekte der Wahrnehmung erfaßt werden können, es aber Schwierigkeiten mit Relationen gibt, die z. B. sprachlich durch Verben erfaßt werden.

Um dieses Problem zu lösen, ist es erforderlich, innerhalb des neuronalen Netzes, das eine Großmutterzelle definiert, auch relationale Teilnetze zuzulassen, wie in Abbildung 2.7–1 schematisch angedeutet.

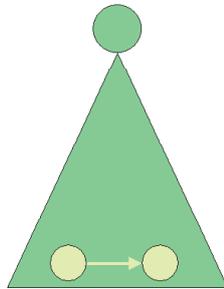


Abbildung 2.7–1: Komplexe Konzepte können Relationen einfacherer Konzepte enthalten.

Zwei Fragen werden durch diese bewußt wenig spezifizierte Konstruktion aufgeworfen:

- Wenn der Pfeil in dem Schema der Abbildung 2.7–1 eine Relation ausdrücken soll, was hat man sich darunter in einer neuronalen Architektur vorzustellen?
- Wie kann eine Relation, die ja aus mehreren Komponenten besteht, neuronal an eine Großmutterzelle als holistische Konzeptrepräsentation gebunden werden?

Zur ersten Frage: Relationen sind in semantischen Netzen immer mit einer Spezifikation versehen. In propositionaler Notationsweise entspricht dieser Spezifikation das Prädikat. Das Prädikat spannt ein Raster von Rollen-Positionen auf, die durch Argumente ausgefüllt werden können bzw. müssen. Das heißt, die Wahl eines Prädikats hat Beschränkungen bezüglich der Wahl der Argumente zur Folge. Dasselbe gilt analog, wenn man von den Argumenten ausgeht, die bestimmte Prädikate zulassen und andere ausschließen. Abhängigkeiten dieser Art werden in unseren Modellen durch Sequenzbeziehungen dargestellt. Die dazu benötigte Technik wird unten in Kapitel 4 eingeführt.

Zur zweiten Frage: Wenn Relationen durch Sequenzbeziehungen dargestellt werden sollen, das heißt definitionsgemäß durch Beziehungen zwischen Elementen, die in der Verarbeitung einen gewissen zeitlichen Abstand haben, muß die Zelle, die eine solche Relation holistisch zusammenfaßt, eine ODER-Zelle sein. Ein Konzept kann dann nicht ausschließlich unter Verwendung von instanzenbildenden Prozessen modelliert werden, sondern es sind mehrere unterschiedliche Zellfunktionen bzw. Zelltypen beteiligt. Wenn man die im vorigen Abschnitt behandelten Top-down-Strukturen hinzunimmt, wird immer deutlicher sichtbar, daß komplexere Zellstrukturen erforderlich sind, um die Gesamtheit der Repräsentations- und Verarbeitungsprozesse zu gewährleisten. Auch hier können die technischen Details erst in Kapitel 4 eingeführt werden.

Wenn wir die Lösung der technischen Probleme voraussetzen, kann angenommen werden, daß im Prinzip beliebige Ausschnitte eines „semantischen Netzes“, wie in Abbildung 2.7–2 angedeutet, ein komplexes Konzept bilden können. (Man beachte, daß in der Abbildung darauf verzichtet worden ist, die übliche Notation für semantische Netze durch ein neuronales Äquivalent zu ersetzen.)

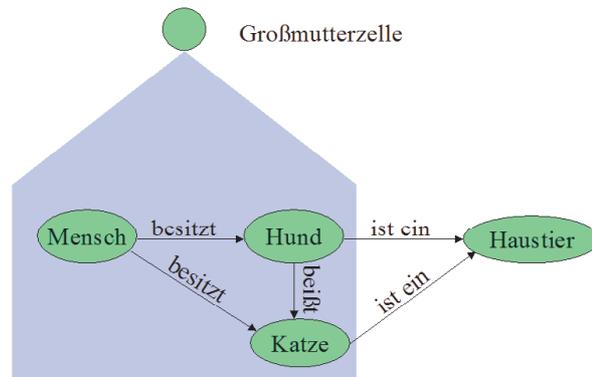


Abbildung 2.7–2: Konzept, das einem Ausschnitt aus einem semantischen Netz entspricht

Diese Konstruktion erlaubt es auch, das Zustandekommen „abstrakter“ Konzepte zu verstehen, ohne das Grundprinzip der Definition von Konzepten durch neuronale Verbindungen mit der Sinnesperipherie zu verletzen. Schon verbale Konzepte werden als relativ abstrakt empfunden. Wenn man einen naiven Sprachbenutzer fragt, was „Frieden“ sei, wird man z. B. als Antwort bekommen: „Frieden ist, wenn... [es folgt eine Aufzählung von Szenen, die etwas mit Frieden zu tun haben]“. Man kann hier eine direkte Spiegelung der internen Repräsentation vermuten. Die aufgezählten Informationen müssen ja tatsächlich top-down über den Konzeptknoten aktiviert worden sein, also eine Art semantisches Netz bilden.

Auch für abstrakte Konzepte gilt, daß sie über Verbindungen zur Sinnesperipherie definiert werden (gegen z. B. Bloom, 1999).

2.8 Redundanz und Chaos

Es gibt eine Reihe von Leitbegriffen in der modernen Linguistik, die der Sprache ein hohes Maß an Ordnung und Sparsamkeit zuschreiben. Beispiele sind die Begriffe Struktur, Regel, Prinzip usw. Wenn man sich andererseits die neuronale Realität des Gehirns, insbesondere das für Repräsentationen verantwortliche Verbindungsgeflecht zwischen den Neu-

ronen vergegenwärtigt, wird man nicht von einer einfach nachvollziehbaren Ordnung in diesen Strukturen sprechen wollen. Das mag als erster vorläufiger Hinweis darauf gewertet werden, daß einige Standards moderner Sprachtheorie relativiert werden müssen.

Von den Bedingungen der Instanzenbildung her kann diese Spur weiter vertieft werden: Da nicht vorhersehbar ist, welche Verbindungen zur Konzeptbildung und damit zur Anpassung des Individuums an die jeweilige Umwelt gebraucht werden, und da eine regelmäßige Verbindung aller mit allen Zellen ganz bestimmt nicht ökonomisch wäre (das heißt, den Evolutionsprozeß nicht überstanden hätte), ist ein beliebiges (chaotisches) Muster der potentiellen instanzenbildenden Verbindungen die naheliegende Konsequenz.

Das Chaos der potentiellen instanzenbildenden Verbindungen wird ergänzt durch eine notwendige Streuung der Zellparameter, z. B. der Parameter, die die Geschwindigkeit des Lernprozesses steuern. Die in diesem Kapitel verwendeten Simulationen zur Instanzenbildung arbeiten teilweise mit einer Streuung der entsprechenden Werte innerhalb bestimmter Grenzen.

Man sollte nicht vergessen, daß auch die Buntheit und Nicht-Überschaubarkeit der Umwelt und der Ereignisse in ihr ein chaotisches Element sind.

Unter diesen Voraussetzungen ist auch das Ergebnis der Instanzenbildung und damit die Gestalt der Konzepte bis zu einem gewissen Grad chaotisch. Ein Beispiel ist das Konzept TASSE, das in Abbildung 2.8–1 aus Kochendörfer (2000) übernommen ist. Es handelt sich um das Teilergebnis eines Simulationsexperiments, in dem die Konzepte TASSE und BECHER gelernt werden, aufgrund der Eingabe von Kombinationen der Merkmale *unt* (= Untertasse), *hen* (= Henkel), *fla* (= relativ flach), *kaf* (= Kaffee), *hoc* (= relativ hoch) und *trn* (= Trinkgefäß). Da die verwendete Architektur „gefaltet“ ist, entstehen Instanzen von Instanzen. Das potentielle Verknüpfungsmuster und die Streuung der Lernparameter sind zufällig bestimmt.

Von der reichlich „zufälligen“ Struktur abgesehen, ist auch eine hohe Redundanz der Repräsentation unverkennbar. Man kann den Komplex *i2* ganz wegnehmen, ohne daß sich das Konzept der Tasse verändert (das Merkmal *kaf* ist irrelevant). Auch weitere Änderungen haben noch nicht zur Folge, daß eine Tasse nicht als solche erkannt werden könnte (Prototypizität).

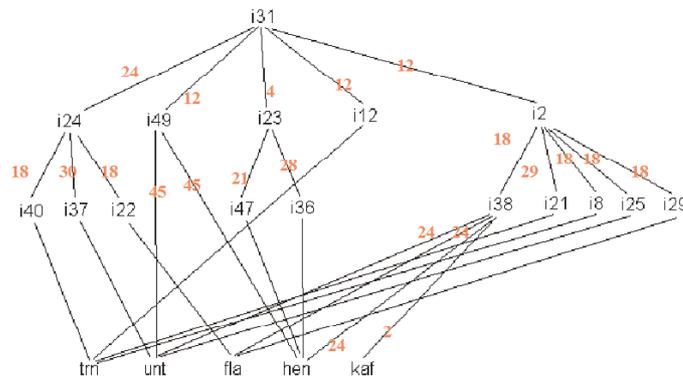


Abbildung 2.8–1: Eine Instanz des Konzepts TASSE (vereinfachtes Schema, die Knoten repräsentieren nicht einzelne Zellen, sondern kleine Zellkomplexe). An den Kanten sind Synapsengewichte notiert, die sich auf einen Schwellenwert von 50 beziehen. Unbezeichnete Verbindungen haben überschwellige Gewichte.

Wenn lokalistische neuronale Modelle kognitiver Leistungen entworfen werden, sind sie oft relativ „einsträngig“, das heißt wenig redundant. Natürliche Lernprozesse liefern dagegen – wenn auch nicht unter allen Umständen – hoch redundante Konzeptrepräsentationen. Man beachte, daß das Modell des Konzepts TASSE insofern noch vereinfacht ist, als man einzelne Verbindungen des Modells noch als Synapsenbündel re-interpretieren muß.

Redundanz ist notwendige Voraussetzung für die Stabilität lokalistischer neuronaler Repräsentationen. Sie ist eine Teilquelle für die in „bildgebenden Verfahren“ beobachtete relativ weitgestreute Hirnaktivität auch bei einfachen Testaufgaben.

Redundanz bedeutet nicht den Verzicht auf vereinfachende Abstraktion. Vereinfachende Abstraktion der Wahrnehmung ist die Basis jeder Verhaltenssteuerung. Eine solche Abstraktion wird durch den Vorgang der Konzeptbildung-als-Instanzenbildung selbstverständlich geleistet. Nicht korrekt ist aber in jedem Fall die Idee, daß die größtmögliche Generalisierung (etwa in dem Sinne, in dem dieses Konzept in der generativen Sprachtheorie verwendet wird) ein allgemein gültiges Grundprinzip der kognitiven Repräsentation und Verarbeitung ist, und damit auch den Verlauf und das Ergebnis des Spracherwerbs charakterisiert.

3 Wahrnehmung und Produktion von Sprachlauten, die Bedeutung der Lallphase im Spracherwerb

3.1 Verarbeitungsstrukturen auf der Ebene einzelner Sprachlaute (Perzeption)

Die Kennzeichnung „lautliche Ebene“ im Sprachverstehen und in der Sprachproduktion bezieht sich auf Repräsentationen und Prozesse zwischen Ohr und (vollzogenem) perzeptionsseitigem Lexikonabgleich bzw. zwischen produktionsseitigem Lexikonzugriff und motorischer Peripherie. Die Identifikation der Endpunkte bei dieser Eingrenzung ist nicht ganz unkritisch.

Wenn man das Ergebnis des Lexikonabgleichs als Umschlag einer ausdrucksseitigen in eine inhaltsseitige Repräsentation versteht, ist auf den ersten Blick diese Grenze für lautliche Erscheinungen per Definition selbstverständlich. Man beachte aber, daß nicht alle ausdrucksseitigen Elemente, z. B. nicht die Sequentialität, mit dem vollzogenen Lexikonabgleich wirkungslos werden. Genauso ist Ausdrucksseitiges in der Produktion schon vor dem Lexikonzugriff konstitutiv. Man beachte auch, so banal diese Feststellung ist, daß man es einem einzelnen neuronalen Aktionspotential nicht ansieht, ob es ein Phonem oder eine Nominalphrase signalisiert. Also bleibt vielleicht als brauchbares Charakteristikum des mit dem Lexikonabgleich verbundenen Ebenenwechsels nur, daß unterhalb des Lexikons elementare Sequenzeinheiten analysiert werden, die ihrerseits nicht wieder in Sequenzen zerfallen und also Sequentialität im Sinne einer Abfolge von linguistischen Einheiten erst mit den

Lexikonstrukturen erreicht wird. Einige Folgen einer solchen (vorläufigen) Annahme sind, daß Phone und Phoneme als nicht-sequentielle Einheiten in diesem Sinne betrachtet werden müssen, womit z. B. Diphthonge nur noch biphonematisch gewertet werden können, und Laute, die akustisch Verläufe einschließen, z. B. Plosive, als nicht-sequentiell erscheinen. Wenn wir dieselbe Idee auf die Produktion übertragen, sind die motorischen Verläufe ebenfalls teilweise als nicht-sequentiell (wieder in dem speziellen Sinn) zu erklären. Silbenstrukturen sind ein besonderes Problem, auf das in Kapitel 7 näher eingegangen wird.

Was die Peripherie als natürliche „äußere“ Grenze für das Lautkonzept angeht, so ist diese Grenzziehung in dem Sinne problematisch, als sowohl die akustische (sensorische) als auch die artikulatorische (motorische) Peripherie natürlich nicht ausschließlich und wahrscheinlich nicht einmal hauptsächlich sprachlich bestimmt sind. Wo beginnt der Input, sprachspezifisch zu werden, und wo hört der Output auf, sprachspezifisch zu sein? Wir werden am Ende dieses Abschnitts auf diese für die Klärung von Spracherwerbsprozessen und -bedingungen wichtige Frage zurückkommen und versuchen zunächst, etwas mehr Details zur Analyse der Verarbeitungstrecke zwischen der auditiven Peripherie (dem Ohr) und dem Lexikonabgleich im Kortex zusammenzutragen. Dazu dient zunächst eine Rückbesinnung auf das Frequenzargument von Abschnitt 2.2.

Das Frequenzargument enthält stichwortartig folgende Punkte:

- Außerhalb der primären Areale (im Assoziationskortex) sind die maximalen Frequenzen an einzelnen Neuronen größenordnungsmäßig 10–30 pro Sekunde.
- Es können 10–20 Phoneme (als klassische linguistische Einheiten gezählt) pro Sekunde artikuliert und verstanden werden; also ist Frequenzkodierung in der zentralen Verarbeitung unwahrscheinlich. Es gilt ausschließlich das Prinzip der Einzelimpulskodierung.
- Im Ohr und am Muskel treten höhere neuronale Impulsraten auf, sie dienen nachweislich der Kodierung von Intensitäten. Hier ist also Frequenzkodierung möglich und manifest.
- Selbst dort, wo Frequenzkodierung nachgewiesen ist, werden nicht alle informativen Aspekte frequenzkodiert, vielmehr gilt überall das lokalistische Kodierungsprinzip zusätzlich.

Ergänzend müssen die Ergebnisse aus den Simulationen zur Instanzenbildung beachtet werden: Instanzenbildung scheint nur möglich zu sein unter der Annahme der Einzelimpulskodierung (vgl. Abschnitt 2.3). Daraus ergeben sich weitere Folgerungen für die Repräsentation und die Prozesse von Phonologie und Phonetik:

Da niemand einen weltweit gültigen Satz von *Phonemen* für angeboren hält, müssen wir, um die entsprechenden Lernprozesse zu ermöglichen, annehmen, daß Phoneme einzelimpulskodiert sind.

Letzteres setzt natürlich voraus, daß man überhaupt – anders als die generative Phonologie z. B. bei Chomsky & Halle (1968) – Phoneme als Einheiten akzeptieren möchte und nicht die Phonemschreibung nur als bequeme Abkürzung für die Notation von Merkmalsbündeln sieht. Die unten in Kapitel 4 dargestellte Struktur des Lexikons baut auf Phonemen-als-Einheiten auf. Es ist in Kochendörfer (1997: 88) argumentiert worden, daß lexikalische Ausdruckssequenzen in anderer Weise nicht gut funktionieren können. Man muß auch, wieder im Vorgriff auf Argumente, die erst später angesprochen werden, beachten, daß die Lernvorgänge, die lexikalische Ausdrucksseiten betreffen, durch die laut- oder vielleicht auch silbenbezogenen Aktivitäten der Kinder in der Lallphase vorbereitet werden, was ebenfalls für Phoneme als Einheiten spricht. Schließlich ist, bei der Annahme, daß der Mechanismus der Konzeptbildung überall, also auch auf lautlicher Ebene gilt, das Entstehen von Phonemkonzepten unvermeidlich.

Die Basis für die Auflösung der Einheit des Phonems in der generativen Sprachtheorie sind Einfachheitsüberlegungen, die in das Prinzip münden, daß alles, was regelhaft ist, auch durch eine Regel ausgedrückt werden muß. Es ist ein Verdienst konnektionistischer Arbeiten wie Rumelhart & McClelland (1986), gezeigt zu haben, daß regelhaftes Verhalten auch zustande kommt in Strukturen, in denen Repräsentationen von Regeln nicht nachweisbar sind. Oben in Kapitel 2 ist außerdem gezeigt worden, daß neuronale Verarbeitung zwingend auf eine gewisse Redundanz angewiesen ist, so daß alle Ökonomieüberlegungen prinzipiell relativiert erscheinen.

Dem phonologischen Instanzenbildungsprozeß können nicht intensitätskodierte Merkmale zugrunde liegen, der Instanzenbildungsprozeß würde nicht funktionieren (siehe oben). Wenn überhaupt Merkmale beim Lernen von Phonemen eine Rolle spielen sollen – und das entspricht einem normalen Konzeptbildungsprozeß – dann müssen die *phonologischen Merkmale* ebenfalls einzelimpulskodiert sein.

Da an der Peripherie aber Intensitätskodierung belegt ist und selbstverständlich Phoneme (wie alle Konzepte) durch ihre Bindung an die

Peripherie definiert sein müssen, werden wir dort intensitätskodierte („analoge“) *phonetische Merkmale* annehmen. Wenn wir keinen neuronalen Lernprozeß formulieren können, der Bündel frequenzkodierter Merkmale zur Definition von einzelimpulskodierten Merkmalen verwendet, ist eine Eins-zu-eins-Zuordnung von phonetischen zu phonologischen Merkmalen erforderlich.

Daraus wiederum ergibt sich die Annahme, daß die Merkmalsausstattung sowohl auf phonetischer als auch auf phonologischer Ebene – für die Sprachperzeption (!) – angeboren ist. Die Spracherwerbsforschung an Säuglingen belegt genau dies (Kuhl & Meltzoff, 1997: 30):

„At birth, infants perceptually partition the acoustic space underlying phonetic distinctions in a language-universal way. They are capable of discriminating all phonetically relevant differences in the world’s languages.“

Auch die nächste Schlußfolgerung ist notwendig: Weil, um das gängigste Beispiel zu verwenden, erwachsene Japaner /ra/ und /la/ nicht diskriminieren können, muß ein Vergessensprozeß stattgefunden haben, der zu der beobachteten Anpassung an die Umgebungssprache geführt hat. Ein sprachspezifischer Zuschnitt der Lautdiskriminierung ist schon im Alter von 6 Monaten feststellbar.

Vergessen kann überall im zentralen Nervensystem durch Abschwächung bzw. Abbau unbenutzter oder wenig benutzter neuronaler Verbindungen entstehen. Vergessen ist zwar in dieser Form an das lokalistische Verarbeitungsprinzip gebunden (in verteilten Systemen geschieht Vergessen eher durch Interferenzen), aber nicht an die Einzelimpulskodierung. Erwachsene Japaner haben die Diskriminationsfähigkeit für /ra/ vs. /la/ verloren, weil die Differenz in ihrer Umgebungssprache nicht relevant ist. Man beachte, daß dieser Vergessensprozeß ein durchaus positiver Lernprozeß ist: Die Wahrnehmung mit Hilfe der verbleibenden Differenzierungen wird damit stabilisiert. Man kann annehmen, daß diese Form des „Lernens durch Vergessen“ schon auf der Ebene der intensitätskodierten phonetischen Merkmale geschieht.

Damit ergeben sich insgesamt für Prozesse und Repräsentationsformen auf phonologischer Ebene die in Abbildung 3.1–1 dargestellten Verhältnisse.

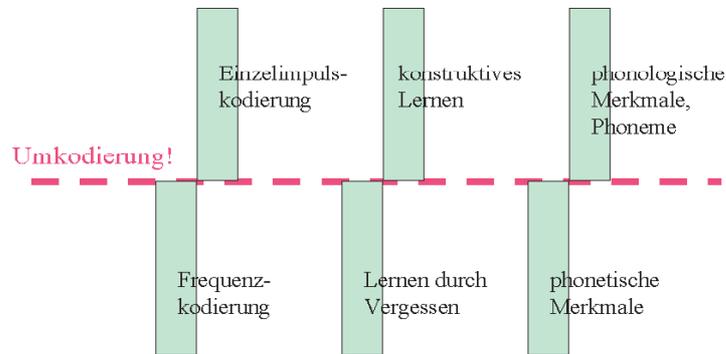


Abbildung 3.1–1: Umkodierung des Signals im Verstehensprozeß und Folgerungen für Repräsentationsformen und Lernvorgänge. Die Rechtecke symbolisieren die „parallelen“ und offenbar voneinander abhängigen Repräsentations- und Verarbeitungscharakteristika.

Der Spracherwerbsprozeß im Bereich der Phonologie für den akustischen Bereich umfaßt damit zwei Komponenten: Den Erwerb phonematischer Konzepte aufgrund einzelimpulskodierter Merkmale nach den in Kapitel 2 dargestellten Konzepterwerbsprozessen einschließlich einiger Besonderheiten, z. B. der Prototypizität, – und das Lernen durch Vergessen auf der Ebene der phonetischen und phonologischen Merkmale.

Einige Punkte, die den Umkodierungsprozeß von Frequenzkodierung zu Einzelimpulskodierung betreffen, sind jetzt noch offen geblieben. Sie sind insofern in Zusammenhang mit dem Spracherwerb interessant, als ja der Output des Umkodierungsprozesses die Grundlage des Lernens von Phonemen bildet. In Kochendörfer (1997: 91 f.) werden Überlegungen zur Verarbeitung von gestörtem und mehrdeutigem Input angestellt. Es sollte bei einem parallelverarbeitenden System gelten, daß Mehrdeutigkeiten prinzipiell zu Verarbeitungsprozessen auf entsprechend mehreren Bahnen führen.

Wenn Intensität auf Merkmalsebene die Stärke des Vorhandenseins eines Merkmals bedeutet, kann man sich durchaus vorstellen, daß eine mitt-

lere Intensität für die Darstellung einer Unsicherheit genutzt wird. Ein durchsichtiges linguistisches Beispiel:

In dem Satz „Emil holt die Kaffeetasse“ erscheinen bei relativ schneller Sprechweise an der Stelle des Übergangs von „holt“ zu „die“ nicht zwei Verschußlaute, sondern nur einer, der ein Mittelding zwischen [d] und [t] ist. Man kann sich vorstellen, daß die Stimmhaftigkeit dabei einen mittleren Wert hat. Die mittlere Stimmhaftigkeit muß dazu führen, daß sowohl *stimmhaft* als auch *stimmlos* weiterverfolgt werden, denn beide Informationen werden für den Lexikonabgleich gebraucht. Wenn wir für *stimmlos* bzw. *stimmhaft* entsprechend *-stimmhaft* und *+stimmhaft* schreiben (was in einem neuronalen System wirklich nur eine Schreibvariante ist), erhalten wir die klassische Form der binären phonologischen Merkmale.

Der Umkodierungsprozeß, so ist zu folgern, muß intensitätskodierte phonetische Merkmale in binäre Merkmale umsetzen, wobei mittlere Intensität zur Aktivierung beider Merkmalsausprägungen führt. Eine neuronale Anordnung, die das leistet, ist in Abbildung 3.1–2 wiedergegeben (man vgl. wieder Kochendörfer, 1997).

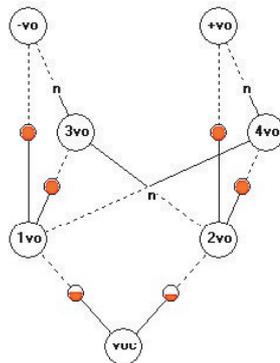


Abbildung 3.1–2: Architektur zur Umkodierung des Signals im Verstehensprozeß

Simulation:

voc.bat [sspwin.exe Umkodierung voc.net voc.ein G]

Die Abbildung 3.1–3 zeigt beispielhaft die Funktion dieser Architektur.

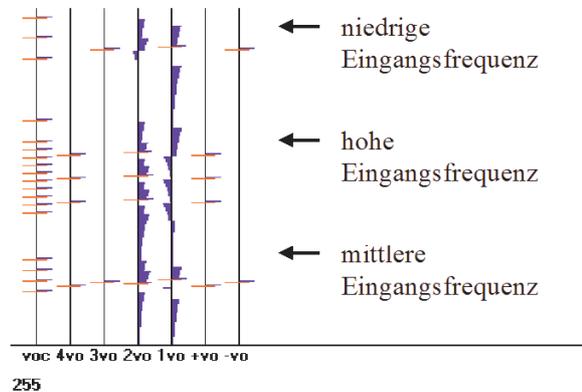


Abbildung 3.1–3: Umkodierung des Signals im Verstehensprozeß

Wir gelangen damit zu einer Abgrenzung von Phonetik und Phonologie, die an die Position von Chomsky & Halle (1968:65) erinnert (dort in Produktionsperspektive formuliert):

„As classificatory devices, features are binary. As a first approximation, we may assume that they are provided with a coefficient that can take one of two values: + (plus) or – (minus). On the other hand, since phonetic features are generally multivalued, we may think of them as having positive integers as coefficients. ... We will not actually give the rules that effect this conversion in most cases because our interest in sound structure, in this book, does not extend to matters such as degree of aspiration, degree of fronting of vowels, etc...“

Der Übergang von phonologischer zu phonetischer Repräsentation wird bei Chomsky & Halle allerdings graduell gesehen.

Wenn wir zum Abschluß dieses Abschnitts noch einmal auf die eingangs gestellte Frage zurückgehen, wo die Grenze für die sprachspezifische Phonetik auf der Seite der Peripherie anzusiedeln ist, so können wir jetzt eine differenziertere Antwort wenigstens für die auditive Seite geben: Da die Umkodierungsmechanismen den akustischen Lautmerkmalen fest zugeordnet sein müssen, beginnt die sprachbezogene auditive Verarbeitung

spätestens bei diesen Umkodierungsmechanismen. Das ergibt die schematisch in Abbildung 3.1–4 dargestellten Verhältnisse. Man beachte, daß auch bei außersprachlichen akustischen Phänomenen (Instrumentalmusik!) ein Umkodierungsprozeß erforderlich ist, also die bloße Tatsache der Umkodierung nicht als sprachspezifisch gelten kann.

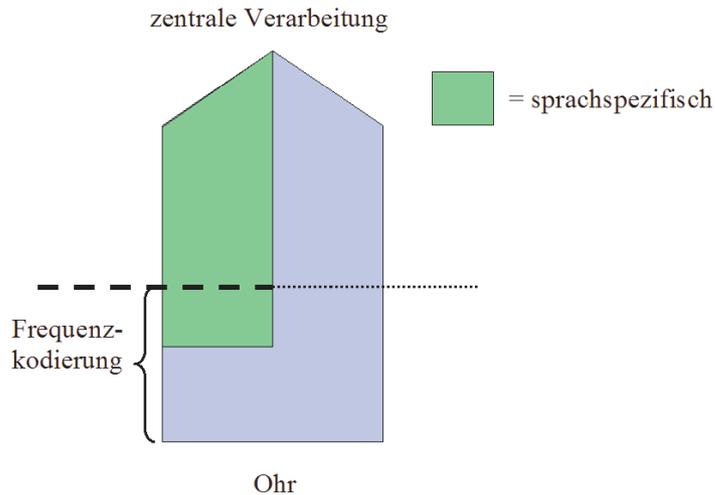


Abbildung 3.1–4: Ausgliederung sprachlicher Phänomene im auditiven Bereich

3.2 Lernen von Phonemen (Perzeption)

Die Überlegungen des vorigen Abschnitts haben gezeigt, daß einige Dinge, die zum Bereich der Phonetik bzw. Phonologie gehören oder zu dessen Funktionieren beitragen, nicht konstruktiv gelernt werden müssen bzw. durch einen passiven Vergessensprozeß entstehen:

- die Analysekatoren des Ohrs, die sich in dessen tonotoper Organisation ausdrücken;
- die intensitätskodierte phonetischen Merkmale und damit auch die einzelimpulskodierte, genau entsprechenden phonologischen Merkmale (die Merkmale müssen nicht dem entsprechen, was Phonetiker und Phonologen üblicherweise unterscheiden);

- der Zuschnitt des verfügbaren Merkmalsinventars auf die Umgebungssprache.

Gelernt werden müssen:

- eventuell Verknüpfungen von Merkmalen zur Bildung sprachspezifischer komplexer Merkmale, die nicht den Status von Phonemen haben;
- Verknüpfungen von Merkmalen zu den jeweils sprachspezifischen Phonemen.

Die verbliebenen konstruktiven Lernprozesse sind Instanzenbildungsprozesse. Die nun folgende Simulation zeigt die Funktion dieser Prozesse in einer Architektur, die eine Auswahl von phonetischen Merkmalen, den Umkodierungsprozeß und die Bildung phonologischer Konzepte aufgrund des Umkodierungsergebnisses realisiert (Abbildung 3.2–1).

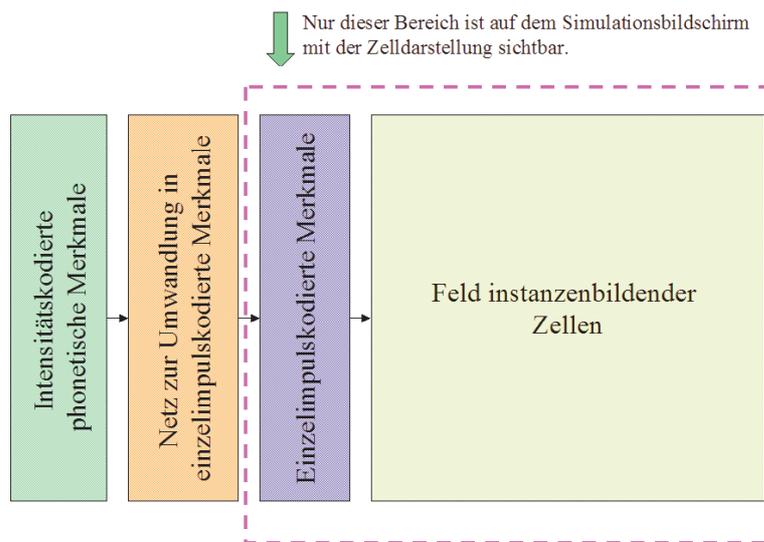
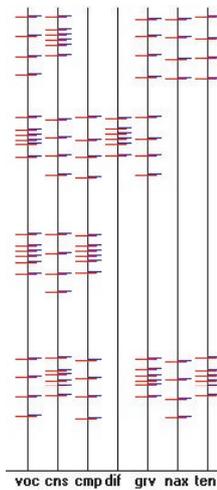


Abbildung 3.2–1: Simulation zur Bildung von Phonemkonzepten, Architekturüberblick

Die Ausgänge der insgesamt sieben Umkodierungseinheiten, die also die einzelimpulskodierten phonologischen Merkmale darstellen, sind jeweils über 30 zufällig ausgewählte schwache Verbindungen mit einem Pool von 100 potentiellen Instanzen verknüpft. Einige Zellen, z. B. *i0* und *i90*, sind zufällig ganz isoliert, können also über Lernprozesse nicht angebunden werden. Die für den instanzenbildenden Prozeß maßgebenden Lernparameter sind so hoch eingestellt, daß auch bei dem geringfügigen Input, der in der Simulation verwendet wird, ein Lerneffekt entsteht.

Den frequenzkodierten phonetischen Input zeigt ausschnittsweise die Abbildung 3.2–2. Eingegeben wird die Sequenz /diaf...flaŋen/ mit einer kleinen Pause anstelle der drei Punkte.

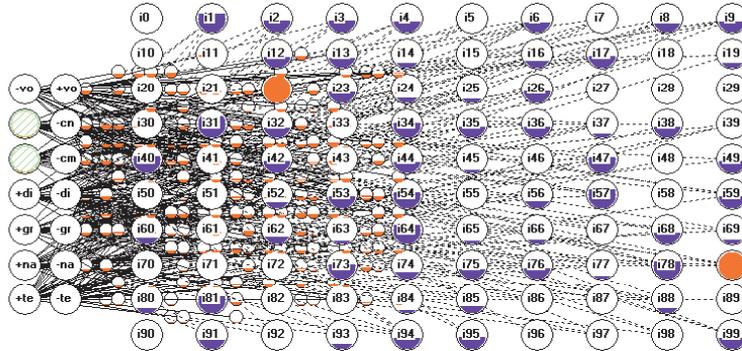


359

Abbildung 3.2–2: Frequenzkodierter phonetischer Input für /diaf/: voc = vocalic, cns = consonantal, cmp = compact, dif = diffuse, grv = grave, nax = nasal, ten = tense. Der Input ist nicht segmentiert.

Der in Abbildung 3.2–3 wiedergegebene Simulationszustand läßt – wie in Abbildung 3.2–1 angedeutet, beschränkt auf die an der Instanzenbildung unmittelbar beteiligten Komponenten – die weitgestreuten Aktivitäten erkennen, die ein Input zu einem bestimmten Zeitpunkt auslöst. Die

„Pegelstände“ in den Zellkreisen und den Verbindungskreisen deuten darauf hin, daß viele Zellen schon Lerneffekte aufweisen.



736

Abbildung 3.2–3: Zustand des Systems nach der Eingabe des /ŋ/ von /ʃlaŋen/. Die Instanzenzellen *i22* und *i79* feuern, sind also diesem Input zugeordnet.

Simulationen:

```
phonlg.bat [sspwin.exe "Lernen von Phonemen G" phonlern.net phonlern.ein
G]
phonlv.bat [sspwin.exe "Lernen von Phonemen V" phonlern.net phonlern.ein
V]
```

Als Ergebnis der Simulation ergeben sich die folgenden Instanzen (Prozentangaben beziehen sich auf die Schwelle):

- i95* +consonantal 53,62% +vocalic 48,24% = /l/;
- i79* +nasal 22,56% +grave 34,02% +compact 47,98% +consonantal 50,49% = /ŋ/ (Verwechslung mit /m/ ist möglich: +nasal +grave +consonantal reichen aus, um die Instanz überschwellig zu erregen);
- i22* +compact 52,92% +consonantal 54,0% = /g/, /k/, /f/, /x/, /ŋ/ ...;
- i57* -grave 48,82% -consonantal 49,96% +vocalic 52,96% = Vokal außer /a/, /o/ und /u/.

Man beachte die prototypische Organisation der Instanzen *i79* und *i57*!

3.3 Strukturelle Voraussetzungen der Produktion von Sprachlauten, die Rolle der Lallphase

Wenn wir als Erwachsene den Wortschatz in unserer Muttersprache erweitern, so geschieht das relativ problemlos. Jedenfalls sind wir ohne Probleme in der Lage, ein bisher nicht zu unserem Wortschatz gehöriges Wort nachzusprechen. In der Fremdsprache kann das ein Problem sein. Selbst wenn wir fremdsprachliche Ausdrücke verstehen und wenn wir keine Probleme mit der akustischen Differenzierung auf der Verstehensseite haben, ist es doch nicht selbstverständlich, daß wir beim Nachsprechen ein zufriedenstellendes akustisches Gebilde zustande bringen. Diese Beobachtung mag als Hinweis gelten, daß es (wenigstens für den Erwachsenen) keine automatische Parallelisierung von Sprachperzeption und Sprachproduktion bis in die äußerste Peripherie hinein gibt.

Die Schwierigkeiten beim Nachsprechen eines fremdsprachlichen Ausdrucks bestehen nicht in demselben Maß für den Aspekt der lexikalischen Sequenz. Wenn man von der exakten phonetischen Realisierung absieht, ist die Produktion lexikalischer Sequenzen nicht problematisch. Das gilt auch für die bloße akustische Vorstellung lexikalischer Sequenzen.

Es ist oben in Abschnitt 2.6 gezeigt worden, daß eine Parallelisierung von Top-down-Bahnen zu existierenden Bottom-up-Bahnen durch einfache Lernprozesse möglich ist, soweit die Bahnensysteme wirklich genau symmetrisch sind. Diese Symmetrie gilt an der äußersten Peripherie offenbar nicht mehr, was auch neuronal sofort nachvollziehbar ist, da wir ja nicht mit den Ohren reden. Etwas schwieriger ist die Frage zu beantworten, wo genau – im Hinblick auf sprachliche Leistungen – sich die Bahnensysteme trennen.

Die Möglichkeit des raschen Behaltens und Wiederholens neuer muttersprachlicher Ausdrücke aufgrund eines Verstehensprozesses kann nur erklärt werden, wenn auf der Ebene der lexikalischen Sequenzen die angesprochene Symmetrie noch gilt. Die Artikulation der muttersprachlichen Laute muß nicht von Wort zu Wort neu gelernt werden, also gilt auch für die Phoneme, daß sie auf gleiche Weise top-down erreicht werden. Damit reduziert sich die Frage auf die in Abbildung 3.3-1 angedeuteten Möglichkeiten: Die Trennung von Bottom-up- und Top-down-Bahnen kann entweder auf der Ebene der phonologischen oder der Ebene der phonetischen Merkmale erfolgen.

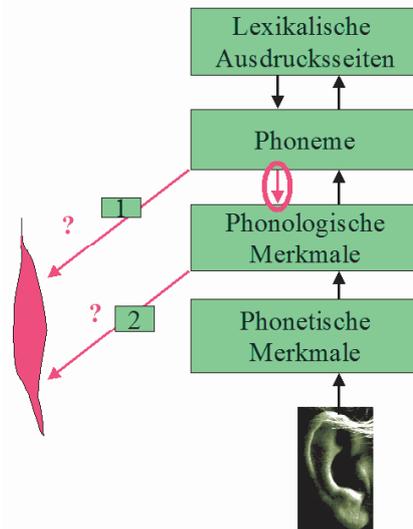


Abbildung 3.3–1: Alternative Möglichkeiten der Trennung von Bottom-up- und Top-down-Bahnen. Kann die Parallelität auf den eingekreisten Bereich ausgedehnt sein?

Das entscheidende Argument zur Klärung dieser Frage kommt aus der Beobachtung, daß es keine eineindeutige Beziehung zwischen akustischen und artikulatorischen Lautmerkmalen gibt. So wird z. B. das akustische Merkmal *grave* in [p, k, f, x] artikulatorisch auf sehr verschiedene Weise zustande gebracht (Ladefoged, 1997: 612). Akustische Eigenschaften entstehen durch eine *phonemspezifische* Kombination von artikulatorischen Eigenschaften. Die Phonemspezifität kann aber nur dann erklärt werden, wenn das Phonem-als-Einheit als Ausgangspunkt bestimmend für die Artikulation ist und nicht nur ein akustisches Merkmal-als-Einheit.

Also ergibt sich, daß die Differenzierung von Akustik und Artikulation unmittelbar unterhalb der Phonemebene stattfinden muß, gemäß der Möglichkeit (1) in Abbildung 3.3–1.

Ab dem Punkt aber, an dem sich Akustik und Artikulation trennen, können Top-down-Bahnen, soweit sie nicht angeboren sind, nur noch durch einen Versuchs-Irrtums-Prozeß aufgebaut werden. „Soweit sie nicht angeboren sind“ heißt: in einem mittleren Bereich; die äußerste Peripherie ist sicherlich wieder „fest verdrahtet“ zu denken, und es ist dort wie-

der, wie oben in Abschnitt 2.2 angedeutet, mit Frequenzkodierung zu rechnen.

Wenn man die Charakteristika der Lautäußerungen von Kindern in der Lallphase betrachtet, kann man unschwer erkennen, daß hier ein Vorgang des Übens stattfindet, der wesentlich durch das Versuchs-Irrtums-Prinzip bestimmt ist. Man sollte sich nicht zu rasch zu der Annahme entschließen, daß hier Silbenstrukturen gelernt werden, auch wenn es oberflächlich so aussieht. Wie soll man Plosive ohne einen folgenden Vokal üben?

3.4 Der Vorgang des „Übens“

Voraussetzung des Vorgangs ist die vorausgehende Verankerung von Perzeptionsstrukturen und ihre Parallelisierung durch Produktionsstrukturen oberhalb der Phonemebene, die Verbindung mit den Phoneminstanzen einschließend. Man beachte zur Begründung dieser Voraussetzung, daß nicht nur die Komponente „Versuch“, sondern auch die Komponente „Irrtum“ eine Bedeutung haben muß. Das Scheitern des Versuchs kann nur durch das Fehlschlagen eines Wahrnehmungsprozesses festgestellt werden, der durch die Umgebungssprache gebahnt ist. Ohne einen solchen Kontrollprozeß kann selbstverständlich eine Entwicklung auf die Umgebungssprache hin nicht gewährleistet werden, denn gerade für die Lallphase gilt ja, daß eine Korrektur durch Bezugspersonen der Umgebung nicht stattfindet.

Wenn Perzeptionsstrukturen – wie vorläufig sie auch sein mögen – bereits vorausgesetzt werden, kann die Erfolgskontrolle durch eine Rückmeldung über diese Strukturen erfolgen, die auf eine Komponente führt, die als „Watchdog“ bezeichnet wird und die an der Spitze der Perzeptionsstrukturen steht (vgl. Kochendörfer, 2000). Nur ein erfolgreicher Perzeptionsvorgang führt zu einem Signal, das den Watchdog erreicht und ihn damit „ruhigstellt“. Bei einem Mißerfolg gibt der Watchdog Signale ab, die zu einer veränderten Produktion führen.

Die Abbildung 3.4–1 zeigt schematisch(!) eine entsprechende Struktur. Mit bezifferten Pfeilen ist ein (vereinfachter) Verlauf eingetragen, der einen Mißerfolg bedeutet. Schritt 1 führt zur Produktion eines Phonems. (Details des Produktionsprozesses, wozu auch die Auswahl der spezifischen Bahn für das Produktionssignal gehört, mögen hier offen bleiben; man vgl. aber unten Abschnitt 4.6.) Während des Produktionsprozes-

ses werden in den mit S bezeichneten Zellen, die zum Perzeptionssystem gehören, Spuren hinterlassen (dieser Bereich liegt oberhalb der Verzweigung, die Perzeption und Produktion trennt). Schritt 2 ist die akustische Übertragung von den Artikulationsorganen auf das Ohr. Schritt 3, der Perzeptionsvorgang, führt auf eine Zelle, die keine Spur des Produktionsvorgangs trägt. Die Bottom-up-Aktivierung bleibt an dieser Stelle stecken, und es wird, nach einer entsprechenden Aktivität der Watchdog-Einrichtung, ein neuer Versuch gestartet.

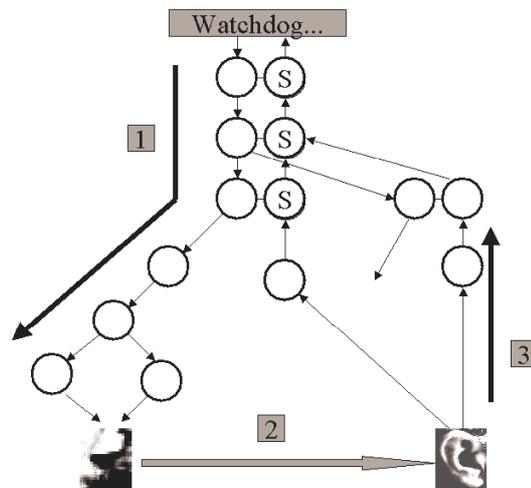


Abbildung 3.4-1: Schema eines mißglückten Produktionsversuchs; Erläuterungen im Text

Die Abbildung 3.4-2 zeigt einen erfolgreichen Produktionsversuch. Schritt 1 führt auf einer alternativen Bahn zu einer veränderten akustischen Produktion, so daß die Aktivierung im Zuge der Perzeption in Schritt 3 auf eine Zelle mit einer Spur führt und auf der mit dem gestrichelten Pfeil gekennzeichneten sozusagen „gespurten“ Bahn den Watchdog erreicht und damit den Erfolg signalisiert.

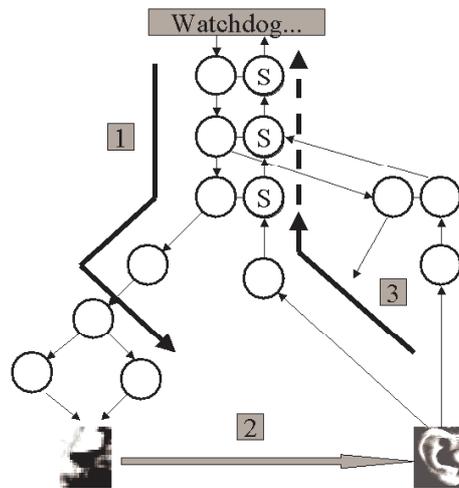


Abbildung 3.4–2: Schema eines erfolgreichen Produktionsversuchs; Erläuterungen im Text

3.5 Das Fis-Phänomen, Umlern-Probleme

Die klassische Beschreibung des Fis-Phänomens stammt von Berko & Brown (1960: 531), vergleiche auch Elsen (1991: 32):

„One of us, for instance, spoke to a child who called his inflated plastic fish a fis. In imitation of the child’s pronunciation, the observer said, ‘That is your fis?’ ‘No,’ said the child, ‘my fis.’ He continued to reject the adult’s imitation until he was told, ‘That is your fish.’ ‘Yes,’ he said, ‘my fis.’“

Die Erklärung bei Berko & Brown ist: „receptive control precedes productive control“. Diese Erklärung scheidet an dem Problem, daß das Kind ja offenbar seine eigene Produktion nicht als fehlerhaft erkennt. Auf den im vorigen Abschnitt konstruierten Prozeß des Übens bezogen: Offenbar verursacht die akustische Rückmeldung der eigenen Produktion keine Inkohärenzreaktion. Dies mag als Hinweis dafür gelten, daß man zur Erklärung etwas weiter ausgreifen muß.

Es ist grundsätzlich zu beachten, daß an dem beschriebenen Vorgang *zwei* Personen beteiligt sind: das Kind *und* der Erwachsene. Man mag an der Fiktion interessiert sein, daß der Erwachsene-als-Linguist alles hört, was prinzipiell sprachlich interessant ist. In Wirklichkeit gilt aber, daß auch der Linguist ein Hörer ist, dessen Diskriminierungsfähigkeit für Sprachlaute sich im frühen Spracherwerb an die Umgebungssprache(n) angepaßt hat. Das bedeutet: Man kann nicht als selbstverständlich annehmen, daß der Erwachsene hört, was das Kind spricht (dasselbe hört, was das Kind hört). Die Merkmalsauswahl, die das Kind verwendet, kann Merkmale enthalten, die der Erwachsene nicht hört und deshalb (auch als Linguist) nicht transkribieren kann. Daraus ergibt sich ein prinzipieller Vorbehalt gegenüber linguistischen Transkriptionen, und zwar nicht nur Transkriptionen von kindlicher Sprache (vgl. auch Macken, 1995: 683). Für das Fis-Phänomen ergibt sich eine Interpretationsmöglichkeit, die schematisch in Abbildung 3.5–1 dargestellt ist.

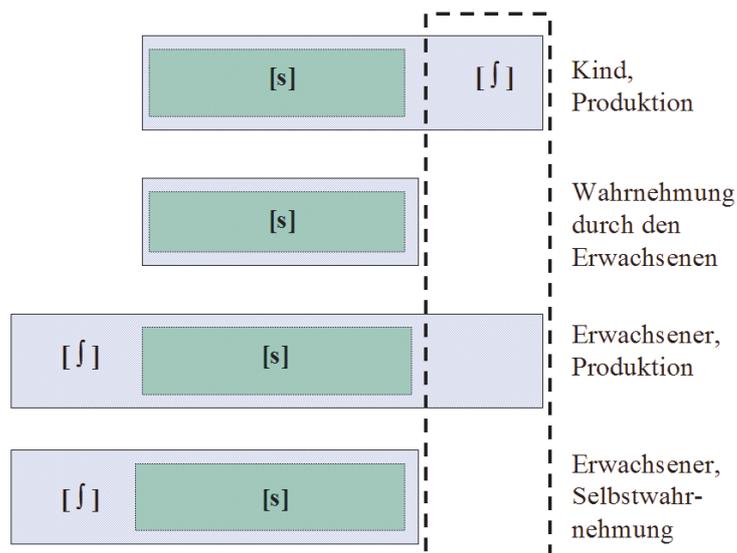


Abbildung 3.5–1: Schema zur Interpretation des Fis-Phänomens. Das gestrichelte Rechteck steht für ein Merkmal, das der Produktion des Erwachsenen physikalisch zukommt, aber nicht wahrgenommen wird.

Der Kernpunkt ist die Annahme, daß die *Produktion* des [f] in der Sprache des Erwachsenen eine Komponente enthält, die in der *Perzeption* des Erwachsenen keine Rolle (mehr) spielt. Für die Lautproduktion und -perzeption des Kindes ist aber genau diese Komponente wesentliches Unterscheidungsmerkmal.

Das Kind hat, vielleicht über einen Lernprozeß, der mit einem sehr komplexen Lautkonzept begonnen hat, eine Variante des [f] erworben, die durchaus eine gültige Kategorisierung der Erwachsenensprache erlaubt, aber in der Produktion abweicht. Produktion und Perzeption des Kindes sind im Einklang miteinander, und die Reaktion des Kindes auf die Nachahmungsversuche des Erwachsenen ist verständlich.

Das macht es natürlich für das Kind prinzipiell schwierig, seine Lautproduktion in einem solchen Fall an die Umgebungssprache anzugleichen. Man muß sich aber auch bewußt machen, daß Revisionsprozesse grundsätzlich ihre Probleme haben.

In einem lokalistischen System muß die Revision eines Phonems bedeuten, daß eine neue Großmutterzelle mit einer „verbesserten“ Merkmalsausstattung gebildet wird. Das ergibt sich aus dem Prinzip der Instanzenbildung, denn eine bereits gebildete Instanz kann nicht (z. B. durch Hinzufügen neuer Merkmalsverbindungen) angepaßt werden. Die Bildung einer neuen Großmutterzelle hat aber nicht selbstverständlich zur Folge, daß alle in weiterverarbeitende Strukturen, z. B. lexikalische Sequenzen, eingebauten Instanzen des alten Phonems damit ersetzt sind. Ein solcher globaler Ersatz ist wahrscheinlich nur möglich, wenn das neue Phonem das alte Phonemkonzept als Komponente enthält, wie in Abbildung 3.5-2 veranschaulicht. (Einen Überblick über verschiedene Thesen zur phonologischen Entwicklung gibt Drescher, 1999.) In diesem Fall kann von dem neugebildeten, komplexeren Konzept aus eine Verbindung aufgebaut werden, die es mit einer oder mehreren Instanzen des alten Konzepts über eine ODER-Zelle verknüpft. Ob dieser Vorgang z. B. im lexikalischen Bereich zahlenmäßig ins Gewicht fällt, mag dahingestellt bleiben.

Schwierigkeiten der Revision von Phonemkonzepten können aber herangezogen werden, wenn es um die Erklärung einzelner lexikalischer Formen geht, die in einer unvollkommenen Phonologie beibehalten werden, die nicht mehr dem jeweils aktuellen Entwicklungsstand entspricht (Beispiele in Elsen, 1991).

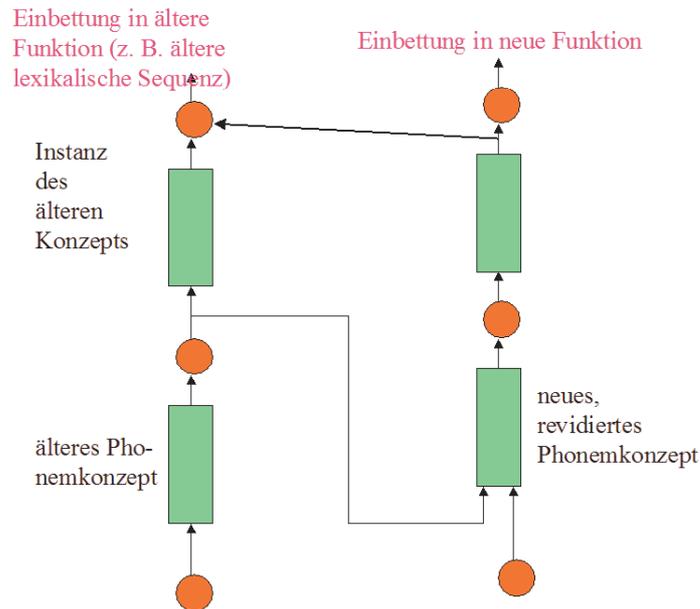


Abbildung 3.5–2: Schema zur Revision eines Phonemkonzepts durch zusätzliche Spezialisierung (Hierarchiebildung). Der Hierarchiebildungsprozeß schließt die Bildung von ODER-Verbindungen ein (ODER-Zellen sind durch Kreise symbolisiert) und ist ansonsten identisch mit der hierarchischen Instanzenbildung wie in Kapitel 2.4 beschrieben. Die durch Rechtecke abgekürzten Zellstrukturen enthalten instanzenbildende Zellen. Die Architektur wird in Kapitel 4 genauer diskutiert und begründet.

3.6 Diskussion konkurrierender Phonologie-Konzeptionen

Die Phonologie-Konzeption, die in den vorangegangenen Abschnitten zugrunde gelegt bzw. entwickelt worden ist, hat – grob zusammengefaßt – die folgenden Komponenten:

- Phoneme sind mentale Einheiten, nicht nur Abkürzungskonventionen.

- Phoneme werden zentral durch Großmutterzellen repräsentiert und durch Aktivierungen in Form einzelner neuronaler Impulse realisiert (Einzelimpulskodierung).
- Es gibt im Verarbeitungsprozeß eine intensitätskodierte phonetische Ebene, die durch einen Umkodierungsprozeß mit einer einzelimpulskodierten phonologischen Ebene verbunden ist.
- Phoneme sind (perzeptionsseitig) prototypische Konzepte, die ggf. hierarchisch (mehrstufig) aufgrund elementarerer angeborener Merkmale gebildet werden. Die artikulatorische Ausprägung der Phoneme geschieht auf der Ebene der phonologischen Merkmale. Entsprechende Strukturen dort werden durch einen Versuchs-Irrtums-Prozeß erworben.
- Auf der Ebene der Phoneme-als-Einheiten gibt es zwar eine Unterscheidung von Bottom-up- und Top-down-Bahnen, man kann aber nicht von einer Unterscheidung von Produktions- und Perzeptions-*phonemen* sprechen. Lexikalische Ausdrucksseiten müssen auf der Sequenzebene neutral sein gegenüber der Unterscheidung von Produktion und Perzeption. Details werden in Kapitel 4 behandelt.

Damit ergeben sich eklatante Widersprüche gegenüber einigen weitverbreiteten Auffassungen zur Konzeption der Phonologie, die eine Diskussion wert sind.

Zur Auflösung der Einheit des Phonems in der *generativen Phonologie* vom Chomsky-Halle-Typ ist oben in Abschnitt 3.1 schon Stellung genommen worden. Phonemkonzepte entstehen als Einheiten notwendig und unvermeidbar.

Soweit die moderne *nicht-lineare Phonologie* (mit Bezug auf den Spracherwerb vgl. z. B. Bernhardt & Stemberger, 1998, und Penner, 2000) die Idee der Auflösung des Phonems übernimmt, riskiert sie ebenfalls, von der biologischen Realität abzuweichen. Da diese Phonologie-Konzeption über sublexikalische Einheiten wie Silben und Moren konstruiert ist, muß gewährleistet sein, daß solche Einheiten (jeweils sublexikalisch durch Großmutterzellen repräsentiert) im Spracherwerb lernbar sind. Unten in Kapitel 7 wird für Silben gezeigt, daß sie keine lernbaren sublexikalischen Elemente sein können. Zur Problematik der Annahme angeborener Strukturen, die nicht zur Sinnesperipherie gehören, kann man in Kapitel 5.1 nachlesen. Die nicht-lineare Phonologie ist insgesamt keine gute

Basis für eine Spracherwerbstheorie, die an den Realitäten des Gehirns orientiert sein soll.

Die *artikulatorische Phonologie*, salopp „Gestenphonologie“ genannt, ersetzt die traditionelle phonologische Analyse, bei der Bündel von jeweils segmentspezifischen artikulatorischen Merkmalen angegeben werden, durch „Gestenpartituren“, wie in Abbildung 3.6–1 nach Browman & Goldstein (1992: 158) angedeutet.

velum	wide
tongue body	wide pharyngeal
tongue tip	clo alveolar
lips	clo labial
glottis	wide

Abbildung 3.6–1: Gestenpartitur für das englische Wort „pan“, verändert nach Browman & Goldstein (1992)

Wenn man die neuronale Modellierung heranzieht, löst sich der Gegensatz auf. Länger andauernde Muskelkontraktionen müssen durch Wiederholung des neuronalen Signals bewirkt werden. Wenn eine bestimmte artikulatorische Einstellung über mehrere phonologische Segmente andauern soll, müssen mindestens so viele Impulse wie Segmente abgegeben werden. Es spricht nichts dagegen, pro Segment ein den erforderlichen Einstellungen entsprechendes Bündel von Impulsen vorzusehen. Der artikulatorische Effekt entspricht dem Bild, das die Gestenpartitur abgibt.

Für die Perzeption kann analog argumentiert werden. Man beachte aber, daß es, wie oben in Abschnitt 3.3 schon erwähnt, keine einfache Entsprechung von artikulatorischen und akustischen Merkmalen gibt. Auf die Problematik phonologischer Längen wird unten in Kapitel 4 noch näher eingegangen.

4 Erwerb und Revision lexikalischer Strukturen

4.1 Was gelernt werden muß

Das Grundprinzip oder die Grundvoraussetzung der sprachlichen Kommunikation wird auch heute noch gültig durch das „Zeichenmodell“ von Ferdinand de Saussure ausgedrückt (Abbildung 4.1–1): Es besteht darin, daß einer akustischen Form bzw. den psychischen (neuronalen) Entsprechungen ein ebenfalls mental repräsentierter Inhalt arbiträr, das heißt prinzipiell per Konvention zugeordnet ist. Die zeitlich erstreckte Aktivierung der Ausdrucksform im Verstehensprozeß führt unvermeidlich zur Aktivierung des Inhalts und umgekehrt die Aktivierung des Inhalts zur Aktivierung der Ausdrucksform (reziproke Evokation).

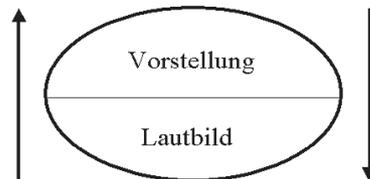


Abbildung 4.1–1: Zeichenmodell nach Ferdinand de Saussure. Terminologie nach der deutschen Übersetzung von Lommel (de Saussure, 1967). Die Pfeile links und rechts der Ellipse drücken das Prinzip der reziproken Evokation aus.

Auf die Verhältnisse des mentalen Lexikons übertragen und verbunden mit den Vorstellungen zur Konzeptbildung, wie sie oben in Kapitel 2 entwickelt worden sind, kann man zunächst das „Lautbild“ relativ problemlos als Sequenz von Phonemkonzepten identifizieren. Wenn Phonemkonzepte automatisch und unausweichlich gebildet werden, ist in jedem Fall mit Phonemen als prälexikalischen Einheiten zu rechnen (gegen Marslen-Wilson, 1987; vgl. auch Frauenfelder & Floccia, 1999).

Die in Kapitel 3 behandelten Lernprozesse schließen die Sequenzbildung nicht mit ein. Sie muß damit ein wesentlicher Gegenstand bei der Behandlung des lexikalischen Lernens sein. Man beachte, daß die Bildung von Phonemsequenzen auch dann erforderlich ist, wenn man zusätzlich mit Silben oder anderen prälexikalischen Einheiten rechnet. Man tut gut daran, das Silbenproblem erst einmal auszuklammern (vgl. aber Kapitel 7).

Die Phonemsequenz muß in einem lokalistischen System (direkt oder indirekt über einen die Sequenz zusammenfassenden Knoten) auf einen Großmutterknoten führen, der die mit der ausdrucksseitigen Sequenz konventionell verbundene Vorstellung (den Inhalt) repräsentiert. Wir erhalten also insgesamt die in Abbildung 4.1–2 angedeutete neuronale Interpretation des Zeichenmodells (für den Verstehensprozeß spezifiziert, die Produktion muß durch entsprechende gegenläufige Bahnen realisiert sein).

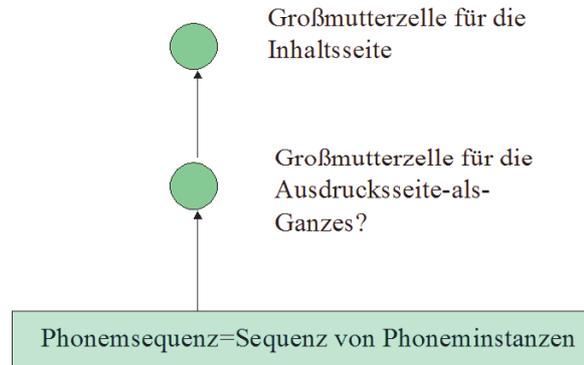


Abbildung 4.1–2: Neuronale Interpretation des Zeichenmodells von Abbildung 4.1–1

Damit stellt sich u. a. die Frage, wie die Großmutterzelle für die Inhaltsseite zu ihrer Bedeutung kommt, die ja immer durch Verbindungen zur Sinnesperipherie definiert sein muß. Die Zelle steht zwar über die Phonemsequenz in Verbindung mit dem Gehör, das ist es aber nicht, was zur Definition des *Inhalts* dienen könnte, denn das würde ja auch dem Saussureschen Prinzip der Arbitrarität des Zeichens widersprechen. Es gibt nur eine Möglichkeit: Die Definition muß durch Verbindung der Zelle mit einem unabhängig von der Ausdrucksseite definierten inhaltlichen Konzept erfolgen; oder, was praktisch dasselbe ist, die Zelle muß identisch sein mit der Großmutterzelle eines anderweitig definierten Konzepts, wie in Abbildung 4.1–3 veranschaulicht.

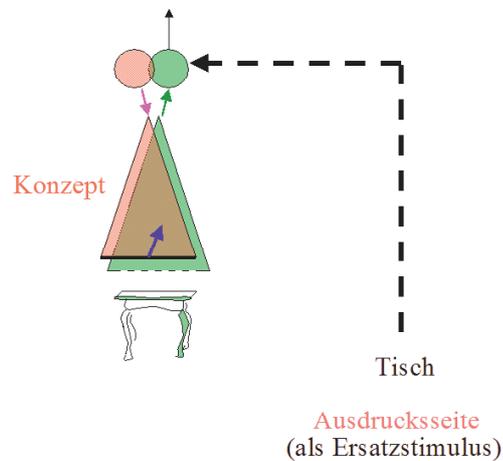


Abbildung 4.1–3: Definition der Inhaltsseiten lexikalischer Zeichen

Wie in Kochendörfer (2002) von dieser Überlegung ausgehend gezeigt worden ist, kann das zur Leugnung einer sprachspezifischen Semantik führen (gegen z. B. Bierwisch & Schreuder, 1992; auch noch jüngere Arbeiten der Levelt-Schule kommen nicht ohne sprachspezifische Semantik aus). Für das Verständnis des Spracherwerbs im lexikalischen Bereich hat das zur Folge, daß der Lernprozeß auf der Bedeutungsebene nur noch in dem Aufbau einer Verbindung zwischen der lexikalischen Ausdrucksseite und einem im Vorfeld bereits (nach den in Kapitel 2 beschriebenen Mechanismen) gebildeten außersprachlichen Konzept besteht.

Lerngegenstände im lexikalischen Bereich sind also zusammenfassend:

- die Repräsentationen der lexikalischen Ausdrucksseiten als Phonemsequenzen;
- die Verbindungen der Ausdruckssequenzen mit Konzepten (der Wahrnehmung).

Beides muß sowohl für die Perzeption als auch für die Produktion gewährleistet werden. Die Gewährleistung der Verarbeitungsprozesse ist von wesentlicher Bedeutung für die Konzeption der Repräsentationen.

4.2 Ausdrucksseiten

Phonemsequenzen können in einem lokalistischen Modell nur Sequenzen von Phoneminstanzen sein, die zeitlich gereiht sind. Zeitliche Reihung bedeutet: Es gibt eine zeitliche Vorgänger-Nachfolger-Beziehung, der Vorgänger „erwartet“ seine(n) Nachfolger. Erwartungen spielen bei allen oder mindestens sehr vielen mentalen Prozessen eine Rolle. Sie haben eine Steuerungsfunktion, das heißt, sie legen fest, welche Verarbeitungsbahnen aktuell sind und beschriftet werden sollen und welche nicht. Erwartungen sind zeitüberbrückende Informationen, also an eine Gedächtnisleistung gebunden. Im Falle der Phonemsequenzen muß sozusagen ein Zeiger gesetzt sein, der entweder den Vorgänger oder den Nachfolger auszeichnet. Die Information, die dem Zeiger entspricht, muß sehr kurzlebig sein (darf größenordnungsmäßig nicht länger als 100 ms andauern) und muß zuverlässig wieder verschwinden. Die Auszeichnung einer Phoneminstantz in diesem Sinne kann nur durch ein unterschwelliges EPSP geschehen. Wenn man diese Lösung festhält, ist auch entschieden, daß die Kennzeichnung nicht den Vorgänger, sondern den Nachfolger herausheben muß. Wir nennen das entsprechende EPSP „Erwartungspotential“; es drückt aus, daß die entsprechende Phoneminstantz im Bereich der erwartbaren Fortsetzungen der Verarbeitung liegt. Das Erwartungspotential muß vom Sequenzvorgänger erzeugt werden, setzt also eine neuronale Verbindung von Vorgänger und Nachfolger voraus. Das Gewicht dieser Verbindung ist unkritisch, es kann relativ klein bleiben, weil das Erwartungspotential exponentiell abklingt und erst nach einer gewissen Zeitspanne wirksam wird, in der die Effekte hoher und niedriger

Ausgangspotentiale sich einander stark angenähert haben (Abbildung 4.2-1).

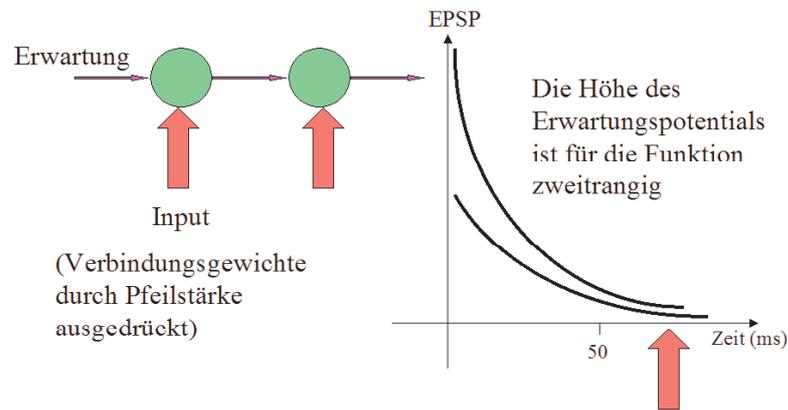


Abbildung 4.2-1: Sequenzbildung durch Erzeugung von Erwartungspotentialen

Diese Konstruktion bringt zwei Probleme mit sich:

- Input-Signale, die auf Zellen ohne Erwartungspotential treffen – das sind Zellen, die dann also nicht feuern –, hinterlassen dort ein unter-schwelliges EPSP, das von einem Erwartungspotential nicht unterschieden werden kann und nachfolgend zu Fehlfunktionen führt.
- Wenn die Zellen, die durch Sequenzverbindungen verknüpft sind, identisch sind mit den Zellen, die Phoneminstanzen bilden, ist ein Lernvorgang, der zur Ausbildung der Sequenzverbindungen führt, nicht erklärbar, wenn nach den in Kapitel 2 entwickelten Vorstellungen angenommen wird, daß zugeordnete Instanzenzellen keine neuen Verbindungen eingehen.

Die Abbildung 4.2-2 zeigt eine Zellarchitektur, die diese Probleme löst, und zwar durch Einführung einer Vorwärtshemmung und durch Aufteilung der erforderlichen Lernvorgänge auf zwei Zellen (vgl. insgesamt Kochendörfer, 2000).

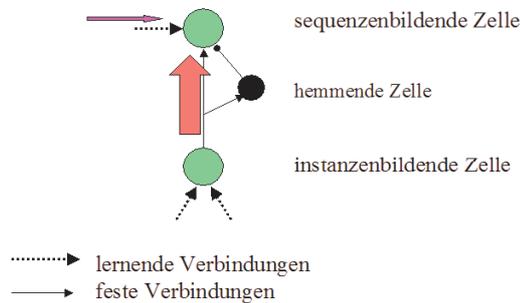


Abbildung 4.2–2: Zellkombination zur Realisierung eines Sequenzelements im mentalen Lexikon der phonologischen Ausdrucksseiten

Die Einführung der Vorwärtshemmung ist wohl prinzipiell nicht zu vermeiden, und die Aufteilung der Lernvorgänge läßt es zu, daß für die Zellen unterschiedliche Lernparameter definiert werden, was wegen der unterschiedlichen Zeitverhältnisse, in denen gelernt wird, kaum umgangen werden kann. Man beachte, daß bei der Sequenzverbindung aufeinanderfolgende Signale den Lernvorgang auslösen müssen, bei der Konzeptbildung aber nahezu gleichzeitige.

In Kochendörfer (2000) ist auf dieser Basis ein baumförmiges Lexikon von Ausdrucksseiten für die Wörter „Kick“, „Kitt“ und „Tick“ konstruiert worden, das bei Input der entsprechenden Lautsequenzen jeweils am Ende den entsprechenden Zweig aktiviert. Dieses konstruierte, also nicht durch Lernvorgänge zustande gekommene Lexikon ist in verallgemeinerter Form in Abbildung 4.2–3 wiedergegeben. Man beachte, daß identische Sequenzanfänge „zusammengelegt“ sind. Um den Analysevorgang zu ermöglichen, muß zunächst die allen Lexikonsequenzen gemeinsame „Startzelle“ aktiviert werden, deren Funktion es ist, Erwartungspotentiale auf allen Sequenzanfängen zu erzeugen. Anschließend erfolgt die Eingabe der Phonemsequenzen über die Phoneminstanzen (jeweils eine Instanz pro Phonem), die wiederum die einzelnen Instanzen der Wortrepräsentationen erregen. (Die Phoneminstanzen, die in Sequenzen eingehen, können im allgemeinen nicht direkt Instanzen von Bündeln phonologischer Merkmale sein, denn davon gibt es wahrscheinlich zu wenige.)

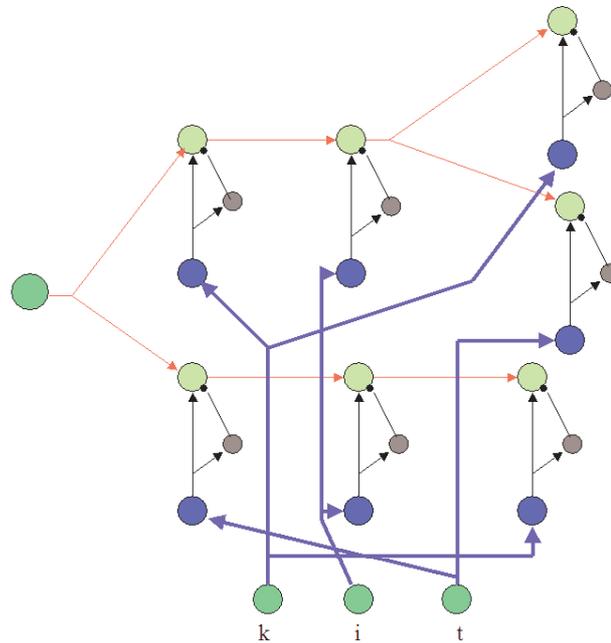


Abbildung 4.2–3: Konstruiertes mentales Lexikon für die Perzeption der Wörter „Kick“, „Kitt“, und „Tick“. Am unteren Rand die Phoneminstanzen, über die die Eingabe erfolgt.

Simulationen (zur Demonstration des Verarbeitungsverlaufs bei verschiedenen Input-Sequenzen):

```
kit.bat [sspwin.exe kit lexikon2.net kit.ein Z 50 v]
kik.bat [sspwin.exe kik lexikon2.net kik.ein Z 50 v]
tik.bat [sspwin.exe tik lexikon2.net tik.ein Z 50 v]
iki.bat [sspwin.exe iki lexikon2.net iki.ein Z 50 v]
```

Ein Spracherwerbsprozeß, der zum Aufbau eines solchen ausdrucksseitigen Lexikons dienen soll, muß zur Verstärkung potentieller Verbindungen führen:

- zwischen der Startzelle und den sequenzenbildenden Zellen der lexikalischen Segmente;

- zwischen den einzelnen sequenzenbildenden Zellen und
- zwischen den Phoneminstanzen, über die der Input erfolgt, und den instanzenbildenden Zellen der lexikalischen Segmente.

Es sollte beachtet werden, daß nicht die Aussage beabsichtigt ist, daß im Bereich der Phonologie andere Strukturen gelten als im Bereich der lexikalischen Ausdrucksseiten. Die Verallgemeinerung der neuronalen Verschaltung über die verschiedenen Verarbeitungsebenen hinweg bedarf aber noch weiterer, ergänzender Überlegungen.

Der dabei erforderliche Instanzenbildungsprozeß verwendet den in Kapitel 2 beschriebenen Mechanismus. Die Bildung der Sequenzverbindungen unterliegt sichtlich denselben Bedingungen wie die Instanzenbildung: Es ist prinzipiell(!) erforderlich, daß nicht mehrere Vorgänger einen Nachfolger teilen, also wird man für diese Verbindungen denselben Lernprozeß annehmen. Von besonderer Bedeutung ist hier auch wieder der Parameter „Fixations-Zeitfenster“, (vgl. oben 2.3; Details bei Kochendörfer, 2000: 53): Eine verstärkte Verbindung wird nur fixiert (also von dem sonst gültigen raschen Abbau ausgenommen), wenn sie innerhalb des Fixations-Zeitfensters am Feuern der Zelle beteiligt war. Das Fixations-Zeitfenster ist in den Simulationen für die sequenzenbildenden Verbindungen generell auf 100 ms gesetzt.

Zur Realisierung einer Simulation des Erwerbsprozesses dient eine Architektur, die nur die festen Zellkombinationen nach Abbildung 4.2–2 mit einem ausreichend großen Angebot an potentiellen Verbindungen enthält, und Randstrukturen, die dem konstruierten Lexikonbeispiel der Abbildung 4.2–3 entsprechen (Abbildung 4.2–4).

Der Simulationsvorgang besteht in der Eingabe von vier Wiederholungen der Abfolge *kit kit tik tik kik*, jedes Lexem nach Aktivierung der Startzelle.

Simulation (übernommen aus Kochendörfer, 2000):

```
instlex.bat [sspwin.exe "Lernen eines ausdrucksseitigen Lexikons" instlex.net
instlex.ein Z 20 V]
```

Auf dem Simulationsbildschirm sind nur die instanzenbildenden Zellen (unterer Block) und die sequenzenbildenden Zellen (oberer Block) dargestellt. Auf die Eingabe des sprachlichen Materials folgt bei „Simulation bis Stop“ eine Pause, in der verstärkte, aber nicht fixierte Verbindungen abgebaut werden.

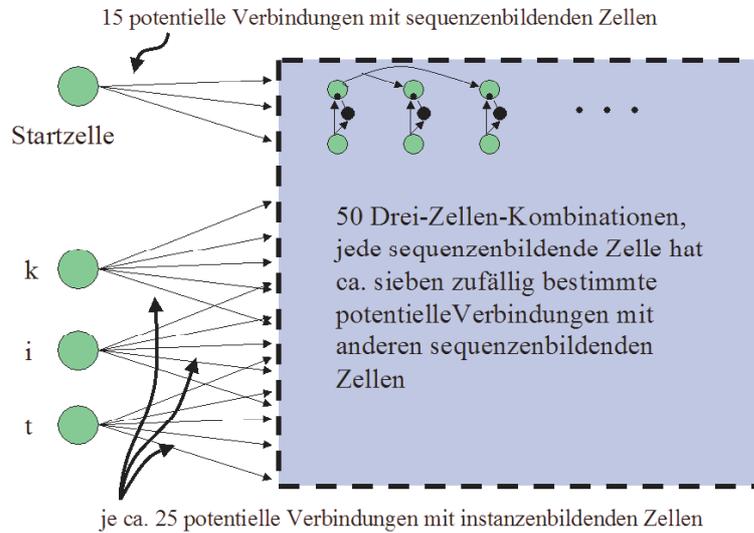


Abbildung 4.2-4: Architektur zur Simulation des Erwerbs lexikalischer Ausdrucksseiten

Das Ergebnis der Simulation, beschränkt auf die sequenzbildenden Verbindungen, ist in Abbildung 4.2-5 dargestellt. Es ist in mehrfacher Hinsicht bemerkenswert. Zunächst ist festzuhalten, daß die dem konstruierten Lexikon der Abbildung 4.2-4 entsprechende Funktionalität tatsächlich erreicht wird. Auf den ersten Blick verblüffend ist die hohe Redundanz, die aber dem allgemeinen Prinzip lokalistischer Architekturen entspricht, also durchaus positiv zu bewerten ist. Es entstehen auch Teilketten. Teilketten sind in den beobachteten Äußerungen von Kindern im Spracherwerb nicht unbekannt, wirken sich aber im Modell nur vorübergehend aus – solange noch keine vollständigen Ketten gelernt sind – und sind sonst Teilphänomen der Redundanz. Das Zusammenmünden von Bahnen auf sequenzbildenden Zellen ist unschädlich, da diese Bahnen immer gleichzeitig aktiviert werden und damit die Eindeutigkeit des Verarbeitungsablaufs nicht stören.

Insgesamt braucht das Modell den Vergleich mit konkurrierenden Vorstellungen nicht zu scheuen, selbst dann, wenn man davon absieht, daß es den bisher einzigen funktionierenden Versuch unter dem Anspruch der

neuronalen Präzisierung darstellt. (Eine Literaturübersicht zu gängigen Lexikonmodellen geben Frauenfelder & Floccia, 1999, eine kompetentere technische Bewertung der konnektionistischen Modelle TRACE und SHORTLIST findet sich bei Ellis & Humphreys, 1999.)

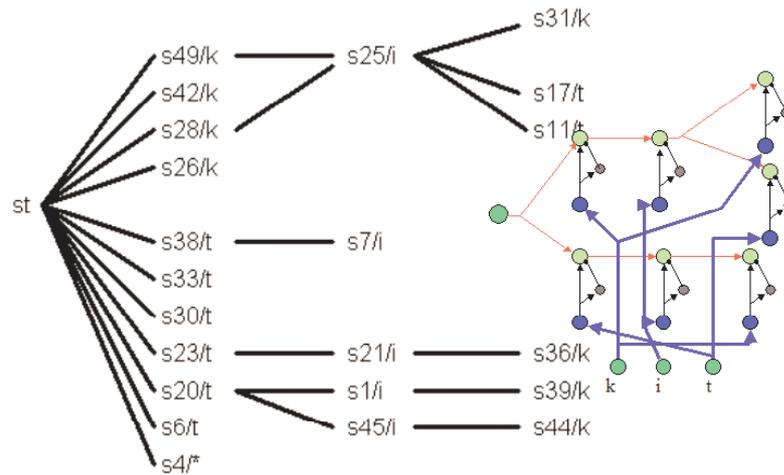


Abbildung 4.2-5: Ergebnis des Lernprozesses für *kit*, *tik* und *kik*, zusammengestellt aufgrund einer Zustandskopie des Netzes am Ende der Simulation (nur Sequenzverbindungen, die dauerhaft fixiert und funktionsfähig sind). Es ist jeweils die Identifikation der sequenzenbildenden Zelle in der Simulation angegeben, gefolgt von dem Phonem, für das sie nach dem Instanzenbildungsprozeß steht. Die mit * bezeichnete Zelle wird nach Ablauf der Simulation vom phonologischen Input nicht mehr aktiviert. Zum Vergleich ist das konstruierte Lexikon der Abbildung 4.2-3 eingeblendet.

4.3 Phonologische Länge

Alle Phoneme in den Simulationen des vorangegangenen Abschnitts waren Kürzen. Wenn wir davon ausgehen, daß Länge (also größere zeitliche Erstreckung) zu entsprechendem Wiederholen von Aktionspotentialen führt, sollte die Simulation von Lernprozessen mit Längen, z. B.

mit Langvokalen, keine prinzipiellen Schwierigkeiten machen. In einem Simulationsversuch mit der bisher verwendeten Architektur, aber mit einem um die Kette *tiik* („Teak“; gedoppeltes *i* bedeutet, daß dem Laut zwei Aktionspotentiale auf der Phoneminstantz entsprechen) erweiterten Input, ergibt sich die Struktur der Abbildung 4.3–1.

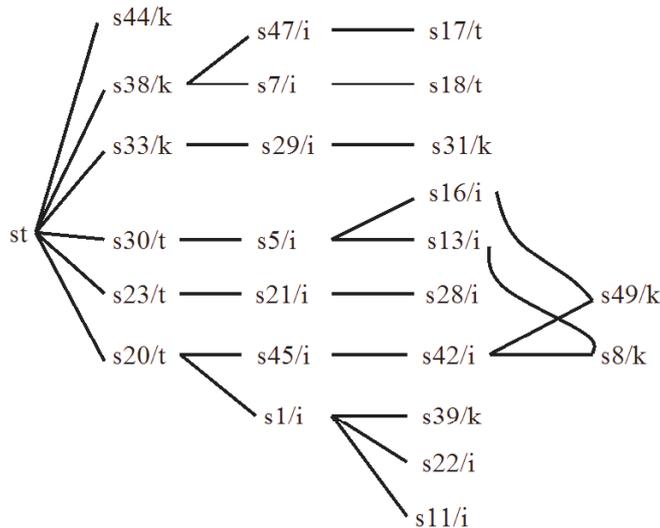


Abbildung 4.3–1: Ergebnis des Lernprozesses (nur Sequenzverbindungen, die dauerhaft fixiert und funktionsfähig sind) für *kit*, *tik*, *kik* und *tiik*; vgl. Abbildung 4.2–5

Simulation:

tiik.bat [sspwin.exe tiik teak.net teak.ein V]

Wie zu erwarten war, wird der Langvokal in der Lexikonstruktur durch zwei Kürzen dargestellt. Damit ist aber das Problem der Längen im Lexikon noch nicht gelöst, denn ein Langvokal – und dasselbe gilt auch für Konsonanten wie /n/, /m/ usw. – ist im Deutschen in weiten Grenzen beliebig längbar. Es ist dann nicht anzunehmen, daß eine Doppelung allein schon den Phänomenen gerecht wird. Beliebige Längbarkeit heißt: beliebig häufige Wiederholung des Aktionspotentials auf der betroffenen sequenzenbildenden Zelle ist zulässig. Da die sequenzenbildende Zelle nur dann feuert, wenn sie ein Erwartungspotential hat, muß ihre Aktivität

die Auslösung eines Erwartungspotentials bei ihr selbst bewirken. Das bedeutet, daß eine Schleife angenommen werden muß, die von der sequenzenbildenden Zelle ausgeht und auf sie selbst zurückführt, wie in Abbildung 4.3-2 angedeutet.

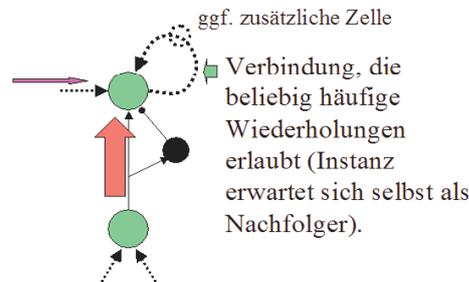


Abbildung 4.3-2: Sequenzenbildende Zelle mit Wiederholungsschleife

Da z. B. im Deutschen der Unterschied von Langvokal und Kurzvokal bedeutungsdistinktiv ist, kann man nicht annehmen, daß alle Segmente im Lexikon mit einer Wiederholungsschleife ausgestattet sein dürfen. Also ist ein entsprechender Lernprozeß für die Differenzierung von Länge und Kürze erforderlich.

Dieser Lernprozeß würde aber voraussetzen:

- ein mindestens zweimaliges Feuern der sequenzenbildenden Zelle unmittelbar hintereinander, ohne daß die Selbsterwartung bereits etabliert ist;
- eine zwischengeschaltete Zelle, wie schon in Abbildung 4.3-2 vorgehen, mit fester Verbindung auf der sequenzenbildenden Zelle, da das erstmalige Feuern die Lernbereitschaft der sequenzenbildenden Zelle abschalten muß.

Die erste der genannten Bedingungen ist nun offenbar nicht einzulösen. Alle Versuche, die Lernbarkeit der Wiederholungsschleife oder einer entsprechenden Funktionalität zu demonstrieren, sind bisher gescheitert. Wir müssen also annehmen, daß solche Schleifen zur angeborenen Ausstattung des Kortex gehören. (Diese Schleifen sind übrigens nicht gleichzusetzen mit den Schleifen, die für Gedächtnisphänomene nach dem Mu-

ster der „kreisenden Erregung“ angenommen worden sind, denn ihre Aktivierung ist an einen andauernden Anstoß durch den Input gebunden.)

Zur Gewährleistung von Kürzen (z. B. Kurzvokalen) muß dann ein Abbauprozess angenommen werden, nach der Regel:

Eine Verbindung wird abgebaut, wenn sie nicht innerhalb eines Zeitfensters am Feuern einer Zelle beteiligt ist (notwendigerweise beschränkt auf Zellen, die aktiv sind).

Man erinnere sich an die oben in Abschnitt 4.2 verwendete spiegelbildliche Regel; beide Regeln betreffen denselben Zelltyp:

Eine verstärkte Verbindung wird nur fixiert (von dem sonst gültigen raschen Abbau ausgenommen) wenn sie innerhalb des Fixations-Zeitfensters am Feuern der Zelle beteiligt war.

Man kann sich an dieser Stelle fragen, ob, wenn es möglich ist, Länge durch eine Wiederholungsschleife darzustellen, die Darstellung durch zwei Sequenzeinheiten überhaupt noch nötig ist. Maßgebend ist, daß Sequenzen unabhängig von der Existenz der Wiederholungsschleife gebildet werden und ihre Bildung nicht verhindert werden kann. Wahrscheinlich wird es auch in den meisten Fällen bei zwei Elementen bleiben, da nur die dieser Form entsprechende Länge die erforderliche Vorkommenshäufigkeit haben dürfte. Beide Sequenzbestandteile der Längenrepräsentation können dann mit einer Wiederholungsschleife ausgestattet sein, sofern ihr Abbau auch beim ersten Element durch Gebrauch verhindert wird. Es ist aber nur die zweite Schleife wirklich für die Funktion erforderlich. Abbildung 4.3-3 zeigt die sich ergebende Struktur.

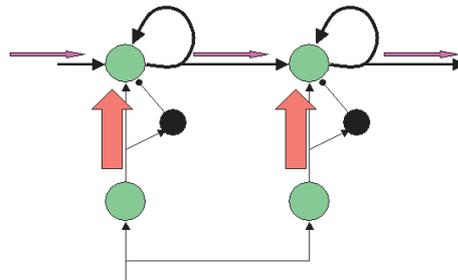


Abbildung 4.3-3: Lexikalische Entsprechung eines Langvokals

Diese Überlegungen gelten nur für Längen, die distinktiv sind und damit systematisch und entsprechend häufig vorkommen. Gelängte Konsonanten werden nur durch ein einzelnes Element mit Wiederholungsschleife realisiert, sofern gelängte Formen nur so häufig auftreten, daß zwar die Wiederholungsschleife nicht abgebaut wird, andererseits aber auch wiederholende Sequenzen nicht aufgebaut werden können.

4.4 Inhaltsseiten, Mehrdeutigkeit

Zusätzlich zu dem im vorigen Abschnitt behandelten Lernen der Ausdruckssequenz gehört, wie in 4.1 ausgeführt, zu den lexikalischen Lernprozessen noch die Verbindung der Ausdrucksseiten mit einem existierenden „inhaltlichen“ Konzept. Die Konzeptbildung selbst entspricht den in Kapitel 2 beschriebenen Mechanismen. Aus der Tatsache, daß das inhaltliche Konzept zu dem Zeitpunkt der Verknüpfung mit einer Ausdrucksseite schon eine funktionsfähige Einheit ist oder wenigstens sein kann, das heißt eine Einheit, die bottom-up Aktionspotentiale an übergeordnete Einheiten weitergibt, folgt, daß die Zelle, über die diese Verknüpfung passiert, eine ODER-Zelle sein muß. Außerdem folgt aus demselben Grund, daß diese ODER-Zelle zur Konzeptseite gehört und mit der sequenzenbildenden Zelle, die zur Konzepteinheit gehört, durch eine feste, nicht durch einen Lernprozeß aufzubauende Verbindung verknüpft sein muß (Abbildung 4.4-1).

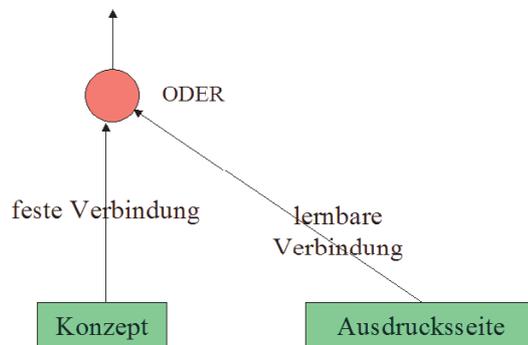


Abbildung 4.4-1: Die Zelle, über die Ausdrucksseite und Inhaltsseite eines Lexems verbunden sind, muß eine ODER-Zelle sein.

Der Lernprozeß kann nur dann funktionieren, wenn die inhaltliche Konzeptinheit einigermaßen synchron mit der lexikalischen Ausdrucksseite aktiviert ist. Die Aktivierung des Konzepts kann auch über einen top-down gerichteten Vorstellungsprozeß erreicht werden. Die Frage, woher das Kind weiß, worauf sich ein sprachlicher Ausdruck, den es hört, bezieht (vgl. Siskind, 2000), stellt sich nur in abgeschwächter Weise, weil ja die Umgebung bereits in entsprechend „ausgedünnter“ Form kategorisiert gedacht werden muß. Eine weitere Eigenschaft der zu lernenden Zuordnung von Ausdruck und Inhalt ergibt sich aus der Beobachtung, daß die Weiterverarbeitung eines akustischen Inputs, das heißt jetzt auch: eine Aktivierung oberhalb des ODER-Knotens, nicht erst erfolgt, wenn die gesamte Ausdruckssequenz abgearbeitet ist, sondern offenbar parallel zum Ablauf der Ausdruckssequenz. Das bedeutet, daß es von jeder Phoneminstantz in der Ausdruckssequenz ausgehend eine Verbindung zu dem mit dem inhaltlichen Konzept verbundenen ODER-Knoten geben muß. Die Frage ist nur, ob ein ODER-Knoten zur Zusammenfassung der Ausdruckssequenz dazwischen geschaltet sein kann (oben in Abbildung 4.1–2 mit Fragezeichen versehen). Diese Frage ist zu verneinen, weil die entsprechenden Verbindungen der Phoneminstanzen mit diesem Knoten nicht aufgebaut werden könnten. Die den Lernprozeß ermöglichende Erregung dieses Knotens könnte höchstens von dem ersten und dann jedem nachfolgenden Element der Kette ausgehen. Die Abstände zwischen den Lautsegmenten sind dafür aber zu groß. Also bleibt nur die in Abbildung 4.4–2 dargestellte Möglichkeit, die ohnehin die einfachste ist.

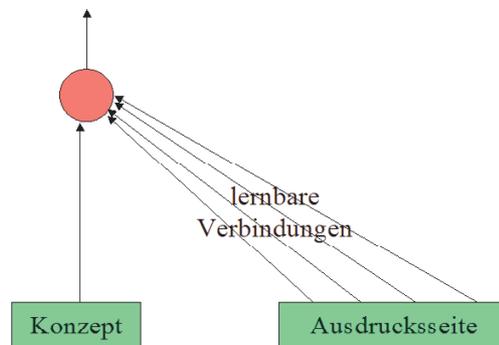


Abbildung 4.4–2: Jede einzelne Phoneminstantz der Ausdrucksseite hat eine Verbindung zur ODER-Zelle, die zum Bestand des inhaltlichen Konzepts gehört.

Die Simulationsarchitektur der Abbildung 4.4-3 realisiert dieses Prinzip in einer elementaren Anordnung, die zur Veranschaulichung der im Lernvorgang ablaufenden Teilprozesse dienen soll. Im Anfangszustand sind alle in der Abbildung fett hervorgehobenen Verbindungen, also nicht nur die ODER-Verbindungen, sondern auch die sequenzenbildenden Verbindungen, schwach und unwirksam. Die Aktivierung des Konzepts KITT einigermmaßen gleichzeitig mit der Eingabe der Ausdrucksseite führt zum korrekten Aufbau aller lernbaren Verbindungen.

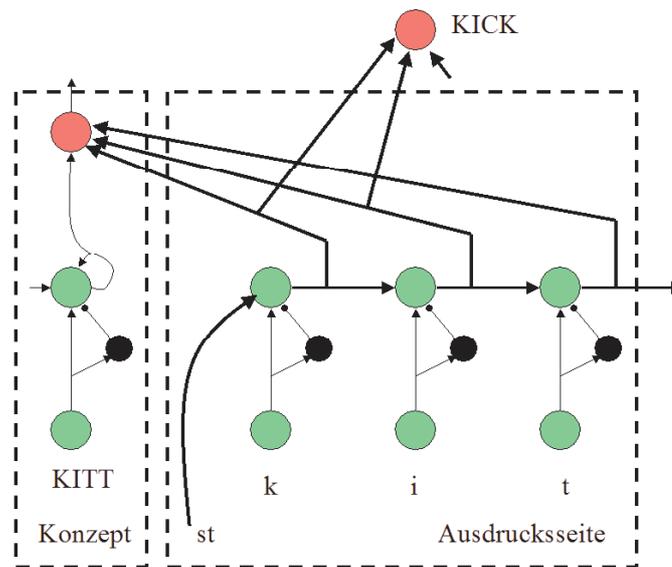


Abbildung 4.4-3: Einfache Simulationsarchitektur zur Zuordnung von Ausdrucksseiten zu inhaltlichen Konzepten; Erläuterungen im Text

Simulation:

oder.bat [sspwin.exe Konzeptbindung oder.net oder.ein V Z 20]

Mit „Simulation bis Stop“ läuft die Lernphase ab, in der Konzept und Ausdrucksseite simultan eingegeben werden. Anschließend kann mit der Leertaste die Eingabe der Ausdrucksseite allein bewirkt werden, um den Lernerfolg – die Etablierung des „Ersatzstimulus“ – zu kontrollieren.

In der Abbildung 4.4-3 wird nebenbei auch angedeutet, daß mehrere inhaltliche Konzepte gemeinsame Sequenzanfänge oder auch gemeinsame

komplette Ausdrucksseiten haben können. Das hat wichtige Konsequenzen für das Verständnis lexikalischer Prozesse insgesamt, ein Aspekt, der in der folgenden etwas komplexeren Simulation näher beleuchtet wird.

Die Simulationsarchitektur entspricht der Abbildung 4.2–4, es sind aber ODER-Zellen für die Konzepte TICK, KITT, TEAK, KICK, OBJEKT und VERHALTEN hinzugefügt. Das Konzept OBJEKT ist impliziert bei (das heißt, wird gleichzeitig aktiviert mit) KITT und TEAK, das Konzept VERHALTEN bei KICK und TICK (Abbildung 4.4–4).

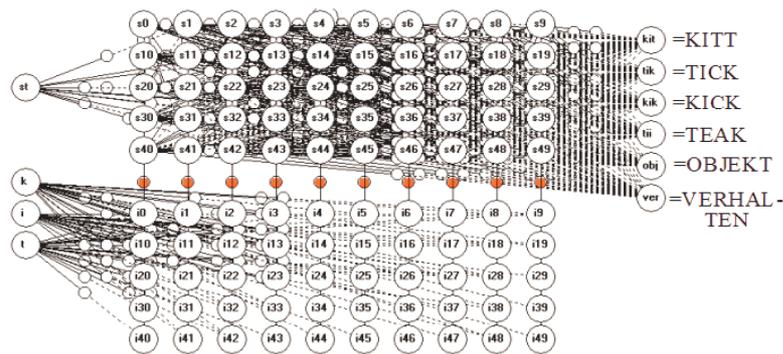


Abbildung 4.4–4: Zusammenfassende Simulation des Lexikonerwerbs (beschränkt auf die Sprachperzeption)

Der Input besteht zunächst in einigen Wiederholungen der Ausdrucksseiten, jeweils synchronisiert mit der Aktivierung der entsprechenden ODER-Zellen für die Inhalte. Anschließend werden zur Kontrolle des Lerneffekts die Ausdrucksseiten allein eingegeben.

Simulation:

```
inhalts.bat [sspin.exe Lexikonerwerb inhalts.net inhalts.ein V]
```

Der Lernvorgang für die Konzepte beschränkt sich, wie in der vorigen Simulation, auf die Zeitspanne bis zum Stop. Wenn man nur an der Kontrolle des Lernerfolgs interessiert ist, genügt es, weiter mit der Option „Simulation bis Stop“ zu simulieren; es sind Stops nach jeder Eingabe eingerichtet.

Der Inhalt für die Kette *kik* wird nicht eindeutig erworben, *kik* kommt während der Lernphase nur einmal vor. Die Kette *tiik* wird nach dem

zweiten i eindeutig identifiziert, das schließende k erhält dann aber keinen Inhalt mehr zugeordnet.

Wenn man in der Kannphase das Simulationsergebnis Zeittakt für Zeittakt beobachtet, sieht man:

- Mehrdeutigkeit führt prinzipiell zur Aktivierung mehrerer inhaltlicher Konzepte.
- Das gilt auch während der Eingabe einer Lautkette, solange sie mehrdeutig ist.
- Mehrdeutigkeit kann auch in der Form auftreten, daß ein abstrakteres (einfacheres) inhaltliches Konzept gleichzeitig mit dem entsprechenden konkreteren (komplexeren) Konzept aktiviert wird.

Im Zuge der Bearbeitung einer lexikalischen Ausdrucksseite reduziert sich typischerweise die Mehrdeutigkeit mit jedem erkannten – und als Bestandteil der aktiven Ketten möglichen – Phonem, wie in abstrakter Form in Abbildung 4.4–5 veranschaulicht.

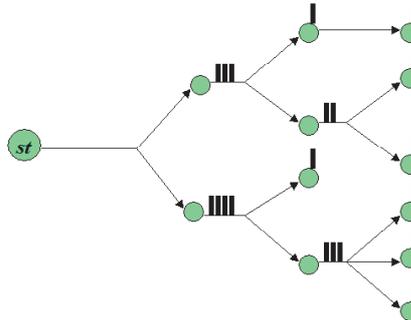


Abbildung 4.4–5: Schema zur Mehrdeutigkeit lexikalischer Teilketten. Wenn man von dem mit *st* bezeichneten Startknoten aus die lexikalischen Sequenzen entlanggeht, reduziert sich die Zahl der fett angedeuteten Bahnen, die unterschiedliche Inhalte realisieren, das heißt, jeweils zu unterschiedlichen ODER-Zellen führen. Ohne den Fall der Mehrdeutigkeit eines gesamten Lexems! Verändert nach Kochendörfer (1997).

Genaugenommen ist dieses Verhalten theoretisch nicht an die Zusammenlegung gleicher Kettenanfänge gebunden. Wenn Ressourcenbeschränkungen wirksam werden, können mehrere gleiche Kettenanfänge getrennt repräsentiert werden. Dann führt der fortschreitende Input zum Ausschneiden („Verstummen“) nicht kompatibler Ketten.

Die offenkundige Verwandtschaft mit dem älteren Kohortenmodell von Marslen-Wilson (Marslen-Wilson & Welsh, 1978, und Marslen-Wilson & Tyler, 1980) ist auf die gemeinsame Grundannahme zurückzuführen, daß die Weiterverarbeitung der Input-Information nicht auf das Wortende wartet. Die im Kohortenmodell vorgesehene Rückwirkungsmöglichkeit der semantischen Analyse auf die lexikalischen Vorgänge dürfte neuronal nicht realisierbar sein, und auch die an konnektionistische Vorstellungen angenäherte jüngere Version des Modells (Marslen-Wilson, 1987) scheitert wie die Vorbilder an der Präzisierungsforderung.

Das Merkmal der sofortigen Weitergabe der Inputinformation hat in einzelnimpulskodierenden, lokalistischen Systemen Nebenwirkungen, die z. B. für Gedächtnisphänomene im Bereich der Syntax (vgl. Kapitel 5) und für die Kohärenzkontrolle wesentlich sind.

Zum Abschluß eine Bemerkung zu der in den Simulationen beachteten Synchronisation zwischen der Aktivierung der Inhaltsseiten und der der Ausdrucksseiten. Die Zuordnung von Ausdruck und Inhalt im Spracherwerb geschieht offenkundig nicht schlagartig, sondern ist eine Sache des Zufalls oder mehrfacher Wiederholung. Vielleicht kann man deshalb auf eine Steuerung der Synchronizität verzichten. Eine Steuerung ist im Bereich des episodischen Gedächtnisses erforderlich, vgl. Kochendörfer (1999a). Das Beispiel des episodischen Gedächtnisses zeigt auch, daß die Steuerungsproblematik nicht notwendig Konsequenzen für die Form lexikalischer Repräsentationen haben muß.

4.5 Exkurs: Aufbau von Begriffshierarchien

Begriffshierarchien gehören zu den klassischen Gegenständen der linguistischen Semantik. Selbst wenn wir eine Semantik im engeren Sinn als Komponente eines neuronalen Modells ablehnen (vgl. oben Abschnitt 4.1 und Kochendörfer, 2002), ist damit die Annahme von Begriffshierarchien nicht unmöglich geworden, sie müssen nur sozusagen auf Strukturen verschoben werden, die zur Kategorisierung gehören.

Die Abbildung 4.5–1 zeigt das Beispiel einer einfachen Begriffshierarchie, in der Form eines semantischen Netzes notiert.

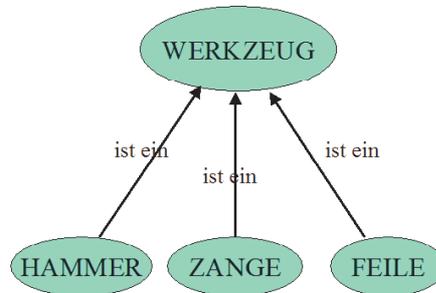


Abbildung 4.5–1: Begriffshierarchie „Werkzeuge“ als semantisches Netz

Die hierarchische (mehrschrittige) Konzeptbildung, die in Abschnitt 2.4 behandelt worden ist, ist insofern vom Aufbau von Begriffshierarchien verschieden, als im Fall der Begriffshierarchien ja nicht ein komplexeres Konzept an der Hierarchiespitze aus einfacheren Konzepten zusammengesetzt werden soll. Die Verhältnisse bei Begriffshierarchien sind genau umgekehrt: Die Hierarchiespitze wird von dem merkmalsärmeren Konzept eingenommen.

Hinweise auf die psychische Realität solcher Strukturen oder besser: auf die Realität entsprechender Leistungen ergeben sich aus der Beobachtung von Formulierungsstrategien (z. B. bei Benennaufgaben) der Form „das ist ein Werkzeug, mit dem man ..., eine Feile“ oder der Beobachtung von Versprechern vom Typ „eine Zange äh eine Feile“ oder dem Auftreten von Fehlkategorisierungen und Kompensationsphänomenen bei Aphasien und Demenzen (Paraphasien).

Die *neuronal* Realisierung einer entsprechenden Hierarchie ergibt sich aus der Überlegung, daß die Gesamtheit der definierenden Merkmale des übergeordneten Begriffs bzw. der Begriff selbst in die Definition der untergeordneten Begriffe eingeht. Zusätzlich enthalten die untergeordneten Begriffe weitere spezifizierende Merkmale. Um die beobachteten „Entgleisungen“ in der Produktion und Perzeption zu erklären, muß außerdem eine die Struktur zusammenschließende Spitze angenommen werden, die nicht mit dem übergeordneten Konzept identisch sein kann,

da die untergeordneten Konzepte ja das übergeordnete nicht definieren. Damit ergibt sich schematisch die Architektur von Abbildung 4.5–2.

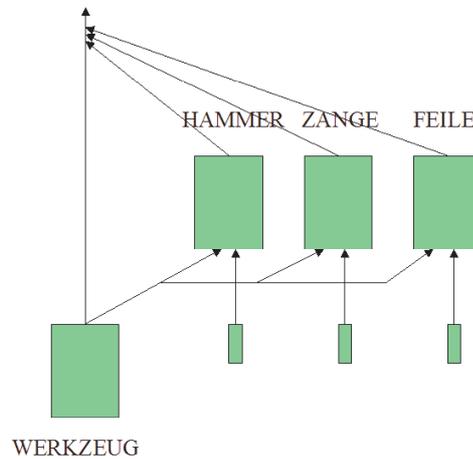


Abbildung 4.5–2: Schema einer Begriffshierarchie in einem neuronalen Modell. Neuronenkomplexe sind durch Rechtecke dargestellt.

Die zusammenfassende Spitze muß auf jeden Fall durch eine ODER-Zelle realisiert sein, die über eine feste Verbindung von dem übergeordneten Begriff aus erreicht wird. Die anderen Verbindungen auf dieser Zelle sind lernbare Verbindungen. Der Spracherwerbsvorgang würde in diesem Fall von dem übergeordneten, am wenigsten spezifizierten Begriff ausgehen. Wenn wir jeweils die ODER-Zellen zu den Konzept-Realisationen rechnen, ist es am natürlichsten, ein entsprechendes Angebot an lernbaren Verbindungen zwischen ODER-Zellen anzunehmen.

Damit ergibt sich die neuronale Präzisierung der Abbildung 4.5–3. Die gestrichelte Verbindung muß durch einen Lernprozeß verstärkt werden, damit die vorausgesetzte Hierarchie entsteht. Dabei ist die fett ausgezogene potentielle lernbare Verbindung ein Problem. Wenn es solche Verbindungen gibt, besteht die Gefahr der Bildung von Endlosschleifen. Man kann sich überlegen, ob die Existenz solcher Verbindungen auszuschließen ist. Das scheint kaum möglich zu sein. Man beachte, daß bei der Annahme lernbarer Verbindungen zwischen ODER-Zellen auch Ringe entstehen können, die über drei und mehr Zellen führen.

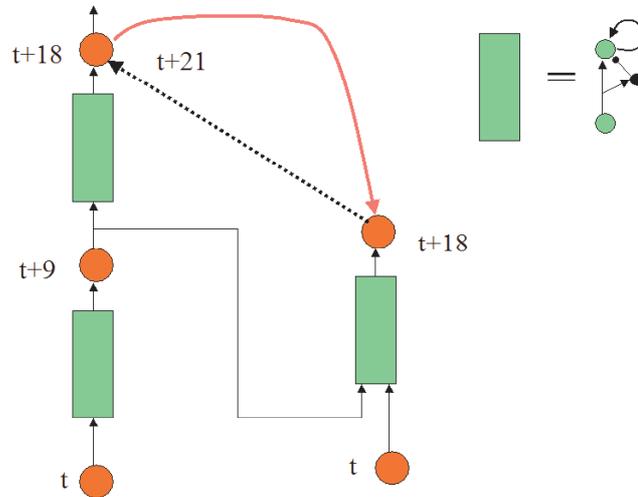


Abbildung 4.5–3: Neuronale Präzisierung der Repräsentation einer Begriffshierarchie (beschränkt auf zwei Begriffe, z. B. WERKZEUG und HAMMER), erster Entwurf, mit Zeitangaben für das Feuern der einzelnen Zellen bei Input des spezifischeren Konzepts zum Zeitpunkt t . Die Signallaufzeit von Zelle zu Zelle ist überall mit drei Zeittakten angenommen.

Die in der Abbildung angedeuteten Zeitverhältnisse (Signallaufzeiten) erlauben es, daß die ODER-Verbindungen in der Simulation tatsächlich aufgebaut werden.

Simulationen:

hier1.bat [sspwin.exe Hierarchie hier1.net hier1.ein Z 120 V]

(Es gibt keine „rückwärtsgerichtete“ verstärkbare Verbindung, also entsteht keine Endlosschleife.)

hier2.bat [sspwin.exe Hierarchie-mit-Endlosschleife hier2.net hier2.ein Z 120 V]

(Mit „rückwärtsgerichteter“ verstärkbarer Verbindung. Die Endlosschleife entsteht zwangsweise.)

Die Gefahr von Endlosschleifen, die der Gefahr von epileptischen Anfällen gleichkommt, verschwindet, wenn man, wie in Abbildung 4.5–4, die ODER-Verbindung von der sequenzenbildenden Zelle des untergeordneten Begriffs ausgehen läßt. Statt dessen entsteht jetzt allerdings ein Laufzeitproblem.

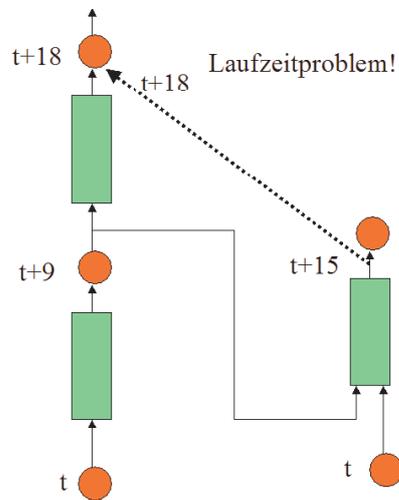


Abbildung 4.5–4: Architektur ohne die Gefahr von Endlosschleifen. Die analog Abbildung 4.5–3 eingetragenen Zeitpunkte des Feuerns der Zellen weisen allerdings auf ein Laufzeitproblem hin. Weitere Erläuterungen im Text.

Der Lerneffekt bei der ODER-Verbindung kann erst eintreten, wenn die synaptische Aktivität wirksam geworden ist, das heißt ein EPSP bewirkt hat, also muß die Refraktärphase der ODER-Zelle abgewartet werden. Das ist bei der Anordnung in Abbildung 4.5–4 nicht gewährleistet. Eine naheliegende Lösung des Problems wäre die Annahme, daß die Aktivierung des komplexeren Begriffs um eine entsprechende Zeitspanne verzögert ist.

Simulationen:

hier3.bat [sspwin.exe Laufzeitproblem hier3.net hier3.ein Z 120 V]
 (Die gewünschte ODER-Verbindung wird aufgrund des Laufzeitproblems nicht gebildet.)

hier3a.bat [sspwin.exe Inputverzoeigerung hier3.net hier3a.ein Z 120 V]
 (Verspätung des Inputs für HAM gegenüber WER um 12 Zeittakte)

Eine andere, weniger künstliche Annahme ist die, daß die ODER-Verbindung von einer Instanz des komplexeren Begriffs ausgeht, wie in Abbildung 4.5–5 dargestellt.

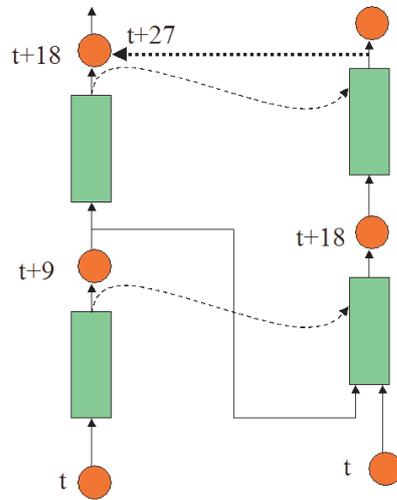


Abbildung 4.5–5: Hierarchiebildung mit einer ODER-Verbindung, die von einer Instanz des komplexeren Begriffs ausgeht. Die dünn gestrichelten Pfeile stellen Sequenzverbindungen dar, die ebenfalls verstärkt werden können.

In der Abbildung ist zusätzlich angedeutet, daß in Verbindung mit dem Aufbau der ODER-Verbindung auch ggf. vorhandene Sequenzverbindungen verstärkt werden können, da die entsprechenden sequenzenbildenden Zellen in geeignetem Abstand erregt werden.

Simulation:

hier4.bat [sspwin.exe Instanzenverbindung hier4.net hier4.ein Z 60 V]
 (Nur die ODER-Verbindung, die von der Instanz des komplexeren Konzepts ausgeht, wird verstärkt. Sie ist allerdings erst nach mehreren Lernschritten funktionsfähig, da die Laufzeitdifferenz größer ist als bei der Simulation mit Verspätung des Inputs. Die in Abbildung 4.5–5 gestrichelten Sequenzverbindungen werden ebenfalls aufgebaut.)

Die in Abbildung 4.5–5 vorgeschlagene Konstruktion setzt voraus, daß die in der folgenden Abbildung 4.5–6 gestrichelte potentielle Verbindung nicht existiert.

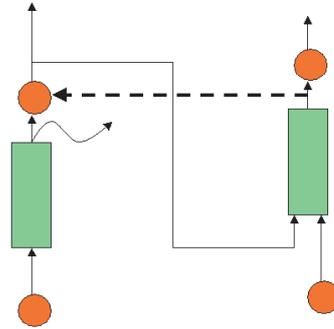


Abbildung 4.5-6: Störende potentielle Verbindung

Das wichtigste Argument für diese Annahme ist der Hinweis darauf, daß diese Verbindung zum Entstehen von Endlosschleifen führt. Einen Lernvorgang mit dieser Konsequenz zeigt die folgende Simulation:

Simulation:

```
endlos.bat [sspwin.exe Endlosschleife endlos.net endlos.ein Z 60 V]
```

Die Störung ist sichtlich an das zusätzliche Erfordernis gebunden, daß die Verbindung der ODER-Zelle in der linken Hälfte der Architektur mit dem unteren Ende der Zellanordnung auf der rechten Hälfte durch den Lernvorgang ein überschwelliges Gewicht bekommt. Man muß sich also fragen, ob das Problem nicht generell durch Begrenzung des maximalen Synapsengewichts für solche Verbindungen beseitigt werden könnte. Das würde aber offenbar zur Folge haben, daß einfache „Vervielfältigungen“ von Konzepten ohne zusätzliche Spezifizierung nicht möglich wären, eine Konsequenz, die im Zusammenhang mit der phonologischen Repräsentation lexikalischer Ausdrucksseiten und wahrscheinlich auch für Gedächtnisbildungsprozesse nicht akzeptiert werden kann.

Also bleibt wohl doch nur die Annahme, daß die ODER-Verbindung nicht vorgesehen ist, und zwar deshalb, weil (und immer dann nicht, wenn) eine direkte(!) Rückverbindung von der ODER-Zelle, auf die diese Verbindung führt, zu der Zellgruppe existiert, von der diese Verbindung ausgeht. Verbindungen mit noch mehr dazwischenliegenden Zellen sind unkritisch, weil die Lernbereitschaft der ODER-Zelle rasch abklingt.

Eine „Nebenwirkung“ der Überlegungen zur Bildung von Begriffshierarchien ist die Konsequenz, daß offenbar das Angebot an lernbaren (poten-

tiellen) Verbindungen in gewisser Weise beschränkt sein muß. Lernbare Verbindungen dürfen nicht von ODER-Zellen zu ODER-Zellen führen, wohl aber von ODER-Zellen zu instanzbildenden Zellen. Sequenzenbildende Zellen haben entwickelbare Verbindungen sowohl zu ODER-Zellen als auch zu anderen sequenzenbildenden Zellen usw. Es muß also zellspezifische Verbindungsarchitekturen geben, auch was Verbindungen betrifft, die nicht „fest“ (das heißt in funktionsfähiger Form angeboren) sind. Eine einigermaßen vollständige Übersicht kann erst am Ende des folgenden Abschnitts gegeben werden, wenn auch noch die Bedürfnisse der Sprach*produktion*, wenigstens im lexikalischen Bereich, abgeklärt sind.

4.6 Produktion

Nach der in Abbildung 4.1–3 dargestellten Auffassung vom Verhältnis von Ausdrucksseiten und Inhaltsseiten im Lexikon setzt die lexikalische Produktion nicht die Bildung einer vollständigen Vorstellung des auszudrückenden Inhalts voraus, genausowenig wie die Perzeption notwendig von vollständigen Vorstellungen begleitet wird. Es genügt prinzipiell, wenn in beiden Fällen ein Großmutterknoten, bestehend aus einer bottom-up und einer top-down orientierten Zelle bzw. entsprechenden Zellverbänden aktiviert wird. Das hat für den Spracherwerb die Konsequenz, daß Ausdrucksseiten und Inhaltsseiten relativ unabhängig voneinander weiterentwickelt werden können. Insbesondere stört die Weiterentwicklung des inhaltlichen Konzepts, die ja auch besonders flexibel geschehen muß, nicht notwendig die Zuordnung Ausdruck–Inhalt. Es ist auch nicht erforderlich, daß als Ergebnis eines Sprachverstehensprozesses vollständige inhaltliche Konzepte in das Langzeitgedächtnis kopiert werden, sondern es genügt die Bildung einer Instanz des Großmutterknotens, und solche Instanzen können ihrerseits Ausgangspunkte von Produktionsprozessen sein. Diese Vorstellung ist in Kochendörfer (2002) mit dem Schema der Abbildung 4.6–1 veranschaulicht worden.

Somit ist es möglich, die lexikalische Produktion und ihre Entwicklung im Spracherwerb unabhängig von der Produktion von Vorstellungen, das heißt beschränkt auf die lexikalischen Ausdrucksseiten zu behandeln. Die Produktion von Vorstellungen ist ein Thema, das weit über den linguistischen Bereich des Spracherwerbs hinausgeht.

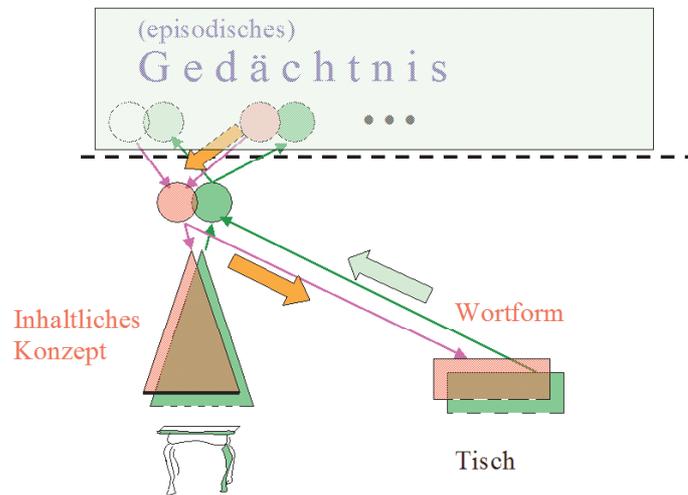


Abbildung 4.6–1: Schema des lexikalischen Produktionsprozesses, verändert nach Kochendörfer (2002). Durch Blockpfeile ist der Verlauf der Produktion angedeutet. Man beachte, daß die Produktion einen Rückspiegelungsprozeß einschließt, worauf weiter unten in diesem Abschnitt noch näher Bezug genommen wird.

Als Grundvoraussetzung für die Modellierung der lexikalischen Produktion gilt, daß das Perzeptionslexikon offenbar vom Kind ohne sofortige Produktion aufgebaut werden kann. Das bedeutet, daß die Perzeptionsstrukturen durch Produktionsstrukturen ergänzbar sein müssen, und zwar so, daß eine zuvor gelernte Perzeptionsstruktur einen wesentlichen Einfluß hat auf die entstehende Produktionsstruktur. Zwei verschieden strukturierte Lexika können nicht angenommen werden, es wäre unmöglich, die beobachtbare Leichtigkeit des Übergangs von der Perzeption zur Produktion (vor allem wenn man rein phonologische Phänomene ausklammert) zu erklären (anders Engelkamp & Rummer, 1999).

Was muß also dem Perzeptionslexikon hinzugefügt werden, um es für die Produktion auszustatten? Was ist angeboren?

Wir gehen aus von einer Perzeptionsstruktur, wie in Abbildung 4.6–2 für /tik/ wiedergegeben. Diese Struktur ergibt sich aufgrund der in den vorangegangenen Abschnitten behandelten Lernvorgänge.

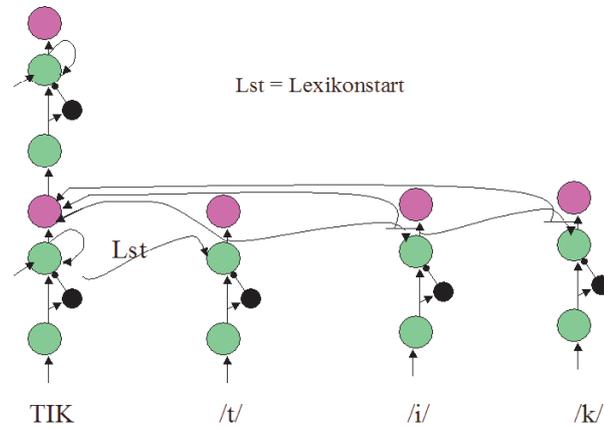


Abbildung 4.6–2: Perzeptionsstruktur für das Wort /tik/ „Tick“

Wenn zu den Perzeptionsstrukturen parallele Top-down-Strukturen erforderlich sind, muß es sich dabei um das Teilsystem der prädiktiven Zellen handeln, von denen oben in Abschnitt 2.6 schon einmal die Rede war. Es entsteht damit die Struktur der Abbildung 4.6–3:

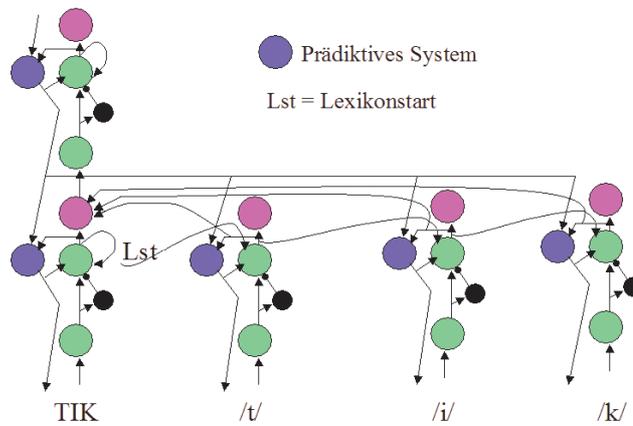


Abbildung 4.6–3: Perzeptionsstruktur für das Wort /tik/ „Tick“, ergänzt durch ein paralleles Top-down-System von prädiktiven Zellen

Die Zuordnungen von prädiktiven Zellen zu sequenzenbildenden Zellen sind fest und können für angeboren gehalten werden, die Top-down-Verbindungen dagegen müssen in jedem Fall durch einen Lernprozeß aufgebaut werden.

Man könnte der Meinung sein, daß mit der Einführung von Top-down-Parallelen das Problem der Produktion lexikalischer Ausdrucksseiten im wesentlichen gelöst ist. Es entstehen aber, wie in Kochendörfer (1997) demonstriert worden ist, Probleme mit der Gewährleistung des zeitlichen Verlaufs und auch Probleme hinsichtlich der Lernbarkeit von Strukturen, die zusätzlich erforderlich wären und auf die wir hier nicht näher eingehen wollen. Das hat zur Einführung eines sog. „Produktionstaktsystems“ geführt, wie in Abbildung 4.6–4 dargestellt.

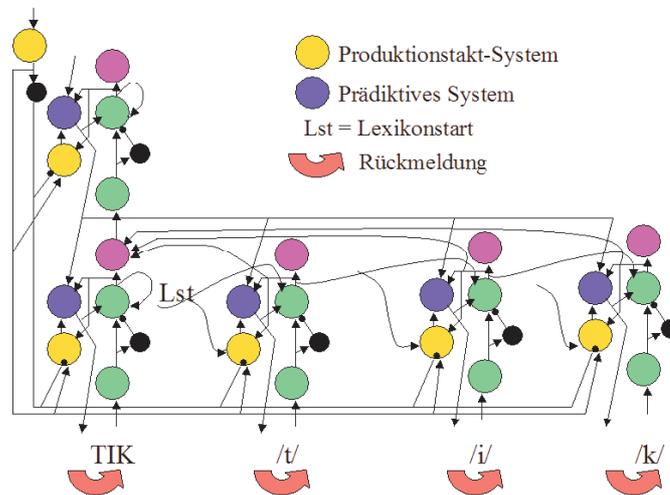


Abbildung 4.6–4: Produktionsstruktur für das Wort /tik/ „Tick“. Zu den gestrichelten Verbindungen vgl. unten Abbildung 4.6–6 und die Erläuterungen dort im Text.

Wieder sind die sich gleichartig wiederholenden Strukturen als angeboren zu denken. Mit dieser Architektur können, wie die Simulation zeigt, tatsächlich lexikalische Ketten mit ausreichender Flexibilität produziert werden, wenn zuvor das inhaltliche Konzept oder auch nur die zu diesem Konzept gehörige Instanz (das entspricht dem Großmutterkno-

ten) aktiviert worden sind und anschließend Taktimpulse in realistischen Abständen auf das Produktionstaktsystem gegeben werden.

Simulation:

prod.bat [sspin.exe Produktion prod.net prod.ein Z 50 v x 10 y 5]

Bemerkenswert ist, daß die Produktion wesentlich auf dem Zusammenspiel von Top-down-Prozessen und Bottom-up-Rückmeldung beruht und bei Fehlen der Rückmeldung abbricht. Dieses Zusammenspiel kann nur funktionieren, wenn die Innervierung der Muskeln bei der Produktion und die Rückmeldung so schnell sind, daß sie in der Zeitspanne „zwischen zwei Lauten“ (metaphorisch ausgedrückt) unterkommen. Man vergleiche die Kritik von Lenneberg (1967) an entsprechenden Produktionsvorstellungen, die allerdings offenbar von heute nicht mehr aktuellen Daten über Leitungsgeschwindigkeiten an Nervenfasern ausgeht. Man sollte nicht annehmen, daß die Rückmeldung notwendig über das Ohr erfolgt (man vgl. das Monitoring von „internal speech“ bei Levelt, 1989).

Die Abbildung 4.6–5 zeigt jetzt noch einmal zusammenfassend, welche Verbindungen an der Produktionsstruktur insgesamt durch Lernen verstärkt werden müssen.

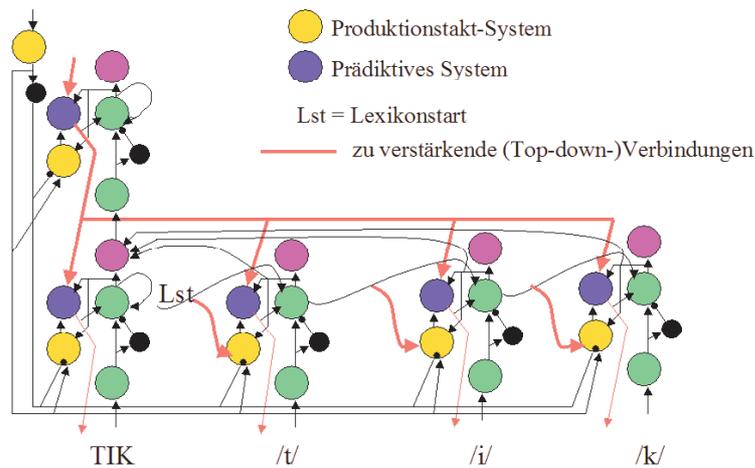


Abbildung 4.6–5: Durch Lernprozesse zu verstärkende Verbindungen in der Produktionsstruktur für das Wort /tik/ „Tick“

Die Verbindungen zwischen den prädiktiven Zellen sind ODER-Verbindungen und die zu den Zellen des Produktionstaktsystems sind Sequenzverbindungen. Beide Verbindungstypen entstehen – vielleicht überraschenderweise –, wenn man in einen Perzeptions-Input Produktionstaktimpulse einstreut. Der Input

st 10 lst 10 iti 30 tkt 50 it1 100 tkt 120 i11 170 tkt 190
 ik1 240 tkt 260

erzeugt aus der Perzeptionsstruktur des Lexikoneintrags /tik/ die gewünschte Produktionsstruktur. Eine kleine Korrektur ist allerdings erforderlich. Die in Abbildung 4.6–6 fett gekennzeichneten Verbindungen sind zuständig für die Erzeugung von Längen in der Produktion und haben also eine ähnliche Funktion wie die schleifenförmigen Verbindungen der sequenzenbildenden Zellen auf sich selbst zurück. Wie dort auch, muß hier für die Produktion angenommen werden, daß solche Verbindungen allmählich abgebaut werden, wenn sie keine Funktion haben. Der vorzusehende Mechanismus ist derselbe, wie der bei den schleifenförmigen Verbindungen der sequenzenbildenden Zellen (vgl. Abschnitt 4.3).

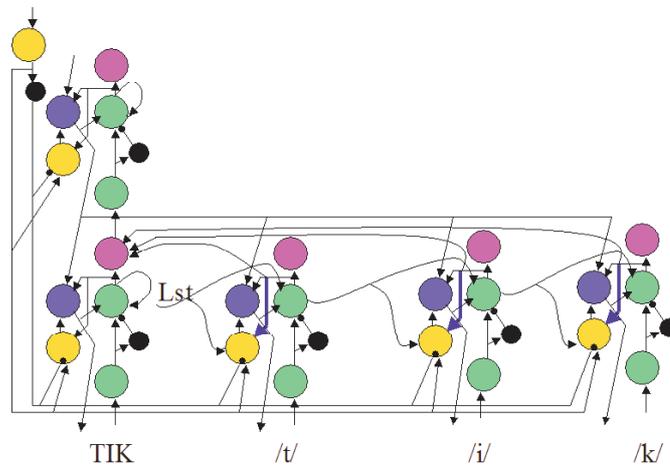


Abbildung 4.6–6: Zusätzlich abzubauen Verbindungen (fett eingezeichnet)

Nach dem entsprechenden „Vergessensprozeß“ ist die entstehende Architektur identisch mit der oben für die Produktionssimulation verwendeten.

Simulation:

tikprod.bat [sspin.exe “Lernen von Produktionsstrukturen” tikprod.net
tikprod.ein Z 50 V x 10 y 5]

(Zellen, die den Startkontext erzeugen, sind nicht sichtbar, ebenso das Watchdog-System.)

Die Bedürfnisse der Sprachverarbeitung im Bereich des Lexikons, Perception, Produktion und die erforderlichen Lernprozesse, führen zur Annahme einer wiederkehrenden „Elementarschaltung“ mit Neuronen, die durch unterschiedliche Verhaltensparameter gekennzeichnet sind. Diese Elementarschaltung ist zusammenfassend in Abbildung 4.6–7 dargestellt.

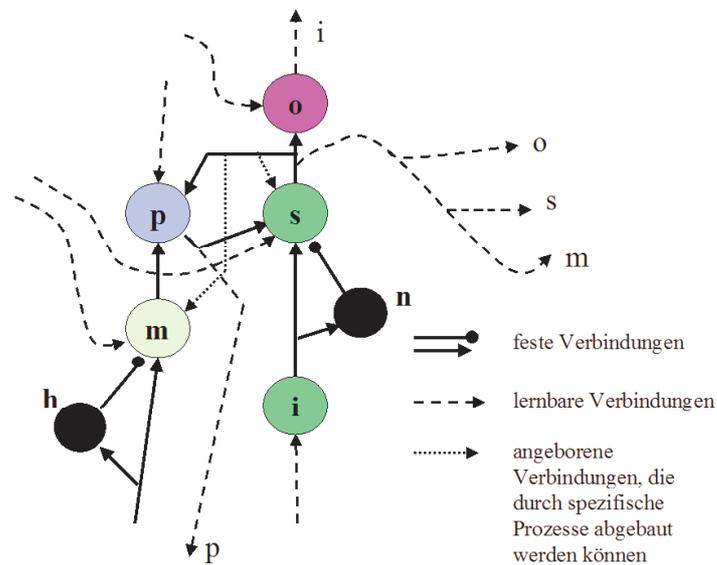


Abbildung 4.6–7: Elementarschaltung im Bereich des Lexikons. Zelltypen: o = ODER-Zelle, s = sequenzenbildende Zelle, p = prädiktive Zelle, i = instanzenbildende Zelle, n = hemmende Zelle, m = erregende Zelle im Produktionstaktssystem („Produktionsmerkmale“), h = hemmende Zelle im Produktionstaktssystem (kann auch für mehrere Elementarschaltungen gemeinsam sein)

Es wird sich zeigen, daß diese Elementarschaltung auch für den syntaktischen Bereich fast unverändert übernommen werden kann. Für die Spracherwerbsproblematik ist die Feststellung notwendiger kortikaler Strukturmerkmale deshalb interessant, weil damit die Diskussion über spezifische Grundlagen der Sprachfähigkeit im Vergleich zu anderen kognitiven Fähigkeiten auf eine verlässlichere Basis gestellt wird.

4.7 Revision lexikalischer Strukturen

Zwei Revisionsformen, die rein lautliche, auf einzelne Phoneme bezogene, und die Revision von Inhaltsseiten können hier ausgeklammert bleiben, da sie oben (Kapitel 2, Kapitel 3 und Abschnitt 4.5) bereits behandelt worden sind.

Damit bleiben nur noch Revisionen übrig, die die ausdrucksseitige Sequenz und ihre bloße Verknüpfung mit einem inhaltlichen Konzept betreffen. Aus der Durchsicht des sehr umfangreichen und einigermaßen sorgfältig dokumentierten Materials bei Elsen (1991) ergeben sich nur drei häufiger belegte Typen:

Typ /na:ne/ → /bana:ne/

Schwächer betonte Wortbestandteile werden häufig zunächst weggelassen (man vgl. dazu auch das Material in Demuth, 1996). Eine Revision durch Vorsetzen der unbetonten Elemente vor eine existierende Kette ist nicht möglich, die erste sequenzenbildende Zelle der bereits existierenden Kette ist „zugeordnet“ (im Sinne des Instanzenbildungsprozesses) und kann keine weiteren sequentiellen Verbindungen mit vorausgehenden Elementen eingehen. Also muß eine neue Kette /bana:ne/ (um bei diesem Beispiel zu bleiben) repräsentiert werden. Das ist angesichts der ohnehin anzunehmenden Redundanz des Lexikons keine besondere Schwierigkeit. Das alte inhaltliche Konzept kann auch an die neue Ausdrucksseite gebunden werden, weil hierfür, anders als beim Aufbau der Ausdruckssequenz, der Lernmechanismus der ODER-Zellen zuständig ist. Die alte Ausdrucksseite unterliegt, wenn umgebungssprachliches /bana:ne/ korrekt wahrgenommen wird, einem Vergessensprozeß, da die Kette /na:ne/ nicht mehr erreicht wird (nicht mit dem Wortanfang /ba/ verknüpft ist) und kein Neustart des Lexikons nach /ba/ erfolgt.

Typ /boi/ → /boime/

Die vorübergehende Produktion von fragmentarischen Wortanfängen ist aufgrund des Lernvorgangs beim Aufbau der Lautsequenzen zu erwarten (vgl. Abschnitt 4.2). Hier ist auch eine Erweiterung der existierenden Repräsentation möglich. Die Verbindung der Erweiterung mit einer existierenden Inhaltsseite ist unproblematisch.

Typ /ga:s/ → /gra:s/ oder /ketse/ → /kertse/

Solche Fälle sind, solange nur eine phonetische Umschrift vorliegt, manchmal schwer zu beurteilen. Ein Spektrogramm müßte zeitlich vermessen werden, um zu entscheiden, ob tatsächlich die Zahl der Sequenzelemente verschieden ist. Es ist leicht denkbar, daß sich der Vorgang in einigen Belegen auf eine rein lautliche Entwicklung reduzieren läßt. Wenn diese Möglichkeit ausgeschlossen werden kann, müssen Wahrnehmungsprobleme bei Konsonantenverbindungen – vielleicht auch verursacht durch mangelnde Stabilität der Artikulation in der Umgebungssprache – zur Erklärung der verkürzten Form herangezogen werden. Nach Weiterentwicklung der lautlichen Wahrnehmung wird dann vom ggf. korrekten Wortanfang ausgehend eine neue ausdrucksseitige Kette für das gesamte Wort gebildet, einschließlich der entsprechenden neuen Verbindungen mit der Inhaltsseite. Die verkürzte Form verschwindet, weil sie nicht mehr im Input vorkommt.

Man beachte, daß Wortformen auch ohne Ersatz vergessen werden können und dann später ggf. durch Wortformen, die der fortgeschritteneren Entwicklung entsprechen, ersetzt werden!

5 Allgemeine Überlegungen zum Erwerb der Syntax

5.1 Das „Bootstrapping“-Problem

Das Bootstrapping-Problem ergibt sich innerhalb der generativen Sprach-erwerbstheorie als Folge der Annahme einer angeborenen Universalgrammatik. Wenn in den syntaktischen Prinzipien der Universalgrammatik Kategorien verwendet werden, die Bezug nehmen auf syntaktische Eigenschaften lexikalischer Einheiten, muß – unter der selbstverständlichen Annahme der Einzelsprachlichkeit lexikalischer Ausdrucksseiten – im Spracherwerb ein Bezug hergestellt werden zwischen lexikalischer Ausdrucksseite und syntaktischer Kategorie.

Oberflächlich kann also die Aufgabe für das sprachlernende Kind so gesehen werden, daß es entscheiden muß, welche syntaktische Kategorie einer lexikalischen Ausdrucksseite zukommt. Es sind verschiedene Vorschläge zur Modellierung dieses Vorgangs gemacht worden, am bekanntesten ist das „semantische Bootstrapping“, das ursprünglich von Grimshaw (1981) vorgeschlagen und dann von Pinker in mehreren Arbeiten (Pinker, 1982, 1984, 1987 und 1989) weiterentwickelt worden ist.

Die einzelnen Vorschläge zur Lösung des Bootstrapping-Problems sollen hier nicht kommentiert und bewertet werden, was uns hier interessiert, ist die Relevanz des Problems an sich für ein neuronales Modell der Sprachverarbeitung unter den Bedingungen des lokalistischen Verarbeitungsprinzips und der Einzelimpulskodierung. Dabei stellt sich zunächst die Frage der Repräsentationsform für die Universalgrammatik, die im Gehirn des Kindes – mindestens in den hier gebrauchten Ausschnitten

ausgereift – vorhanden sein soll. Die Universalgrammatik muß, metaphorisch gesprochen, „innen“, also relativ peripheriefern lokalisiert werden, da sie ja höhere Stufen der Verarbeitung steuern soll. Die im Kind aufgrund des sprachlichen Inputs entstehenden Strukturen liegen dagegen „außen“. Die Verbindung zwischen der innenliegenden und der außenliegenden Struktur stellt das Problem dar, wie schematisch in Abbildung 5.1–1 veranschaulicht.

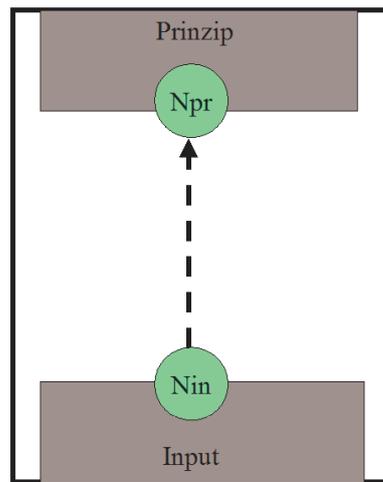


Abbildung 5.1–1: Schematische Veranschaulichung des Bootstrapping-Problems. Die gestrichelte Verbindung muß über Lernprozesse aufgebaut werden.

Die Kreise in der Abbildung symbolisieren eine Anzahl von Neuronen, die jeweils dem peripheren Bereich (Nin) bzw. dem „inneren“ Bereich (Npr) zugeordnet sind. Die Nin-Zellen erhalten über ihre Verbindungen zur Sinnesperipherie ihre Bedeutung, es ist eigentlich irrelevant, ob man sie als „semantisch“ auffaßt oder nicht. Die Npr-Zellen haben bestenfalls eine bestimmte strukturelle Position im Netz, sind aber sonst bedeutungslos.

Das Problem der Definition der Npr-Zellen ist eine wesentliche Quelle für die Schwierigkeit des Bootstrapping-Prozesses. Der Aufbau bottom-up gerichteter Verbindungen, für die ein Ziel vorgegeben ist, setzt immer

die vorangehende Aktivierung dieses Ziels voraus. Wenn das Ziel nicht bekannt ist, können nun nicht einfach alle möglichen Zielzellen voraktiviert werden, das würde prinzipiell zur Verbindung einer gerade feuernenden Nin-Zelle mit allen oder jedenfalls vielen Zielzellen führen. Also muß nach irgendeinem schematischen Ablauf probiert werden. Der Aufbau der gewünschten Verbindungen muß durch einen Versuchs-Irrtums-Prozeß erfolgen. Betrachten wir jetzt den Aufbau der ersten solchen Verbindung. Selbst wenn man anzunehmen bereit wäre, daß es möglich ist, überhaupt eine sinnvolle Zielzelle auszuwählen, bliebe doch noch das Problem, zu zeigen, wie sich Erfolg und Mißerfolg unterscheiden. Die Korrektheit der Parameterfixierung kann (z. B. über eine Watchdog-Schaltung) keinesfalls streng lokal entschieden werden. Kontext muß aber innenliegender Kontext sein und kann nur als Folge weiterer vorläufiger, versuchsweiser Parameterfixierungen entstehen, was zu einer kaum mehr abschätzbaren Komplexität des Versuch-Irrtums-Prozesses führt.

Dazu kommt, daß einmal versuchsweise gebildete Verbindungen nicht sofort wieder verschwinden können. Eine hohe Vergessensrate würde den Vorgang der Kontextüberprüfung unmöglich machen. Das heißt, es wäre ein langwieriger Anpassungsprozeß anzunehmen, der entweder durch einen strengen Reifungsplan gesteuert sein müßte – eine Möglichkeit, deren neuronale Realisierung völlig offen ist – oder der zu langanhaltenden unvorhersehbaren Fehlproduktionen führen würde, die man einfach so an Kindern nicht beobachtet.

Die Frage, ob es einen Weg von der Wortbedeutung zu einer syntaktischen Kategorie wie z. B. Nomen gibt, das heißt, ob semantisches Bootstrapping möglich ist, stellt sich gar nicht erst. Die Probleme sind viel grundsätzlicherer Art, sie würden selbst dann nicht verschwinden, wenn jedes Wort bildlich gesprochen die Bezeichnung seiner Wortart auf dem Rücken trüge.

Versuchs-Irrtums-Prozesse spielen durchaus im Bereich des Spracherwerbs eine wesentliche Rolle, z. B. beim Erwerb der motorischen Seite der Phonologie, wie oben in Abschnitt 3.4 dargestellt. Dort sind aber andere Voraussetzungen gegeben, die man analog zu Abbildung 5.1–1 wie in Abbildung 5.1–2 wiedergeben kann.

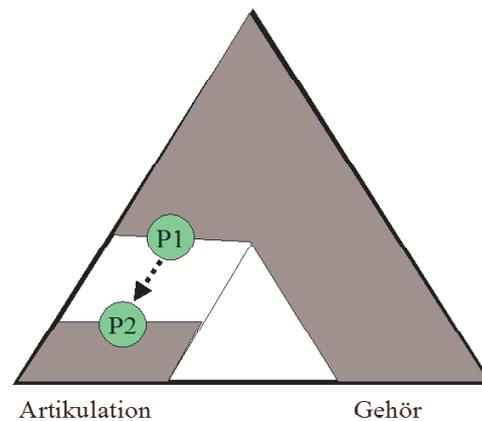


Abbildung 5.1–2: Schematische Veranschaulichung der Voraussetzungen des Versuchs-Irrtums-Prozesses beim Erwerb der artikulatorischen Phonologie

Die Unterschiede bestehen darin, daß die mit P1 gekennzeichneten Zellen durch Verbindungen mit der Peripherie definiert sind, genauer dadurch, daß sie zu Top-down-Bahnen gehören, die entsprechenden Bottom-up-Bahnen genau parallel zugeordnet sind. Auch die Zellgruppe P2 ist durch ihre Verbindungen mit der motorischen Peripherie definiert. Außerdem ist, wie in Abschnitt 3.4 gezeigt, eine „lokale“ Erfolgskontrolle des Produktionsversuchs möglich. Das sind alles Momente, die den Versuchs-Irrtums-Prozeß erleichtern. Schließlich ist im Fall der artikulatorischen Sprachproduktion der Versuchs-Irrtums-Prozeß am Verhalten der Kinder in der Lallphase direkt ablesbar. Der Vergleich eines eventuellen syntaktischen Bootstrapping-Vorgangs mit der Lallphase ist also unter mehreren Aspekten schief.

Es kann offenbar nicht in plausibler Weise gezeigt werden, daß Bootstrapping-Vorgänge der in der generativen Spracherwerbstheorie vorgesehenen und für ihr Funktionieren notwendigen Art in einer neuronalen Struktur möglich sind. Die Last der Argumente, die ohnehin schon gegen die biologische Realität der generativistischen Vorstellungen sprechen, wird damit weiter erhöht. Selbstverständlich treten die Probleme nicht in demselben Ausmaß auf, wenn man die mentale Sprachverarbeitung als einen symbolverarbeitenden Prozeß sieht. Das entspricht aber sicherlich nicht mehr dem Stand der Diskussion in den Kognitionswissenschaften.

Wenn Bootstrapping nicht möglich ist, muß der Aufbau der syntaktischen Kompetenz im Spracherwerb für die Sprach*perzeption* vollständig induktiv erfolgen. Wenn korrekt ist, daß, wie in Kapitel 3 behauptet, die Sprach*produktion* sich erst unterhalb der Phonemebene „verselbständigt“ und oberhalb der Phonemebene strikt parallel zur Perzeption konstruiert zu denken ist, kann man verallgemeinern: Die syntaktische Kompetenz *insgesamt* muß vollständig induktiv gelernt werden. Zu beachten ist allerdings, daß damit universelle, angeborene Eigenschaften nicht unmöglich werden, solche Eigenschaften kristallisieren sich nur nicht, wie in der generativen Sprachtheorie, zu inhaltlichen Informationsmengen aus. Details dazu werden im Schlußkapitel noch angesprochen.

5.2 Die Zielstruktur des Erwerbsprozesses

Die Zielstruktur des Erwerbsprozesses muß die Prozesse des Verstehens und der Produktion von Rede ermöglichen. Ohne ausreichend präzise Vorstellungen über diese Prozesse ist eine Modellierung des Spracherwerbs sinnlos. Man kann sich nicht einfach damit begnügen, Regeln zusammenzustellen, die sprachliche Ausdrücke beschreiben, denn das wäre nur unter der Bedingung eine sinnvolle Teilstrategie, daß es möglich ist, Verarbeitungsprozesse bzw. die dahinter stehenden Apparaturen von den Datenstrukturen zu trennen, die sie steuern. Im Gehirn sind aber Daten und Verarbeitungsstrukturen identisch, wie in den vorangegangenen Kapiteln als selbstverständlich vorausgesetzt wurde. Die folgenden Überlegungen dienen dazu, Eigenschaften der Zielstruktur des Erwerbsprozesses in diesem Sinne zu ermitteln, es spielen deshalb Eigenschaften möglicher sprachlicher Verarbeitungsprozesse im syntaktischen Bereich eine zentrale Rolle.

Wir gehen zunächst von der vereinfachenden Annahme aus, daß das Ergebnis eines Verstehensprozesses im syntaktischen Bereich die Aktivierung einer hierarchischen syntaktischen Struktur ist, wie sie durch einen beliebigen Strukturbaum dargestellt werden kann. Der Strukturbaum soll allerdings so geordnet sein, daß an seinem unteren Ende die lexikalischen Elemente in einer Reihenfolge erscheinen, die der zeitlichen Reihenfolge des lautlichen Inputs entspricht (Abbildung 5.2–1).

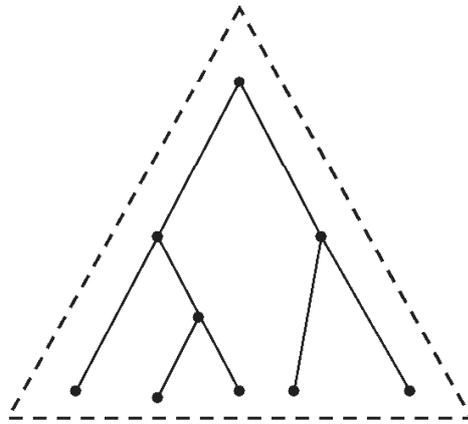


Abbildung 5.2–1: Schema eines Strukturbaums als Ergebnis eines Verstehensprozesses. Die Beschriftung der Knoten des Baums ist bewußt weggelassen, um ihn möglichst wenig auf eine bestimmte linguistische Theorie festzulegen.

In den folgenden Abbildungen wird für einen solchen Strukturbaum der Einfachheit halber die übliche Abkürzung durch ein Dreieck verwendet, wie in Abbildung 5.2–1 gestrichelt angedeutet.

Die computerlinguistische Tradition (vgl. z. B. Allen, 1995) unterscheidet verschiedene Parsingstrategien, insbesondere in Anwendung auf Phrasenstrukturgrammatiken, je nachdem in welcher Reihenfolge ein zu analysierender Satz abgearbeitet wird und in welcher Richtung der syntaktische Strukturbaum aufgebaut wird. Es ist prinzipiell möglich, Sätze vom Satzende her aufzuschließen, eine solche Strategie wird aber kaum als biologisch realistisch akzeptiert werden können, also sind für uns nur Strategien interessant, die prinzipiell mit dem Satzanfang beginnen. Unter diesen Strategien können wieder solche rasch abgelehnt werden, die mit dem Aufbau von Analysetiefe wenn immer möglich warten, bis das gesamte zu analysierende Material zur Verfügung steht (Abbildung 5.2–2). Zur Begründung kann darauf verwiesen werden, daß zwar die tatsächliche Bedeutung eines Satzes erst bei Erreichen des Satzendes feststeht, daß ein Kommunikationspartner aber schon auf dem Weg dahin Reaktionen zeigt, die das Verständnis von Teilen voraussetzen.

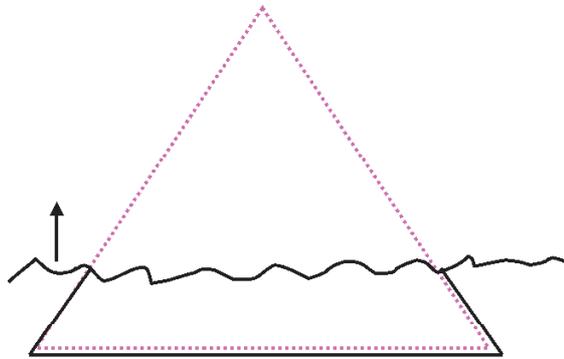


Abbildung 5.2-2: Syntaktische Analyse mit Aufbau des Strukturbaums von unten nach oben, Breite zuerst

Es ist deshalb anzunehmen, daß mindestens eine durch das jeweils schon wahrgenommene sprachliche Material gestützte Tiefe möglichst frühzeitig aufgebaut wird (Abbildung 5.2-3). Das führt ggf. zu fehlerhaften, später zu revidierenden Analysen, soweit nicht alternative Analysepfade parallel verfolgt werden können.

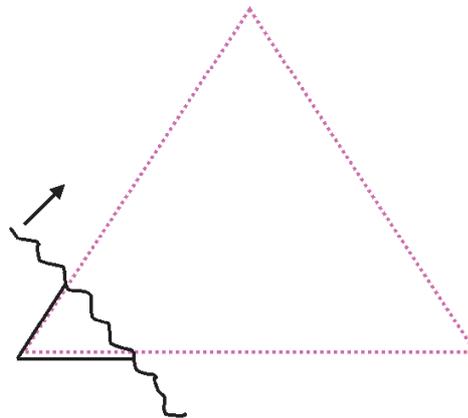


Abbildung 5.2-3: Syntaktische Analyse mit Aufbau des Strukturbaums von unten nach oben und von links nach rechts, Tiefe zuerst

Die in Abbildung 5.2-3 schematisch dargestellte Analysestrategie setzt genau genommen voraus, daß bei einem Satzanfang wie „Der ...“ die

Analyse tatsächlich mit der Feststellung von z. B. „Determiner“ zunächst anhält und beim Fehlen einer Fortsetzung hierbei stehenbleibt. Das entspricht aber nicht den Beobachtungen, die jeder Linguist akzeptieren wird: Wir realisieren beim Satzverstehen sofort, daß es sich bei dem Gehörten um eine Nominalphrase handelt, das heißt, daß bestimmte Fortsetzungen *erwartet* werden. Entscheidend ist das Stichwort *Erwartung*. Wir erwarten, wenn jemand zu einer Äußerung ansetzt, daß sie bzw. er mit einem möglichen Satzanfang beginnt und von dort aus mit möglichen Fortsetzungen weiterfährt. Die Schlußfolgerung aus solchen Feststellungen ist, daß die syntaktische Analyse offenbar erwartungsgesteuert verläuft. Das entspricht nicht mehr einer (reinen) Bottom-up-Strategie, sondern einer Analyseabfolge wie in Abbildung 5.2–4 angedeutet.

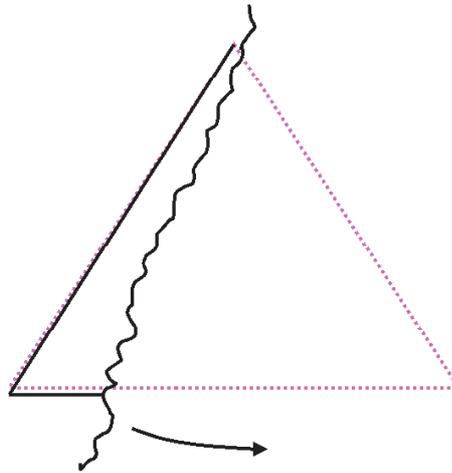


Abbildung 5.2–4: Syntaktische Analyse mit Aufbau des Strukturbaums von oben nach unten und von links nach rechts, Tiefe zuerst

Das heißt, es werden jeweils vom linken Rand der Analyse ausgehend Erwartungen gebildet, die auf das nächste im Input korrekterweise mögliche Element bezogen sind, wobei dieses „nächste Element“ jeweils auf allen Ebenen der Analysehierarchie bestimmt wird. Die Spitze des Strukturbaums ist der zuerst (vorläufig) festgelegte Strukturbestandteil. Das führt zu einer Art „Scheibenwischerbewegung“ der Analysefront. Die Analyse von oben nach unten und von links nach rechts ist also ein guter Kandidat für die Modellierung der natürlichen Parsingstrategie.

Eine computerlinguistische Analyse wird wahrscheinlich daran interessiert sein, am Ende des Analyseprozesses tatsächlich zur Repräsentation einer vollständigen syntaktischen Satzstruktur zu gelangen. Dieses Ziel ist offenbar kein Charakteristikum des natürlichen Sprachverarbeitungsvorgangs, denn es gibt zahlreiche Anhaltspunkte – vor allem bei längeren Sätzen –, die darauf hindeuten, daß zurückliegende Strukturbestandteile raschem Vergessen unterliegen. Man kann also die Frage stellen, wieviel der syntaktischen Struktur minimal jeweils verfügbar sein muß, um eine Analyse zu gewährleisten. Unter bestimmten Umständen, das heißt, wenn es gelingt, Revisionen bereits aufgebauter Strukturen entsprechend zu steuern, genügt die durch den laufenden Analyseprozeß gerade bestätigte Hierarchie von Bottom-up und Top-Down-Verbindungen zusammen mit den von ihr ausgehenden unmittelbaren Erwartungen, wie in Abbildung 5.2–5 veranschaulicht.

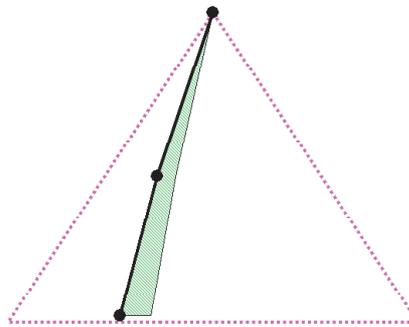


Abbildung 5.2–5: Minimale erforderliche Gedächtnisspur bei einer syntaktischen Analyse von oben nach unten und von links nach rechts, Tiefe zuerst

Die Analyse kann dann verstanden werden als passives Einfließen des Inputs in ein gerade aufgespanntes Erwartungsmuster. Damit wird das Erwartungsmuster zur verarbeitenden Struktur.

Diese Vorstellung bedeutet die Gleichsetzung von drei Dingen:

- Grammatik
- Verarbeitungsapparat (Parser)
- Ergebnisstruktur

Die Grammatik besteht notwendigerweise in einer Verarbeitungshierarchie zur Repräsentation aller möglicher Ergebnisstrukturen. Eine Ergebnisstruktur, solange sie syntaktisch bleibt, besteht in einer momentanen Aktivierung von Teilbereichen der grammatischen Struktur. Ein von Grammatik und Ergebnisstruktur verschiedener Parser kann nicht angenommen werden, da damit rasche symbolverarbeitende Mechanismen impliziert wären, die neuronal nicht möglich sind.

Dauerhafte Information, die durch die Satzanalyse gewonnen wird und hauptsächlich inhaltlicher Natur sein wird, muß durch Instanzenbildung fixiert werden, die außer lexikalischen Informationen auch syntaktische Komponenten bzw. Konsequenzen davon mit einschließen kann. Eine solche Instanzenbildung muß unmittelbar im Verlauf der syntaktischen Analyse erfolgen und nicht etwa erst im Anschluß an die syntaktische Auswertung. Produkte dieser Instanzenbildung können auch für Reparaturen herangezogen werden, wenn Garden-path-Phänomene auftreten, das heißt, wenn, wie oben angedeutet, weiter zurückliegende Entscheidungen in der syntaktischen Analyse revidiert werden müssen. Bei Satzbrüchen können zurückliegende Zustände aber auch über einen einfachen Top-down-Mechanismus innerhalb der Syntax selbst wieder aktiviert werden, wie in Kochendörfer (2000: Kapitel 5) gezeigt worden ist.

5.3 Syntaktische Längen

Das Andauern eines syntaktischen Elements (einer syntaktischen Konstituente) in der Perzeption muß dazu führen, daß eine entsprechende Großmuttereinheit eine andauernde Aktivität zeigt, das heißt einen entsprechend lange andauernden Impulszug abgibt. Das ist eine der Konsequenzen aus den im vorigen Abschnitt entwickelten strukturellen Grundprinzipien der syntaktischen Analyse und stimmt außerdem gut zu dem allgemeinen Prinzip des zentralen Nervensystems, daß Dauer durch wiederholtes Feuern dargestellt wird. Wenn wir annehmen, daß ein Satz aus einer Nominalphrase und einer Verbalphrase besteht (wobei auf die Art der Kategorisierung an dieser Stelle kein großer Wert gelegt wird) und ein Satz analysiert wird, dann ist die Konstituente „Satz“ für die gesamte Zeit des Inputs aktiviert, und die entsprechende Großmuttereinheit muß entsprechend regelmäßig Impulse abgeben; bei den Konstituenten „Nominalphrase“ und „Verbalphrase“ gilt das für entsprechende Teile der Input-Zeit usw. usw., wie in Abbildung 5.3-1 dargestellt.

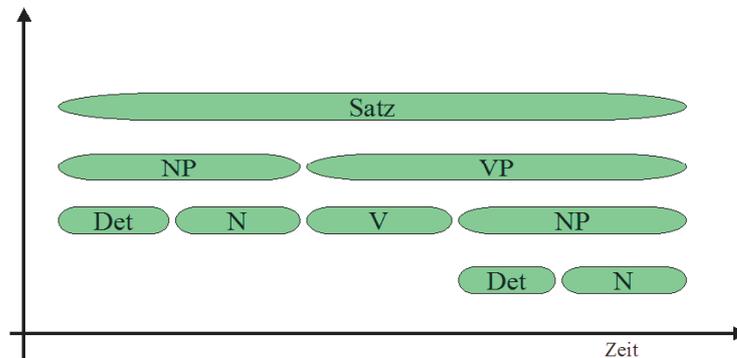


Abbildung 5.3–1: Zeitdauer syntaktischer Komponenten; entsprechende Großmuttereinheiten müssen für die angedeuteten Zeitdauern Impulszüge abgeben.

Die Aktivierung der Konstituenteneinheiten muß – in der Sprachperzeption – inputgetrieben erzeugt und aufrechterhalten werden, also letztlich auf dem Weg über die Lexikoneinheiten, die, in derselben Weise wie die syntaktischen Komponenten symbolisiert, das Schema der Abbildung 5.3–2 ergeben:

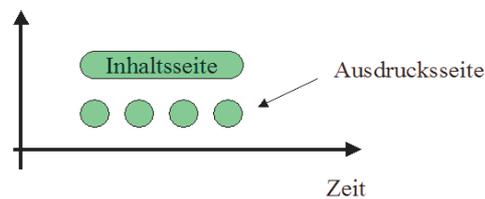


Abbildung 5.3–2: Zeitdauern für die Komponenten eines Lexikoneintrags. Die Dauer der ausdrucksseitigen Einheiten, also der Phoneme, ist elementar, das heißt, sie entspricht einem einzelnen Aktionspotential.

Also ist es letztlich der „Takt“ der Phoneme, der die syntaktische Analyse treibt, die hierarchieniedrigeren Komponenten müssen alle Impulse, die sie im Lauf ihrer Geltung empfangen, an die hierarchiehöheren Komponenten weitergeben. Auf diese Weise können auf jeder Ebene prinzipiell

beliebig lange Einheiten dadurch gewährleistet werden, daß, wie bei unbestimmten phonologischen Längen, eine Schleife auf eine entsprechende sequenzenbildende Zelle zurück zur Selbsterwartung eines Elements führt. Wenn wir sequenzenbildende Zellen für diese Funktion annehmen, ist analog zur Lexikonstruktur auch die gesamte Elementararchitektur aus sequenzenbildender, hemmender und instanzenbildender Zelle erforderlich. Schließlich werden ODER-Zellen zur Gewährleistung der Hierarchie vorausgesetzt.

Eine Besonderheit entsteht allerdings dadurch, daß eine syntaktische Einheit von entsprechender Länge nicht nur sich selbst erwarten soll, sondern auch die nachfolgende Konstituente. Bei phonologischen Längen wird zu einem beliebigen Zeitpunkt ab der ersten Wiederholung des Aktionspotentials auf der Vorgängereinheit der Nachfolger erwartet. Bei syntaktischen Einheiten ist eine derartige mechanische Festlegung nicht möglich, der Nachfolger einer Konstituente darf erst akzeptiert werden, wenn die Konstituente vollständig ist. Oder, anders ausgedrückt, der Übergang zum Nachfolger darf nicht schon während des Verlaufs der Konstituente, sondern erst am Ende der Konstituente zugelassen werden. Was Verlauf der Konstituente und was Konstituentenende ist, wird durch die hierarchieniedrigeren Strukturen und deren Analyse definiert.

Beispiele: Eine Konstituente darf regulär nicht mitten in einem Wort verlassen werden. Das bedeutet für die Sprachperzeption, daß nicht nach jedem Eingabelaut ein Wortanfang, verbunden mit dem Neustart des Lexikons, erwartet wird, was auch fatale Folgen für die Ableitung der lexikalischen Bedeutung hätte. Eine Präpositionalphrase kann nicht nach der Präposition enden, der Satz „Im werden Tomaten gepflanzt“ (anstelle von „Im Mai werden Tomaten gepflanzt“) ist ungrammatisch. Ein entsprechender Input muß zu einer Inkohärenzreaktion des Analyseprozesses führen. Ein Konstituentenende setzt also immer mindestens ein Wortende voraus (eine lexikalische Information), darüberhinaus sind weitere Strukturmerkmale der Konstituente (also Elemente auf niedrigerer Hierarchieebene) bestimmend.

Das ergibt notwendig eine Aufteilung der Konstituentenrepräsentation in eine Einheit, die sich selbst und das Konstituentenende erwartet, und eine Einheit, die das Konstituentenende repräsentiert und den Nachfolger erwartet (im folgenden als „Endelement“ bezeichnet). Diese Konstruktion, die in Abbildung 5.3-3 dargestellt ist, entspricht, trotz der unterschiedlichen Begründung, bis auf einige – allerdings wichtige – De-

tails der in Abschnitt 4.3 behandelten Architektur zur Darstellung von phonologischen Längen.

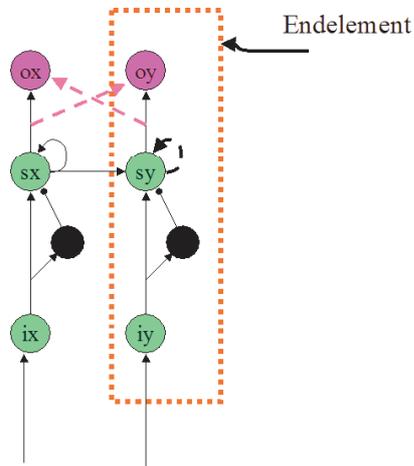


Abbildung 5.3–3: Architektur der Repräsentationseinheit für syntaktische Konstituenten; zu den gestrichelten Verbindungen vgl. den Text.

Abweichend von der Repräsentation phonologischer Längen ist die erste Wiederholungsschleife wesentlich, und die zweite Schleife muß abgebaut werden (in der Abbildung gestrichelt). Wichtig ist aber andererseits auch die Feststellung, daß die einem entsprechenden Lernvorgang zugrundeliegende Ausgangsstruktur in beiden Fällen, sowohl für lexikalische als auch für syntaktische Elemente, gleichartig sein darf. Die in Abbildung 5.3–3 gestrichelten Verbindungen, die auf die ODER-Zellen *ox* und *oy* führen, dürfen aus Gründen, die erst später deutlich werden, nicht aufgebaut werden.

Das Entstehen der Struktur von Abbildung 5.3–3 in der Simulation ist banal, es muß ja nur die Sequenzverbindung aufgebaut werden, die auf das Endelement führt. Sofern Konstituentenkörper und Konstituentenende nicht-überlappend aufeinander folgen, entsteht diese Verbindung nach dem Lernprinzip der Instanzenbildung in der für lexikalische Sequenzen gültigen Variante. Die störenden Verbindungen auf die ODER-Zellen werden unter dieser Bedingung nicht aufgebaut, da die erforderliche Synchronisation der Erregungen an diesen Zellen nicht gegeben ist.

Simulation:

ele.bat [sspwin.exe "syntaktische Laenge" ele.net ele.ein Z 60 V]

(Man beachte bei der Simulation, daß sich die Verbindungen auf die ODER-Zellen nicht verstärken, wohl aber die Sequenzverbindung.)

Die überschüssige Schleifenverbindung wird durch einen Vergessensprozeß abgebaut, da Endelemente per Definition Kürzen sind.

Die Struktur der Abbildung 5.3–3 enthält nur die für die Sprachperzeption erforderlichen Komponenten. Sie muß für die Sprachproduktion ggf. durch Komponenten analog zur lexikalischen Produktion (vgl. Abschnitt 4.6) ergänzt werden.

6 Einwortsätze und Zweiwortsätze

6.1 Das Wortartenproblem

Der Erwerb des Lexikons ist, wie oben in Kapitel 4 ausgeführt, prinzipiell so zu denken, daß die Perzeption der Produktion vorangeht, also Perzeptionsstrukturen zunächst unabhängig von der Produktion aufgebaut werden. Das ist natürlich nicht so zu verstehen, daß ein komplettes perzeptives Lexikon aufgebaut wird, das dann in einem Schritt durch Produktionsstrukturen ergänzt wird, sondern es sind beliebige Teilstrukturen durch die beschriebene Lernprozedur für die Produktion zu aktivieren.

Für den Erwerb der Syntax müssen analoge Verhältnisse angenommen werden, da auch eventuelle Produktionsstrukturen für die Syntax, wie die für das Lexikon, nicht durch einen Versuchs-Irrtums-Prozeß zustande kommen können, sondern durch Parallelisierung zu bereits aufgebauten Perzeptionsstrukturen. Das eigentliche und zunächst im Vordergrund stehende Problem des Syntaxerwerbs stellt damit der Aufbau von Perzeptionsstrukturen dar. Die folgende Argumentation ist deshalb zunächst ausschließlich den perzeptionsseitigen Lernprozessen gewidmet, und die entwickelten Modelle klammern der Einfachheit halber die Produktion aus.

Wenn man unter dieser Einschränkung die im vorigen Kapitel entwickelten Prinzipien der syntaktischen Verarbeitung in einem neuronalen Modell realisiert, ergeben sich Strukturen wie in dem Syntaxfragment der Abbildung 6.1–1 (übernommen aus Kochendörfer, 2000). Das Fragment ist natürlich insofern unbefriedigend, als es gerade eine einzige Nominalphrase zuläßt. Andererseits ist leicht zu sehen, daß das Modell z. B. im lexikalischen Bereich durch Einfügung von Alternativen, wie in Kapitel 4

gezeigt, erweitert werden kann, und auch im syntaktischen Bereich kann eine Ausweitung durch ein analoges Vorgehen erreicht werden.

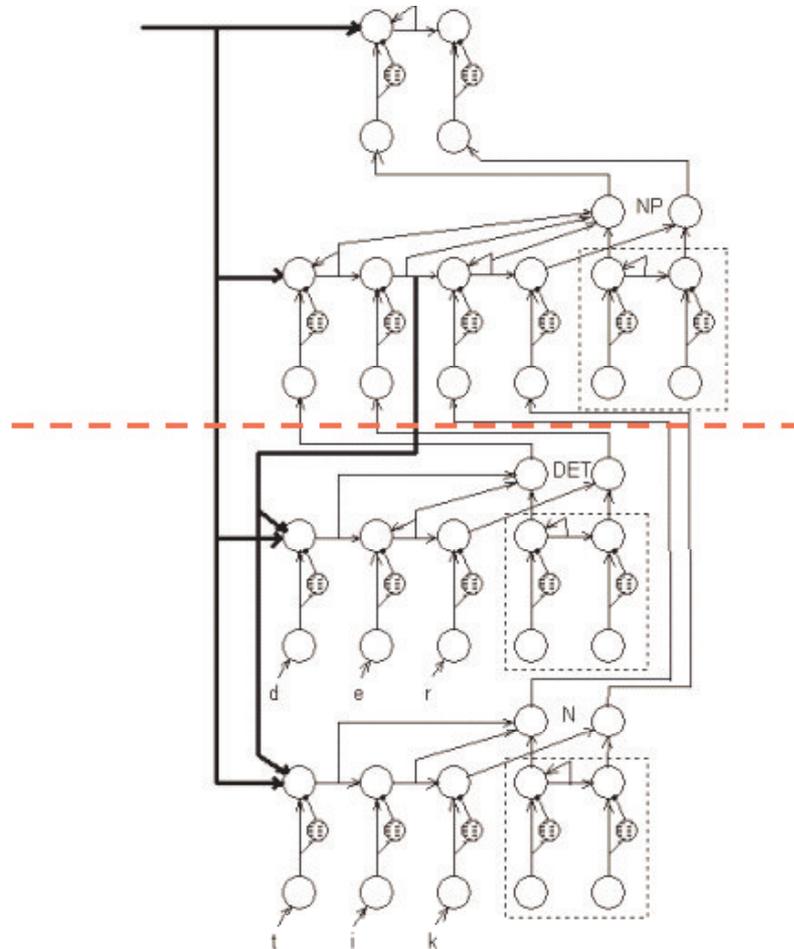


Abbildung 6.1-1: Syntaxfragment zur Analyse der Nominalphrase „der Tick“ (/dertik/). Die fett ausgezeichneten Verbindungen dienen der Erzeugung von Startpotentialen. Top-down-Strukturen sind weggelassen. Unterhalb der gestrichelten Linie befinden sich die lexikalischen, oberhalb die im engeren Sinne syntaktischen Strukturkomponenten. Die gestrichelt umrahmten Strukturen werden im Text (Abschnitt 6.3) erläutert.

Simulation:

dertik.bat [sspwin.exe Syntax dertik.net dertik.ein Z 50 v]

(Bei einer Bildschirmgröße von 800*600 Pixeln können die untersten beiden Zellreihen nicht mehr dargestellt werden.)

In einer syntaktischen Hierarchie wird das Signal auf dem Weg zur Hierarchiespitze immer informationsärmer. Das Ziel des Signalverlaufs ist die als Watchdog bezeichnete Überwachungsstruktur, die bei Inkohärenz eine Top-down-Korrektur auslösen kann. Die Verbindung mit einer solchen Überwachungsstruktur ist für alle neuronalen Verarbeitungsprozesse unverzichtbar. Es werden also nicht Daten von der Sinnesperipherie nach Verarbeitung (Identifikation) in ein Zentrum transportiert. Wie im vorigen Kapitel schon kurz angesprochen, müssen Analyseergebnisse im Verlauf des Verarbeitungsprozesses durch Instanzenbildung festgehalten werden.

Der lexikalische Ausgangspunkt der syntaktischen Verarbeitung im engeren Sinn braucht unter dieser Voraussetzung nicht in den voll ausgebauten Wortbedeutungen zu bestehen. Das wäre auch unter dem Aspekt sinnlos, daß ja Instanzen des lexikalischen Verarbeitungsprodukts für die Syntax direkt Sequenzelemente der nächsthöheren syntaktischen Kategorien sein sollen. In dem Modell der Abbildung 6.1-1 stehen an den strukturellen Positionen, die für die lexikalischen Bedeutungen zuständig wären, konsequenterweise Knoten, die mit den Wortartenbezeichnungen *Det* und *N* etikettiert sind. Wenn man an einer solchen Lösung festhalten möchte, ist das nur möglich, wenn *außerdem* in einer parallelen Struktur auch noch die eigentlichen Wortbedeutungen repräsentiert werden. Der damit skizzierte Zusammenhang zwischen Wortbedeutungen und Wortartinformation ist nicht sofort und unproblematisch in eine apparative Struktur zu übersetzen und soll im folgenden etwas ausführlicher analysiert werden. (Um die Darstellung zu vereinfachen, wird durchgängig von Wörtern gesprochen, wenn lexikalische Einheiten gemeint sind. Eine Entscheidung zugunsten eines reinen Wortformenlexikons soll damit nicht ausgedrückt werden.)

Die Wortartinformation ist keine angeborene primitive periphere Kategorie – man muß jedenfalls damit rechnen, daß sie es nicht ist –, sondern eine Kategorie, die im Lauf des Spracherwerbs aus elementareren Komponenten gebildet wird. Verschiedene Wortartkategorien entstehen sukzessive mit der Fortentwicklung des Spracherwerbs. Der dazu erforder-

derliche Input kann nur „inhaltlicher“ Art sein. Für eine distributionelle Definition fehlen gerade in den Anfängen des Spracherwerbs die erforderlichen neuronal repräsentierten Kontexte.

Also wird man die Wortartinformation am ehesten in eine Verbindung mit den Wortbedeutungen bringen. Die von der Verbindungsstruktur und auch von den erforderlichen Lernvorgängen her einfachste Lösung wäre es, wenn die Wortart einfach als definierende Komponente der Wortbedeutung (z. B. als primitive Bedeutung in einem frühen, noch wenig komplexen Stadium des Bedeutungserwerbs) aufgefaßt werden könnte. Die Wortartinformation könnte so problemlos in viele Instanzen von Wortbedeutungen eingebaut werden (Abbildung 6.1–2).

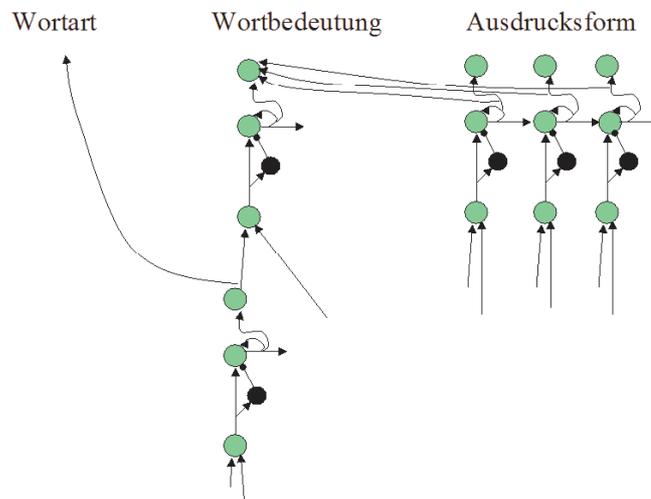


Abbildung 6.1–2: Verhältnis von Wortart und Wortbedeutung, erste Variante

Diese Konstruktion verbietet sich aber deshalb, weil die Wortartinformation auf diese Weise während des Perzeptionsvorgangs von der Ausdrucksseite des Wortes her nicht erreicht und nicht aktiviert würde, also auch nicht in die weiterführende syntaktische Analyse einbezogen werden könnte.

Wenn die Wortartinformation in der Analyse aktiviert werden soll, unter der Annahme, daß sie ein Bestandteil des Wortbedeutungskomplexes

ist, muß sie in eine Verarbeitungsbahn einbezogen werden, die von der Ausdrucksform zur Syntax führt, wie in Abbildung 6.1–3 schematisch dargestellt.

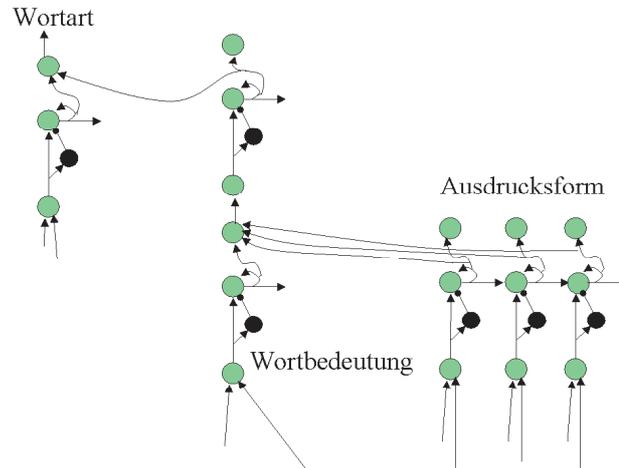


Abbildung 6.1–3: Verhältnis von Wortart und Wortbedeutung, zweite Variante

Man beachte, daß die auf das Wortartkonzept führende Verbindung eine ODER-Verbindung sein muß, denn das Wortartkonzept soll ja von verschiedenen Wortbedeutungen aus benutzt werden. Voraussetzung für den Aufbau dieser ODER-Verbindung ist eine entsprechende zeitliche Synchronisation, das heißt, der zur Wortartrepräsentation gehörende ODER-Knoten muß einige Millisekunden vor dem Eintreffen des Aktionspotentials von der Wortbedeutung her gefeuert haben. Letztlich handelt es sich um einen Prozeß der Hierarchiebildung wie in Abschnitt 4.5 ausführlicher behandelt. Die Synchronisation kann dadurch erreicht werden, daß die Wortartinformation eine Komponente der Wortbedeutung ist, wie in dem Modell der Abbildung 6.1–2, aber gleichzeitig als informationsärmeres Konzept hierarchisch eingebunden wird. Zwei Möglichkeiten der Realisierung zeigt Abbildung 6.1–4, eine Entscheidung für eine der Möglichkeiten ist nicht unbedingt erforderlich, letztlich können die mit 1 bzw. 2 etikettierten fett gestrichelten Verbindungen auch beide entstehen, ohne daß sich eine Störung der Funktion ergibt.

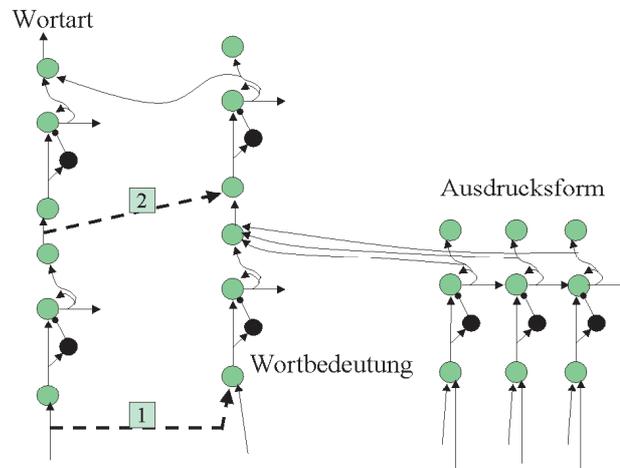


Abbildung 6.1-4: Synchronisation von Wortart und Wortbedeutung, Erläuterungen im Text

Man könnte auch die Wortartinformation einfach wie die Wortbedeutung mit den lexikalischen Ausdrucksseiten verknüpft denken, wie in Abbildung 6.1-5 dargestellt.

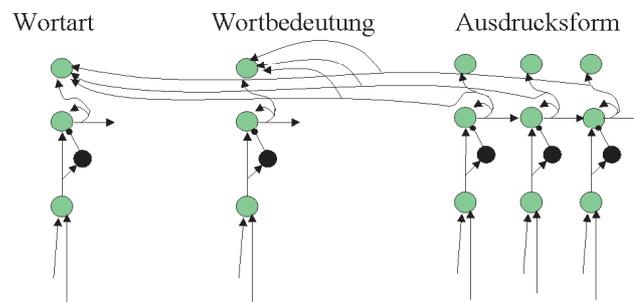


Abbildung 6.1-5: Verhältnis von Wortart und Wortbedeutung, dritte Variante

Diese Struktur ist nur dann eine gute Möglichkeit, wenn Wortartknoten jeweils für wenige lexikalische Ausdrucksseiten gelten, da sonst die Zahl

der erforderlichen ODER-Verbindungen, für die ja potentielle Verbindungen vorgegeben sein müssen, zu groß würde. Diese einzelnen Wortartknoten müssen dann, soweit sie die gleiche Wortart repräsentieren, zu einer Einheit ODER-verknüpft werden. Das ist durch einen Vorgang der Hierarchiebildung möglich. Da es sich hierbei um den Zusammenschluß von gleichbedeutenden Elementen handelt, wird das Gesamtgebilde als Cluster bezeichnet. Ein Cluster sieht prinzipiell so aus, wie in Abbildung 6.1–6 dargestellt. Technische Details sind oben in Abschnitt 4.5 besprochen.

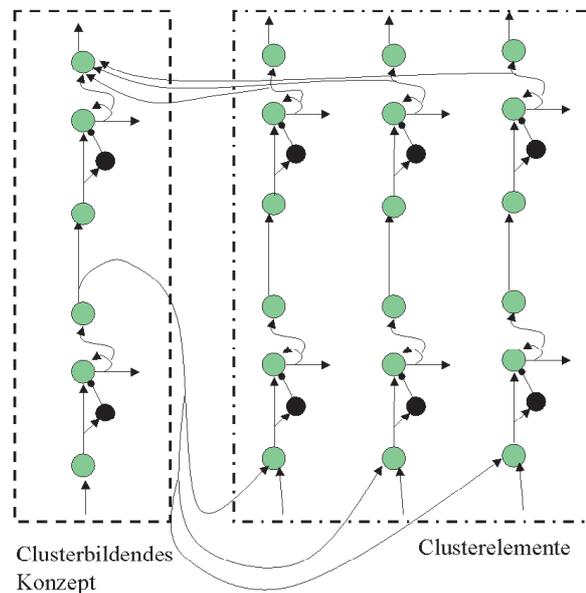


Abbildung 6.1–6: Wortartcluster

Simulation:

clust.bat [sspwin.exe Clusterbildung clust.net clust.ein V]

Die erforderlichen clusterbildenden Verbindungen werden in drei Lernschritten aufgebaut, anschließend folgt ein Funktionstest mit einem einzelnen Clusterelement.

Wahrscheinlich ist eine Clusterbildung auch erforderlich, wenn man die Wortartinformation nach der Variante der Abbildung 6.1–4 bildet.

Wortartkonzepte müssen aus semantischen Primitiven (genauer Wahrnehmungsprimitiven) aufgebaut werden. Gute Kandidaten für schon nicht mehr ganz elementare Zwischenstufen sind die „semantic classes“ bei O’Grady (1999): „individuable thing“, „event“ und „property“.

6.2 Vom Wort zum Satz

Wenn prinzipiell im kindlichen Lernprozeß die Perzeption der Produktion vorangeht, so muß zu einem bestimmten Zeitpunkt des Spracherwerbs die Perzeptionssyntax auf Einwortsätze beschränkt sein. Das bedeutet allerdings nicht, daß die Perzeptionssyntax während der gesamten Phase der Produktion von Einwortsätzen in dieser Weise beschränkt ist, denn der Übergang von der Perzeption zur Produktion könnte ja zusätzliche Lernvorgänge voraussetzen, so daß Einwort-Produktion und Zweiwort-Perzeption auch zeitweise nebeneinander möglich wären. Wenn die Perzeptionssyntax induktiv aufgrund des sprachlichen Inputs entsteht und man aufgrund der tatsächlich beobachteten kindlichen Äußerungen nicht annehmen möchte, daß die Auswahl des Verstandenen aus den komplexen Äußerungen der Umgebungssprache zufällig ist, muß man davon ausgehen, daß die verstandenen Einwort-Ausschnitte dort – am ehesten prosodisch – hervorgehoben sind.

Unter der Voraussetzung, daß die Syntaxentwicklung kontinuierlich ist und damit die vorangehend entwickelte Struktur jeweils sinnvoller Teil der in der Folge entstehenden Struktur ist, müssen auch Einwortsätze als syntaktische Längen im Sinne des Abschnitts 5.3 betrachtet werden. Auch ein Einwortsatz ist ungrammatisch, wenn er vor Erreichen des Endes abgebrochen wird.

Der Aufbau der zweiteiligen, aus der Repräsentation des Konstituentenkörpers und des Konstituentenendes bestehenden Längenelemente muß auf prosodischen Informationen beruhen, da anders das Ende nicht gleichzeitig mit der Perzeption des entsprechenden phonologischen Segments – wie es für die Gewährleistung der Lernprozesse erforderlich ist – wahrgenommen werden kann. Daraus folgt, daß sich syntaktische Konzepte aus einer Verknüpfung von Bedeutungskomponenten, nämlich der Wortartinformation einerseits und prosodischen Informationen andererseits, ergeben (zur Diskussion über mögliche Funktionen der Prosodie bzw. phonologischer Cues beim Syntaxerwerb vgl. die Beiträge in Morgan & Demuth, 1996 eds.).

Da bei Zweiwortsätzen die beiden Bestandteile unter *einem* Intonationsbogen stehen, kann die Intonation allerdings nicht dauerhaft (über alle Stadien der Entwicklung hinweg) das Konstituenten-Ende markieren. Die Ende-Information bei der ersten Konstituente eines Zweiwortsatzes ist nach dem Lernprozeß lexikalisch bedingt. Es muß also eine lexikalisch (durch das Ende der lexikalischen Ausdrucksseite) zu aktivierende Verbindung zu dem entsprechenden syntaktischen Endelement geben. Diese Verbindung kann nur über die Wortbedeutung bzw. eine ihrer Komponenten gehen, wenn wir die Wortartinformation über die Wortbedeutung ableiten, wie es der zweiten der im vorigen Abschnitt entwickelten Alternativen entspricht.

Das Zusammenspiel von lexikalischen Strukturen und Syntax in der Phase der Einwortsätze setzt dann eine lexikalische Architektur voraus, wie in Abbildung 6.2-1 dargestellt.

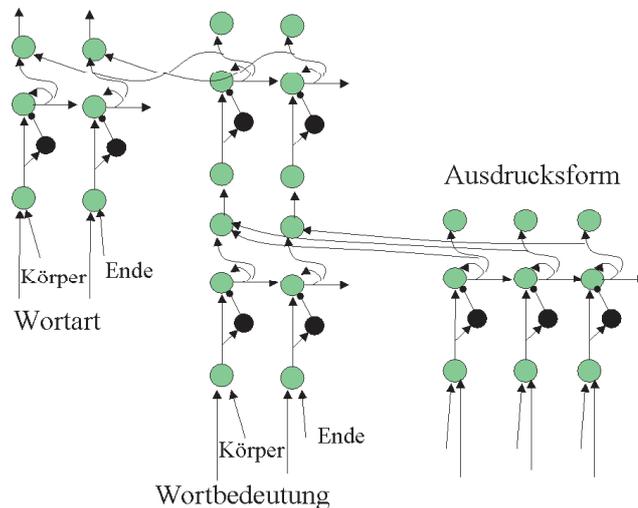


Abbildung 6.2-1: Lexikon und Syntax in der Einwortphase, erster Versuch

Wenn wir die in den Kapiteln 2 und 4 entwickelten Vorstellungen zum Aufbau von Lexikoneinträgen heranziehen, wird sofort deutlich, daß wir mit dieser Konstruktion in eine Sackgasse geraten sind. Die Grundidee des Lexikonerwerbs war ja, daß inhaltliche Konzepte unabhängig von und vor den sprachlichen Ausdrucksseiten erworben werden (können).

Hier werden aber Wortbedeutungen aufgespalten in Repräsentationen, die von vornherein mit ausdrucksseitigen Faktoren (Prosodie) verknüpft sind. Das hat auch Konsequenzen für die aufgrund der Bedeutungsrepräsentation zu bildenden Instanzen, die den Inhalt eines Ausdrucks als Ergebnis des Kommunikationsvorgangs fixieren.

Die Schlußfolgerung kann nur sein, daß wir die Repräsentation der Wortartinformation nach der dritten im vorigen Abschnitt dargestellten Möglichkeit (Abbildung 6.1-5) konstruieren müssen, was dann konsequenterweise zwingend zur Annahme eines Clusterbildungsprozesses führt. Diese Lösung zeigt Abbildung 6.2-2.

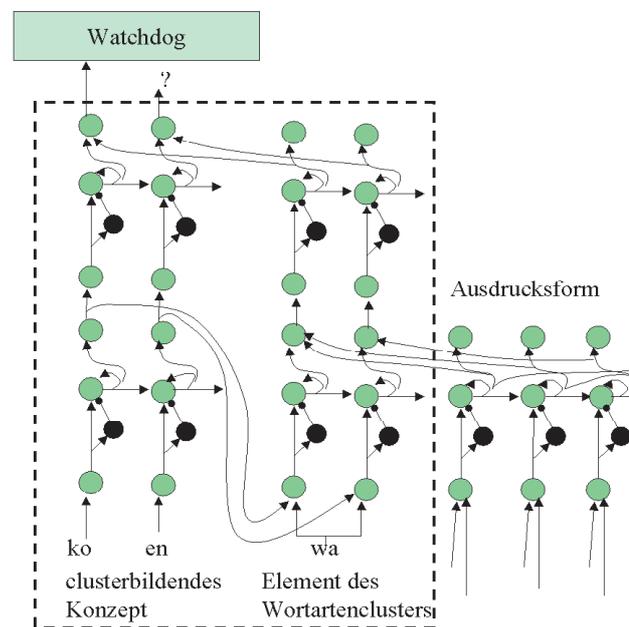


Abbildung 6.2-2: Lexikon und Syntax in der Einwortphase, zweiter Versuch; wa = Wortartinformation, ko = Wortkörper, en = Wortende. Der Rahmen dient dem Vergleich mit der folgenden Abbildung 6.3-1.

In der Simulation kann man den Aufbau der wesentlichen ODER-Verbindungen und Sequenzverbindungen beobachten. Instanzenbildende Verbindungen und Sequenzverbindungen in der Ausdrucksform sind vorgegeben. Die Repräsentation der Bedeutung ist weggelassen.

Simulation:

wortart.bat [sspwin.exe Wortarten wortart.net wortart.ein Z 50 V]

Die Eingänge *ko* bzw. *en*, die zusammen das clusterbildende Konzept repräsentieren, und *wa*, eine spezifizierende Wortartinformation, werden gleichzeitig erregt (notwendigerweise innerhalb eines Zeitfensters von wenigen Millisekunden). Alle Impulse sind, um den Lernprozeß zu ermöglichen, ausreichend synchronisiert (vgl. oben bei den lexikalischen Lernprozessen). Auf den Lernprozeß (Simulation bis Stop) folgt ein Test, bei dem beobachtet werden kann, daß nicht nur die obersten ODER-Zellen des Clusterelements, sondern auch des clusterbildenden Elements feuern.

Man beachte, daß die spezifizierende Wortartinformation, solange unterschiedliche Wortarten nicht vorhanden sind, nicht unbedingt erforderlich ist. Der Verlauf des Erwerbs von Einwortäußerungen kann deshalb so beschrieben werden, daß zuerst ein unspezifiziertes prosodisches Schema erworben wird, das mit der Watchdog-Komponente durch eine angeborene Verbindung verknüpft ist. Das prosodische Schema bildet ein Cluster aus, an das Ausdrucksformen angeschlossen werden können. Im Lauf der Entwicklung können auch spezifizierte, das heißt nach Wortarten (durch eine Wortarteninformation) differenzierte Clusterelemente auftreten.

6.3 Vom Einwortsatz zum Zweiwortsatz

Man kann sich überlegen, wieviele Einwortsätze nach der im vorigen Abschnitt versuchten Konstruktion überhaupt möglich sind. Die Zahl ergibt sich als Produkt der Zahl der Clusterelemente, die man einem einzelnen Cluster (redundant!) zugestehen möchte, und der Zahl der lexikalischen Ausdrucksseiten, die auf ein Clusterelement führen können. In jedem Fall sind die Ressourcen beschränkt, nur eine bestimmte Anzahl von Elementen ist möglich. Wenn man von den tatsächlich beobachtbaren Leistungen der Kinder ausgeht, sind es vielleicht 30 bis 50 Wörter, die in der Einwortphase beherrscht werden.

Eine Ressourcenerweiterung ist dadurch möglich, daß durch Wortartenspezifizierung Clusterelemente eigene Hierarchien bilden. Das ist allerdings nicht so zu denken, daß vorhandene nicht-spezifizierte Clusterelemente dazu verwendet werden. Das verbietet der Mechanismus der Instanzenbildung. Clusterelemente müssen ggf. von vornherein spezifiziert sein. Rein rechnerisch kann das bedeuten, daß durch Hinzufügen

einer einzigen weiteren Hierarchieebene z. B. 40×40 , also 1600 Wörter möglich werden. Dieser Vorgang kann als Grundlage des sog. „vocabulary spurt“ gesehen werden (Überblick über verschiedene Erklärungen dazu bei Kauschke, 2000; kritisch Bloom, 2000: 39 ff.). Die Wortartenspezifizierung erfolgt nach dem Erwerb der zur Spezifizierung erforderlichen Konzepte, ist also eine Folge des allgemeinen Ausbaus des Konzeptsystems.

Diese Erweiterung der Architektur von Abbildung 6.2–2 ist in Abbildung 6.3–1 in etwas abstrakterer Form dargestellt.

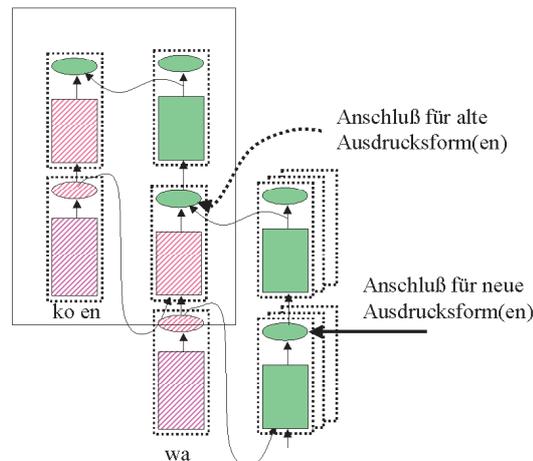


Abbildung 6.3–1: Lexikon und Syntax in der Einwortphase nach dem Entstehen neuer, spezifizierter Wortartencluster. Die Geltung der Symbole ergibt sich aus dem Vergleich des eingerahmten Teils mit Abbildung 6.2–2. Schraffierte Komponenten haben nur im Spracherwerb eine Funktion und werden, wie weiter unten näher erläutert wird, später abgebaut.

Wie die Abbildung zeigt, werden früher erworbene Wortformen an anderer Stelle in die Wortartenhierarchie eingebunden, als die später erworbenen. Es ist anzunehmen, daß diese alten Verbindungen, wie auch überhaupt die Bedeutungen der ersten Wörter, im Laufe der Zeit revidiert werden, und zwar – gerade für Wörter der Einwortphase – doch wohl nicht nur im Sinne einer sukzessiven Spezifizierung. Dabei können die Ausdrucksseiten prinzipiell bestehen bleiben (obwohl sie sich, wie in Abschnitt 4.7 behandelt, natürlich häufig ebenfalls ändern).

Der Ausbau des Wortartensystems hat nicht nur Konsequenzen für die Zahl der möglichen Einwortäußerungen, sondern es ist jetzt auch möglich, daß Wörter, die verschiedenen Wortartkategorien angehören, in zeitlicher Aufeinanderfolge wahrgenommen werden. Das bedeutet, daß sich Sequenzverbindungen zwischen Wortartkategorien aufbauen können. Die Wörter selbst sind zum größten Teil zu wenig häufig, als daß sich ein entsprechender Lerneffekt einstellen würde. Die Abbildung 6.3-2 veranschaulicht diesen Sequenzbildungsvorgang.

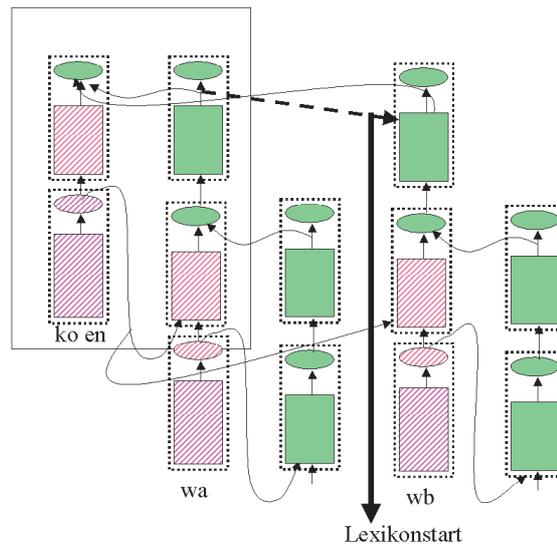


Abbildung 6.3-2: Bildung von Sequenzen von Wortartkategorien; weitere Erläuterungen im Text

Der Übergang von Einwortsätzen zu Zweiwortsätzen setzt eine Sequenzbildung der beschriebenen Art voraus, es ist aber nicht so, daß einfach zwei Einwortsätze zusammengedrückt würden, um einen Zweiwortsatz zu bilden. Der Übergang von Einwort- zu Zweiwortsätzen in der Produktion wird erst dann als vollzogen betrachtet, wenn die Bestandteile unter einem Intonationsbogen erscheinen. In der Perzeption, die die Basis des Syntaxerwerbs ist, müssen wahrgenommene Elemente, die unter *einem* Intonationsbogen stehen, den Lernprozessen zugrunde liegen. Das bedeutet, daß das Endelement des ersten Wortes nicht mit fallender Intonation erscheint. Sofern dieses Element schon Bestandteil eines

Der Abbau der alten Wortarten setzt apparativ gesehen voraus, daß eine weitere (langsame) Verstärkung häufig gebrauchter Synapsen und/oder prototypische Organisation bei den neuen Wortartinstanzen möglich ist (die ja ursprünglich durch Verknüpfung mit den alten entstanden sind), obwohl sie „zugeordnet“ sind. (Prototypische Organisation bedeutet Instanzenbildung durch mindestens drei Merkmale, von denen dann zwei zur Aktivierung der Instanz ausreichen. Auf diese Weise könnte die Komponente, die die alte Wortarteninstanz darstellt, überflüssig sein oder werden.)

Der Übergang zur Zweiwortphase besteht damit aus drei logisch aufeinanderfolgenden Schritten:

- der Bildung neuer Wortarten und dem damit verbundenen „vocabulary spurt“,
- der Bildung von Sequenzen von Wortartelementen und
- dem Abbau ermöglichender Strukturen.

Die vorangegangenen Überlegungen haben sich zunächst ausschließlich auf die Sprachperzeption bezogen. Für das Verständnis bzw. die Konstruktion von Produktionsmechanismen auf der Basis der Perzeptionsstrukturen gibt es einige interessante Anhaltspunkte:

- Top-down-Strukturen entstehen oberhalb der Wortartenebene (nicht tiefer) „automatisch“ nach dem Prinzip der Doppelwelle, an deren Zustandekommen die Aktivierung der Wortform beteiligt ist (siehe die Simulation).
- Es ist nicht sinnvoll, prädiktive Verbindungen von der Syntax aus in das Lexikon hinein vorzusehen, Reparaturen sollten möglichst inhaltlich spezifisch sein, nicht nur rein formal. Es wäre bestenfalls möglich, eine UND-Verknüpfung von syntaktischen und inhaltlichen Komponenten vorzusehen. Es ist schwierig, eine apparative Grundlage dafür durch Lernvorgänge aufzubauen.
- Top-down-Strukturen können im lexikalischen Bereich nach dem in Abschnitt 4.6 beschriebenen Mechanismus entstehen.

Simulation:

praedsys.bat [sspwin.exe top-down praedsys.net praedsys.ein Z 50 V]

(Keine der in diesem Modell vorgesehenen prädiktiven Verbindungen wird verstärkt, da die dafür erforderliche Doppelwelle erst ab *owb* und *Owb* aufwärts entsteht, also die untersten prädiktiven Zellen, die in das Top-down-System einbezogen werden könnten, die Zellen *pWB* und *PWB* wären.)

Diese Beobachtungen können sehr weitreichende Folgerungen für das Verständnis der Syntax nach sich ziehen. Da offenbar getrennte Top-down-Systeme denkbar sind, ist es möglich, auch den Produktionstakt auf den nicht-syntaktischen Bereich zu beschränken. Das bedeutet: Man sollte erwägen, ob es eine rein syntaktische Produktion überhaupt geben muß. Die Produktion von Äußerungen muß auf jeden Fall über die Top-down-Aktivierung des inhaltlichen Konzepts laufen. Die Rolle der Syntax in der Sprachproduktion könnte dagegen auf die Kohärenzkontrolle beschränkt werden, die eine korrekte Produktion über das Rückmeldesystem und die Watchdog-Aktivität (also rein bottom-up arbeitend) steuern würde, schematisch in Abbildung 6.3–4 dargestellt.

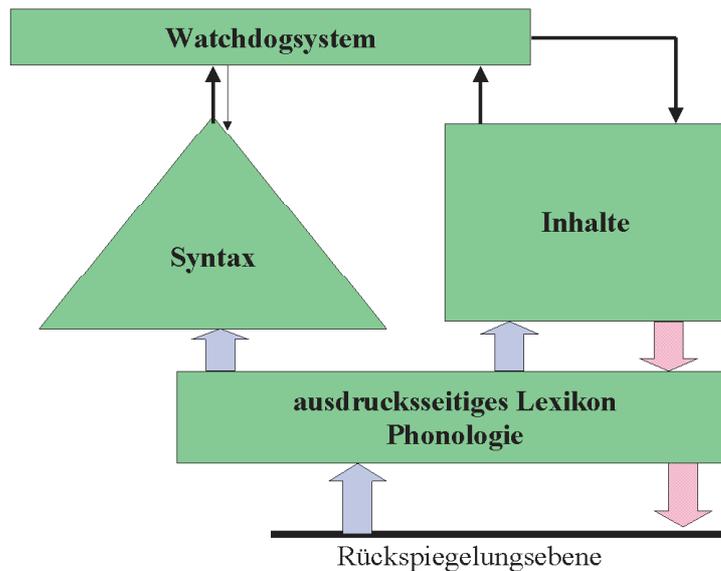


Abbildung 6.3–4: Produktion ohne Produktionsarchitektur in der Syntax

Das Syntaxmodell aus Kochendörfer (2000) ist dann eine Vereinfachung, insofern, als das prädiktive System für die lexikalisch-semantische und die syntaktische Ebene nicht getrennt erscheint.

Da ein ausführlicheres Modell der Sprachproduktion bisher nicht entworfen worden ist, bleiben diese Bemerkungen vorläufig.

6.4 Nominalphrase und Verbalphrase, Erweiterung der Verbalphrase

Der Schritt über die Zweiwortphase hinaus muß auf jeden Fall zu Strukturen führen, die stärker an den Einzelsprachen orientiert sind. Prinzipiell kann die Entstehung von komplexeren Kategorien, die Sequenzen elementarerer Bestandteile sind, nach demselben Prinzip erfolgen wie der Aufbau der Zweiwortsequenz. Das bedeutet, daß der Antrieb für einen Ausbau der Syntax von der Weiterentwicklung der Wortartenkonzepte abhängt, aber auch von dem Verfügbarwerden von ausdrucksseitigen Elementen wie Artikeln und Flexionsformen, die bisher (z. B. weil unbetont oder zu selten in der Umgebungssprache auftretend) nicht verankert waren. Die Nominalphrase im Deutschen und in verwandten Sprachen kann auf diese Weise als Erweiterung eines der vorhandenen Einwortelemente verstanden werden.

Die Entwicklung der Verbalphrase, oder vielleicht vorsichtiger: die Weiterentwicklung der Syntax in dem entsprechenden Bereich, ist von der Weiterentwicklung der Differenzierung des verbalen Wortartenkonzepts abhängig. Diese Differenzierung führt in Sprachen wie dem Deutschen nicht nur zur Kategorie Verb, sondern weiter zu Unterkategorien, die syntaktisch mit unterschiedlicher Valenz (bzw. Theta- und Kasusrollen) versehen sind, also innerhalb der Syntax mit unterschiedlichen Komplementsequenzen verknüpft werden. In diese Sequenzen können, wieder nach einer entsprechenden Differenzierung, spezifizierte Instanzen von Nominalphrasenstrukturen eingebaut werden.

Die von den lernbaren neuronalen Strukturen her wahrscheinlich unvermeidbare Auflösung der Kategorie Verb ist bemerkenswert. Erscheinungen wie Kongruenz und Valenz müssen bezüglich ihrer apparativen Realisierung neu diskutiert werden. Das Prinzip der größtmöglichen Generalisierung kann, wie schon öfter betont, nicht mehr unkritisch als

Leitprinzip der Syntax akzeptiert werden. Abhängigkeiten in der Abfolge verschiedener Elemente können im Spracherwerb – bei entsprechend häufigem Vorkommen – durch entsprechend viele neuronale Sequenzen repräsentiert werden, auch dann, wenn es grundsätzlich möglich wäre, zu einer Vereinfachung zu kommen. Selbst eine gleiche Sequenz kann ja mehrfach repräsentiert sein.

7 Morphologische Segmentierung und Funktion der Morphologie, das Silbenproblem

7.1 Morpheme und Silben als (sub-)lexikalische Einheiten

In diesem Kapitel werden einige Thesen wieder aufgenommen und auf den Spacherwerb zugespißt, die zuerst in Kochendörfer (1999b) publiziert worden sind. Es geht um die Frage, ob, vorsichtig formuliert, auf dem Weg von der Wortbedeutung zur Artikulation oder umgekehrt von der auditiven Wahrnehmung zur Wortbedeutung eine Verarbeitungsebene anzunehmen ist, die dem Silbenkonzept und/oder – bei Wörtern wie *Maler* unter Annahme einer morphologischen Zerlegung in /ma:l/+/er/ – dem Morphemkonzept entspricht.

Sowohl die Strukturierung in Silben als auch die in Morpheme setzen spezifische Lernprozesse voraus. Es geht in beiden Fällen nicht nur darum, daß bereits vorhandene universelle Bausteine identifiziert und in einen sequentiellen Zusammenhang gebracht werden müssen. Die Annahme eines universellen Silbeninventars verbietet sich, da ja schon das Phoneminventar, wie oben in Kapitel 3 gezeigt, einzelsprachlich und Produkt von konstruktiven Lernprozessen ist. Die Morpheme sind unbestritten Gegenstände von Lernprozessen. Ein Unterschied zu den Silben besteht darin, daß Morpheme separat lexikalisiert gedacht werden, das heißt, sie sind separat mit Inhaltsseiten verknüpft, während Silben als Bestandteile lexikalischer Ausdruckseiten, also als rein ausdrucksseiti-

ge Elemente gelten. Von den Lernprozessen her gesehen setzen sowohl Silben als auch Morpheme (beide soweit sie nicht allein ein Wort ausmachen) eine Segmentierung von Ausdrucksseiten in kleinere Bestandteile voraus.

Der Vorgang der morphologischen Segmentierung wird im Zuge des Spracherwerbs (in einer Auswahl betroffener Sprachen) erst greifbar mit dem Erscheinen der Flexionsmorphologie, in Spuren während der Zweiwortphase, aber sichtlich gekoppelt an die Weiterentwicklung der Syntax im Anschluß daran. Dagegen muß eine Zerlegung in Silben, sofern man überhaupt damit rechnen will, schon von allem Anfang an zu den Grundlagen des Spracherwerbsprozesses gehören.

Wenn man davon ausgeht, daß Morpheme die lexikalischen Elemente sind, aus denen Wörter wie *Maler* zusammengesetzt sind, ergibt sich für die Verarbeitungsprozesse das Problem, daß die Segmentierung in Silben auf andere Segmentgrenzen, nämlich /ma:/ + /ler/ führt. Im Sprachproduktionsprozeß sind dann Regeln für eine entsprechende Umsetzung erforderlich. Die meisten Produktionsmodelle mit lokalistischen neuronalen Architekturen (auch Schade, 1992 und 1999) nehmen allerdings an, daß Lexikoneinträge von vornherein als Silbensequenzen gespeichert sind, das Wort *Maler* würde also nicht in Morpheme zerlegt. Roelofs (1997) spricht im letzteren Fall von „speicherbasierten“ Modellen („memory based models“), im Gegensatz zu „regelbasierten“ Modellen („rule based models“), zu denen sein eigenes Modell WEAVER gehört.

Unter dem Gesichtspunkt, daß der Segmentierungsprozeß eine apparative Basis haben muß, und für die Bewertung möglicher Lernprozesse sind nun zunächst besonders solche Modelle interessant, in denen die Zielstruktur eine speicherbasierte Realisierung von Silbensequenzen darstellt, nach dem Muster von Abbildung 7.1–1. Für regelbasierte Modelle entstehen grundsätzliche Probleme mit Lernvorgängen, so daß es nicht sinnvoll wäre, sie in unserem Zusammenhang in den Vordergrund zu stellen.

Da im folgenden hauptsächlich Überlegungen zur Sprachperzeption eine Rolle spielen werden, bezieht sich die Darstellung nicht wie bei den meisten in der Literatur diskutierten Modellen auf die Sprachproduktion, sondern es sind der Einfachheit halber nur Verbindungen in Perzeptionsrichtung vorhanden. Die Kreise entsprechen nicht einzelnen biologischen Neuronen, sondern stehen für Zellverbände, womit eine bessere Vergleich-

barkeit mit den Darstellungen in der Literatur gewährleistet wird. Eine Besonderheit ist auch, daß von vornherein Sequenzverbindungen einbezogen werden, das heißt auch, daß die Verarbeitung von Sequenzen anders gesehen wird, als sonst in lokalistischen (Produktions-)Modellen üblich.

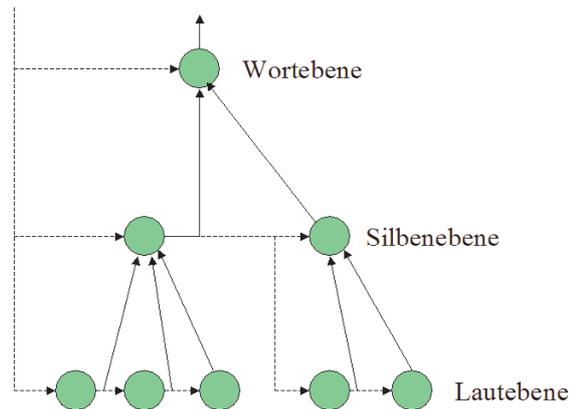


Abbildung 7.1–1: Schema einer Lexikonstruktur mit Silbenebene (Perzeptionsrichtung). Gestrichelte Verbindungen dienen der Gewährleistung von Sequenzen.

Frauenfelder & Floccia (1999) zeigen am Beispiel von psycholinguistischen Experimenten des Fragmententdeckungs-Paradigmas, daß „Silben-effekte“ sprachspezifisch auftreten, also z. B. für Sprecher des Französischen deutlich, für das Englische aber fragwürdig sind. Es ist unklar, wodurch eine solche Differenz bewirkt werden könnte. Jedenfalls wird durch diese Beobachtung die These von einer angeborenen Disposition, die zur Herausbildung einer Silbenebene im Spracherwerb führt, eher geschwächt. Psycholinguistische Experimente, vor allem solche, die auf dem Hintergrund nicht ausreichend detailliert ausgearbeiteter Modelle durchgeführt werden, sind allerdings immer anfällig gegenüber unkontrollierten Störvariablen. Wir wollen deshalb auf diese Argumentation kein besonderes Gewicht legen (Argumente, die für die Annahme von Silben sprechen, finden sich z. B. bei Blevins, 1995).

7.2 Lernprobleme

Statt dessen soll hier überlegt werden, wie eine neuronal etwas genauer ausgeführte Architektur mit den für die Verarbeitung von Silben erforderlichen Lernprozessen zurechtkommen würde. Dabei geht es vor allem um die Teilstrukturen, die einer einzelnen Silbe entsprechen. Wenn man dafür Architekturprinzipien zugrunde legt, wie sie in den vorausgegangenen Kapiteln entwickelt worden sind, ergibt sich die Präzisierung von Abbildung 7.2–1.

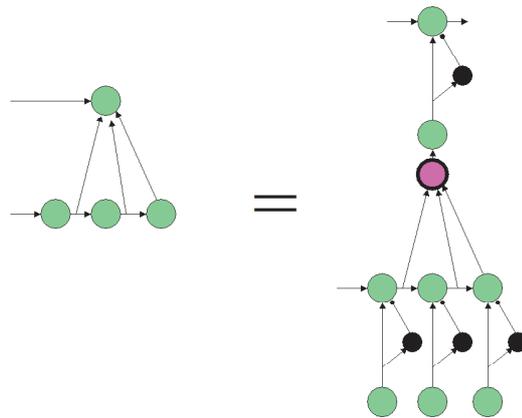


Abbildung 7.2–1: Präzisierung der Struktur einer Silbe

Die zum Aufbau einer solchen Struktur erforderlichen Lernprozesse sind teilweise unproblematisch. Es ist die Bildung von Phoneminstanzen erforderlich, und es ist prinzipiell auch kein Problem, sich das Entstehen der Sequenzverbindungen zu denken, da sie ja nur die Wahrnehmung einer ausreichend engen zeitlichen Reihung von Phonemen voraussetzen. Anders ist es mit den Verbindungen, die auf die in der Abbildung fett umrandete ODER-Zelle führen. Diese ODER-Zelle ist die Großmutterzelle, die der Silbe entspricht. Sie hat strukturell eine ähnliche Position wie die Großmutterzellen für die Inhaltsseiten lexikalischer Einheiten, ein entscheidender Unterschied ist allerdings, daß sie nicht wie diese definiert werden kann über eine Beziehung zur Sinneswahrnehmung. Die feste Verbindung auf die ODER-Zelle, die durch den Lernmechanismus vorausgesetzt wird, kann nur von einer der Phoneminstanzen der Silbe

selbst ausgehen, genauer von der ersten Phoneminstantanz der Sequenz, da der Lernvorgang an eine entsprechende zeitliche Reihung gebunden ist. Der zeitliche Abstand der Aktionspotentiale, die von den sequenzenbildenden Zellen erzeugt werden, liegt aber zwischen ca. 50 und 100 Millisekunden. Wenn die Lernbereitschaft der ODER-Zelle pro überschwelliger Erregung so lange andauern soll, ist die Gefahr der Bildung von Endloschleifen, wie oben in Abschnitt 4.5 erläutert, kaum noch zu umgehen.

Ein anderes Problem, das noch schwerer wiegt, ist der Abschluß der Lautsequenz, die zur Silbe gehört. Der Lernprozeß wäre dann am einfachsten, wenn im Input nach dem letzten zur Silbe gehörigen Phonem eine Pause entstünde, wodurch die Lernbereitschaft der ODER-Zelle beendet würde. Mütter bringen ihren Kindern im frühen Erstspracherwerb aber nicht Silben in Isolation bei, bestenfalls kann man beobachten, daß das mit Wörtern in Isolation geschieht. Der spätere Schulunterricht ist eine andere Geschichte. Die laufende Rede enthält keine durch ausreichend einfache neuronale Prozesse auswertbaren Hinweise auf die Abgrenzung von Silben.

Silben müssen bis zur Demonstration des Gegenteils – jedenfalls im Rahmen speicherbasierter Modelle – als nicht-lernbar gelten. Nicht-lernbar heißt: nicht als eine Verarbeitungsebene integrierbar, die ein notwendiger Bestandteil von Verarbeitungsprozessen wäre. Voraussetzung für diese Schlußfolgerung ist, daß Silben als *Einheiten* definiert sind. Das Lernproblem verschwindet, wenn man auf die kritischen Verbindungen der phonologischen Elemente auf eine gemeinsame ODER-Zelle, also auf den Einheiten-Charakter verzichtet. Das dadurch entstehende Gebilde möge „Pseudosilbe“ heißen (Abbildung 7.2–2).

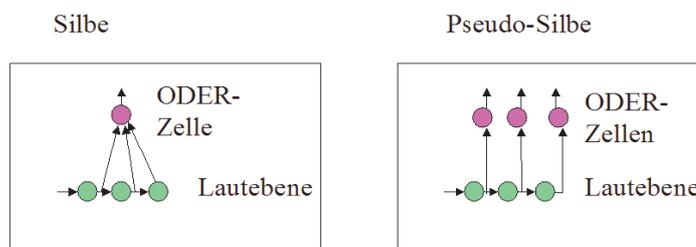


Abbildung 7.2–2: Silben und Pseudosilben

Pseudosilben können herangezogen werden, um Kontextabhängigkeiten, also regelhafte Distributionen im phonologischen Bereich, zu erklären. Ein klassisches Beispiel sind die Allophone [ç] und [x] im Deutschen. Die Abbildung 7.2–3 zeigt einen Netzausschnitt, der [ç] als unmarkierte Form in jedem Kontext zuläßt, [x] aber an vorausgegangenes [a], [e] oder [o], bzw. [a:], [e:] oder [o:] bindet.

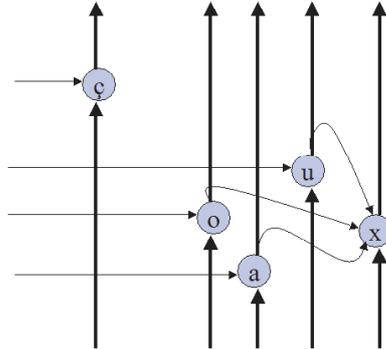


Abbildung 7.2–3: Die Allophone [x] und [ç] im Deutschen, schematisch (dünne Pfeile = Kontextfilter durch Sequenzverbindungen)

Einige Erklärungsleistungen des Silbenkonzepts können also weiterhin durch die Annahme entsprechender sublexikalischer Strukturen erbracht werden. Es soll hier auch nicht bestritten werden, daß man prinzipiell Techniken lernen kann, die eine wenigstens annähernd intersubjektiv nachvollziehbare Silbenzerlegung ermöglichen (z. B. im Orthographieunterricht), nur entsteht dadurch nicht eine Verarbeitungsschicht innerhalb der sprachlichen Kompetenz, die „automatisch“ an jedem Produktions- und Perzeptionsprozeß beteiligt wäre.

Die Konsequenzen für die Linguistik sind nicht banal. Der Spracherwerb allerdings kommt problemlos ohne Silben aus.

7.3 Morphologische Segmentierung

Da Morpheme, wie oben in Abschnitt 7.1 schon angedeutet, definitionsgemäß mit Inhaltsseiten versehen sind, entsteht das für die Silben entscheidende Lernproblem hier nicht in derselben Weise. Die ODER-Zellen, die Morpheme als Lautsequenzen zusammenfassen, werden inhaltlich definiert, und es gibt keine grundlegenden Probleme mit der zeitlichen Synchronisation der den Lernprozeß bewirkenden Aktionspotentiale. Die entsprechenden Lernprozesse sind oben in Abschnitt 4.4 bereits behandelt worden, allerdings dort ohne Berücksichtigung des Segmentierungsproblems. Das Segmentierungsproblem entsteht z. B. dann, wenn man annimmt, daß Wörter wenigstens teilweise aus mehreren Morphemen bestehen, die einzeln lexikalisiert sind. Es gilt bei Morphemgrenzen wie bei Silbengrenzen, daß es keinen Anhaltspunkt für ihre Position in der laufenden Rede gibt.

Man beachte in diesem Zusammenhang, daß das für den Lernvorgang erforderliche inhaltliche Konzept nicht einfach an der ausdrucksseitigen Morphemgrenze (das heißt abrupt innerhalb weniger Millisekunden) aufhört, aktiviert zu sein. Die Tatsache, daß, um ein einfaches Beispiel zu geben, in einer Menge von Objekten der visuellen Wahrnehmung mehrere und nicht nur eines enthalten ist, auf das ein bestimmtes Konzept paßt, führt zur parallelen Erregung dieses Konzepts und des Konzepts der Mehrzahl und nicht zu einer zeitlichen Abfolge dieser Konzepte.

Es handelt sich bei der morphologischen Segmentierung auch nicht einfach um eine Abgrenzung von Bereichen unterschiedlicher Bedeutung in einer lexikalischen Sequenz. Der Grundgedanke ist ja der, daß ein und dasselbe morphologische Element in mehreren Sequenzen verwendet wird und auch Grundlage von Neubildungen sein kann. Das heißt, die morphologischen Segmente müssen als eigenständige lexikalische Einheiten etabliert werden. Eigenständige lexikalische Einheiten sind Einheiten, die von der syntaktischen Ebene aus „gestartet“ werden können und auf diese Weise regelhaft komplexere Ausdrücke bilden (Abbildung 7.3–1). Daß es daneben auch lexikalisierte Morphemsequenzen geben könnte, also Lexikonelemente, die aus mehreren morphologischen Segmenten bestehen, wird dadurch nicht sofort ausgeschlossen. Details werden unten in Abschnitt 7.4 noch diskutiert.

Die Morphemgrenze impliziert also die Erwartung (den Start) einer eigenen lexikalischen Ausdruckssequenz. Das Startsignal kann prinzipiell

zwei syntaktische Ursachen haben: Es kann durch ein Sequenzende ausgelöst werden oder kann Folge einer Inkohärenz sein, die eine entsprechende Top-down-Aktivierung bewirkt.

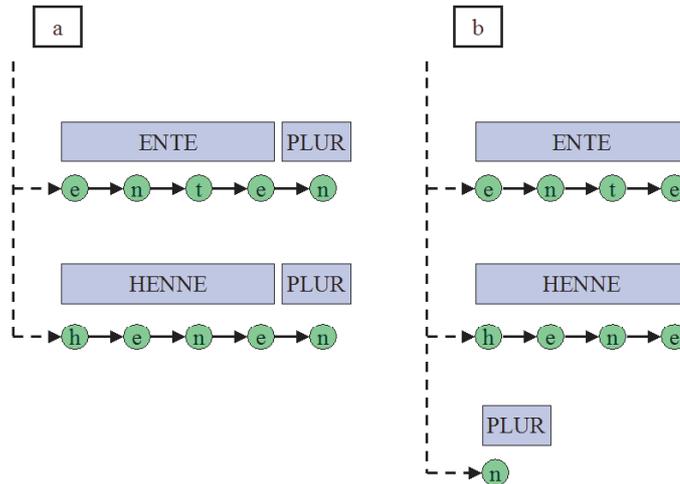


Abbildung 7.3–1: Morphologische Segmente sind nicht einfach Bestandteile lexikalischer Sequenzen (a), sondern eigenständige lexikalische Einheiten (b).

Bei der folgenden Simulation eines morphologischen Segmentierungsprozesses wird vorausgesetzt, daß die Zuordnung einer ausdrucksseitigen Sequenz zu einem Inhalt (durch die ODER-Zelle einer Konzepteinheit repräsentiert) nicht durch eine einzige Aktivierung einer entsprechenden Synapse hergestellt wird, sondern daß es sich um einen Prozeß handelt, der mehrere bis viele Wiederholungen braucht. Wenn wir einmal vereinfachend annehmen, daß gerade zwei Wiederholungen ausreichen und daß der Input in der Lernphase in der Abfolge der Sequenzen

/ente/
 /enten/
 /hene/
 /henen/

besteht – wobei synchron zu den Ausdrucksseiten jeweils die Konzepte ENTE und SINGULAR, ENTE und PLURAL, HENNE und SINGULAR, HENNE und PLURAL aktiviert zu denken sind –, dann sind /ente/ zusammen mit ENTE und /hene/ zusammen mit HENNE zweimal im Input, und entsprechende Verbindungen können aufgebaut werden, aber dasselbe gilt auch für /n/ zusammen mit PLURAL. Dagegen kommen /ente/ und /hene/ zusammen mit SINGULAR bzw. PLURAL nur je einmal vor, so daß die entsprechenden ODER-Verbindungen nicht ausreichend verstärkt werden können. Das heißt, die Sequenz /enten/ wird aufgeteilt in eine Teilkette /ente/ ENTE und eine Teilkette /n/ PLURAL und analog auch die Sequenz /henen/ in die entsprechenden Teilketten.

Die Simulationsarchitektur, die diesen beispielhaften Lernprozeß realisiert, entspricht der in Abschnitt 4.4, Abbildung 4.4–4 dargestellten (Abbildung 7.3–2).

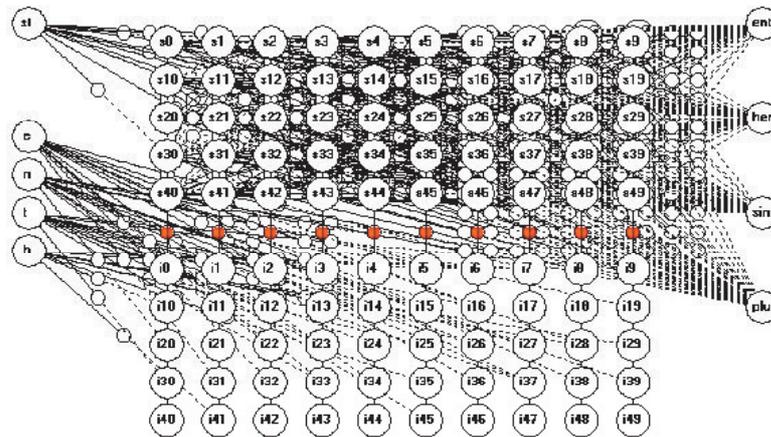


Abbildung 7.3–2: Simulationsarchitektur zum Lernen morphologischer Segmente

Links sind Eingabeinheiten für die im Beispiel verwendeten Phoneme und den Startkontext, rechts ODER-Zellen für die Inhalte ENTE, HENNE, SINGULAR und PLURAL dargestellt. Es wird vorausgesetzt, daß entsprechende „inhaltliche“ Konzeptlernprozesse bereits abgeschlossen sind, also auch die Numeruskonzepte erworben sind. Die 50 durchnummerierten potentiellen Ausdruckssegmente bzw. deren sequenzenbildende

Zellen (hemmende Zellen sind vorhanden, aber auf dem Simulationsbildschirm nicht sichtbar) sind vollständig mit potentiellen Verbindungen zu den ODER-Zellen ausgestattet, um den Lernprozeß in der vereinfachten Simulation zu erleichtern.

Der Lexikonstart, auch der vor dem Plural-Segment, wird im Input vorgegeben, wird also nicht eigentlich syntaktisch, wie oben angedeutet, erzeugt.

Wenn man das bisher eingesetzte Simulationsprogramm verwendet, ergibt sich ein unerwarteter und unerwünschter Effekt: Schon bei der ersten Eingabe der Kette /ente/ zusammen mit ENTE und SINGULAR werden die Konzeptknoten zum Feuern gebracht, und zwar durch die Segmente /e/, /n/ und das schließende /e/, nicht aber durch das /t/.

Simulation:

```
morpho.bat [sspwin.exe "Morphologische Segmentierung I" morpho.net
morpho1.ein V]
```

Ein Zustand, den man als Ergebnis einer morphologischen Segmentierung interpretieren könnte, entsteht nicht. Grund dafür ist die unterschiedliche Redundanz der Sequenzverbindungen, wie in der folgenden Tabelle zusammengestellt:

Phonem	In die Sequenz einbezogene Instanzen
/e/	16 34
/n/	6 13 19 23
/t/	30
/e/	11 14 15 32

Es ist offenbar so, daß die Redundanz grundsätzlich einen Einfluß auf den Aufbau von ODER-Verbindungen haben muß, wenn die Lernprinzipien in der bisherigen Form beibehalten werden. Die Redundanz ist aber in hohem Maße zufällig, und es ist fragwürdig, ob der Effekt tatsächlich akzeptiert werden kann, auch unabhängig von dem Problem der morphologischen Segmentierung. Man könnte auch darauf hinweisen, daß das Simulationsexperiment mit einem Netz durchgeführt wurde, das unrealistisch hohe Redundanzraten begünstigt; aber ein Rest an schwankender Redundanz ist immer zu erwarten und wirkt sich entsprechend störend aus.

Auf der anderen Seite ist es relativ einfach und biologisch nicht un-
plausibel, zu einer Lösung des Problems zu kommen. Es muß nur dafür
gesorgt werden, daß der Lerneffekt an ODER-Zellen sich auf die gleich-
zeitig (während des Lernfensters) aktivierten Synapsen *verteilt*. Dasselbe
Ergebnis, aber in der Simulation einfacher zu realisieren, wird dann er-
zielt, wenn der Lerneffekt sich nur auf *eine* der Synapsen auswirkt. Die-
se Variante ist in der Version sspwin-n.exe des Simulationsprogramms
gewählt.

Simulation:

morpho1.bat [sspwin-n.exe "Morphologische Segmentierung I" morpho.net
morpho1.ein V]

Klick auf „Simulation bis Stop“ führt über die Lernphase hinweg unmittelbar
vor die Eingabe der Testkette /henen/, die dann mit der Leertaste bewirkt
werden kann.

Die Segmentierung funktioniert jetzt wie erwartet: Auf die Eingabe von
/henen/ reagiert zunächst der Konzeptknoten HENNE und erst zusam-
men mit dem schließenden /n/ der Konzeptknoten PLURAL.

Natürlich hat die Programmänderung Rückwirkungen auf die Funktion
der ähnlichen Simulation in Abschnitt 4.4, die aber, wie die Simulation
zeigt, durch eine Anpassung der Lernrate ausgeglichen werden können.

Simulation:

inhaltsn.bat [sspwin-n.exe "Rueckwirkungen" inhaltsn.net inhalts.ein V]

Klick auf „Simulation bis Stop“ führt unmittelbar zur Testphase. Wie in Ab-
schnitt 4.4 sind nach jeder Eingabekette Stops eingerichtet.

7.4 Das morphologische Lexikon

Die Bezeichnung „morphologisches Lexikon“ wird hier für ein Lexikon
gebraucht, das aufgrund der oben beschriebenen morphologischen Lern-
prozesse zustande kommt. Wenn man die zur morphologischen Segmen-
tierung führende Simulation mit der Wiederholung der gleichen Lernse-
quenz fortsetzt, werden schließlich die Synapsen auf den ODER-Zellen so
weit verstärkt, daß die Konzepte SINGULAR und PLURAL auch durch
die phonologischen Segmente der Wortstämme überschwellig erregt wer-
den.

Simulation:

morpho2.bat [sspwin-n.exe "Morphologische Segmentierung II" morpho.net morpho2.ein V]

Wenn man nur an dem Ergebnis, nicht dem Verlauf der Simulation interessiert ist, kann wieder die Funktion „Simulation bis Stop“ verwendet werden. Anschließend erfolgt die Eingabe der Ausdrucksseite /henen/.

Die Numerusinformation wird dann also auch durch den Wortstamm getragen. Das bedeutet z. B. für die Verarbeitung des Singulars /hene/, daß sowohl SINGULAR als auch PLURAL über die gesamte Kette hinweg aktiviert bleiben und erst durch ein nachfolgendes phonologisches Segment oder eine Pause entschieden werden kann, daß ein Singular vorliegt. Das in der Simulation vorgesehene Beispiel des Plurals /henen/ zeigt ein entsprechendes Verhalten, allerdings mit der überraschenden Besonderheit, daß am Ende zwar allein PLURAL und nicht auch SINGULAR aktiviert und damit diese Mehrdeutigkeit aufgelöst ist, aber gleichzeitig eine neue Mehrdeutigkeit entsteht, indem nicht nur das eigentlich erwartete Konzept HENNE sondern auch ENTE feuert. Dieser Zustand ist in Abbildung 7.4-1 wiedergegeben.

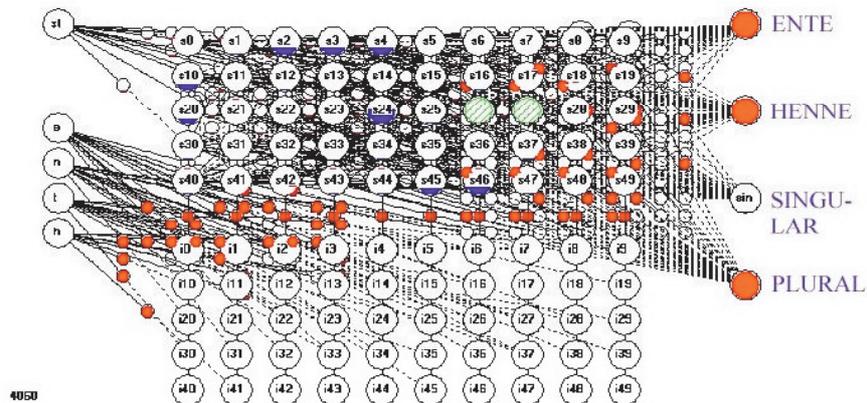


Abbildung 7.4-1: Mehrdeutigkeit des Pluralmorphems /n/

Der Grund für dieses Phänomen ist der, daß unter der Lernbedingung in dem speziell vereinfachten Fall unserer Simulation das Pluralmorphem

ausreichend häufig sowohl zusammen mit ENTE als auch zusammen mit HENNE im Input erscheint. Unter natürlicheren Bedingungen, das heißt bei einem größeren Wortschatz und entsprechend differenzierteren Häufigkeiten, kann dieser Effekt kaum auftreten. Wenn er auftritt, geschieht die Auflösung der Mehrdeutigkeit im Zuge der Weiterverarbeitung durch den Kontextfilter (Kochendörfer, 2000: 90 ff.).

Das Simulationsexperiment soll demonstrieren, daß es sinnvoll ist anzunehmen, daß die entstehenden Lexikonstrukturen, soweit sie das Problem der morphologischen Segmentierung betreffen, offenbar abhängig sind von der Frequenz der zu lernenden Ausdrücke in der Umgebungssprache. Dabei sind sowohl das Vergessen (allmählicher Abbau des Lerneffekts) als auch die Beschränktheit der Ressourcen und die daraus sich ergebende Konkurrenzsituation zwischen verschiedenen Lernvorgängen wichtige Einflußfaktoren.

Schon das Eindringen der Information, die durch die Flexionsmorphologie getragen wird, in den Wortstamm ist frequenzabhängig. Wörter mit Veränderung des Wortstamms – *Huhn* vs. *Hühner* – müssen verschiedene Stammsequenzen entwickeln. Deren inhaltliche Verankerung setzt höhere Frequenzen voraus als bei einheitlichem Stamm. Bei hochfrequenten Wörtern (und auch sonst vielleicht sporadisch) ist eine vollständige Lexikalisierung der Flexionsformen zu erwarten.

Die bisher beschriebenen und simulierten Prozesse liefern noch nicht eine Lexikonstruktur, bei der Lexikoneinträge aus lexikalisch verankerten Sequenzen von Morphemen bestehen würden. Es ist bisher angenommen worden, daß Morphemsequenzen unter Mitwirkung der Syntax entstehen und nicht sozusagen als Fertigprodukte im Lexikon vorgesehen sind. Wenn man beachtet, daß in Sprachen wie dem Deutschen z. B. zusammengesetzte Substantive spontan gebildet werden und dann bleibender Besitz des Sprechers oder von mehr oder weniger großen Sprechergruppen oder gar der Sprachgemeinschaft sein können, könnte man als naheliegend annehmen, daß die entsprechenden Ausdrücke nicht Lautsequenzen mit direkter Zuordnung einer Bedeutung darstellen, sondern tatsächlich innerhalb des Lexikons als Morphemsequenzen nach dem Schema der Abbildung 7.4-2 repräsentiert sind.

(Zellen, die zur Argumentation nichts beitragen, sind weggelassen. Die fett ausgezeichneten schleifenförmigen Verbindungen sind erforderlich, da es sich bei den Morphemen um Längen handelt.)

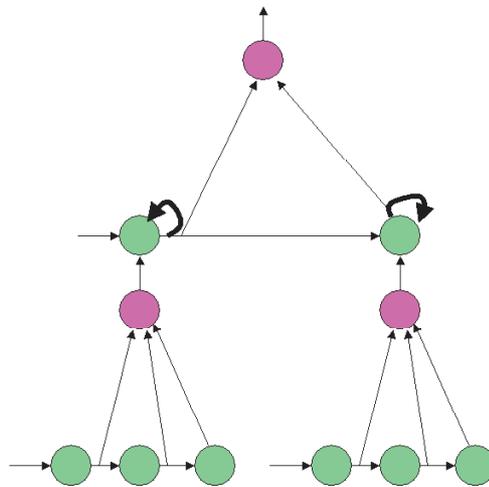


Abbildung 7.4–2: Schema einer Lexikonstruktur mit lexikalisierten morphologischen Sequenzen (Perzeptionsrichtung)

Man kann nun sehr leicht demonstrieren, daß die Konstruktion der Abbildung 7.4–2 in der Realität des Sprachgebrauchs nicht entsteht. Sie würde nämlich, um ein krasses Beispiel zu geben, zur Folge haben, daß die Lautkette /asa/ als APFELSAFT verstanden werden könnte, da ja eine einzige überschwellige Aktivierung des Konzepts APFEL durch /a/ die Erwartung des Konzepts SAFT auslösen würde und die Aktivierung von SAFT durch /sa/ für die Weiterverarbeitung ebenfalls ausreichend wäre. Sowohl im Produktions- als auch im Verstehensprozeß ist mindestens der Start für /saft/ explizit zu definieren.

Die Ausdrucksseiten der einzelnen Elemente einer lexikalisierten Morphemsequenz können aber nicht je für sich von der Syntax aus gestartet werden, denn für die Syntax soll eine lexikalisierte Morphemsequenz ja gerade eine Einheit darstellen. Also hätte man bestenfalls die Möglichkeit, sich eine Unterscheidung von Endelementen im Bereich der inhaltlichen Konzepte, die die Morphemsequenz bilden, vorzustellen. Das widerspricht aber den Überlegungen in Abschnitt 6.2, nach denen der Bereich inhaltlicher Konzepte frei sein sollte von formalen Bedingungen.

Die Konsequenz muß sein, daß morphologische Sequenzen über die Syntax realisiert werden – und es kann kein Zweifel sein, daß diese Möglich-

keit genutzt wird –, aber eben nicht lexikalisiert sein können. Lexikalisierung bedeutet dann immer den Aufbau einer auf phonologischer Ebene zusammenhängenden Ausdruckssequenz, die Ausdruckssequenzen einzelner „morphologischer“ Bestandteile können nicht separat bleiben.

Wenn lexikalisierte Morphemsequenzen unwahrscheinlich sind, ergeben sich zusammenfassend die folgenden Möglichkeiten für Lexikoneinträge, dargestellt am Beispiel der Singular-Plural-Unterscheidung im Deutschen („segmentiert“ meint hier: durch einen eigenen Lexikoneintrag repräsentiert):

- seltenere Wörter: Stamm unverändert, segmentiertes Pluralzeichen;
- häufigere Wörter: Stamm möglicherweise verändert, segmentiertes Pluralzeichen;
- häufige Wörter: Vollformen lexikalisiert.

7.5 Diskussion

Konnektionistische Simulationen des Erwerbs der Flexionsmorphologie haben das Ziel, die Lernbarkeit der Zuordnung von Stammformen zu flektierten Formen zu zeigen. Das heißt, es wird erwartet, daß das konnektionistische Netz nach dem Lernprozeß auf die Eingabe der Stammform, also einer vollständigen phonologischen Ausdrucksseite, mit der entsprechenden flektierten Form, ebenfalls einer vollständigen Ausdrucksseite, reagiert. Das gilt für den Klassiker Rumelhart & McClelland (1986a) ebenso wie die späteren Verbesserungsversuche, z. B. Plunkett & Marchman (1993), Plunkett (1995), Plunkett & Elman (1997). Wenn man diesen Vorgang als Teil eines sprachlichen Produktionsprozesses interpretiert, erhält man den in Abbildung 7.5–1 dargestellten Ablauf. Die mit „Task“ bezeichnete Bedeutungskomponente (vgl. Goebel & Indefrey, 2000) soll die Art der Zuordnung von Stammform und flektierter Form steuern, da ja wohl doch nicht angenommen werden kann, daß bei verschiedenen möglichen Zuordnungen (z. B. verschiedenen Zeitformen des Verbs) völlig verschiedene Netze existieren, und auch unter diesen Netzen müßte ja eine Auswahl getroffen werden.

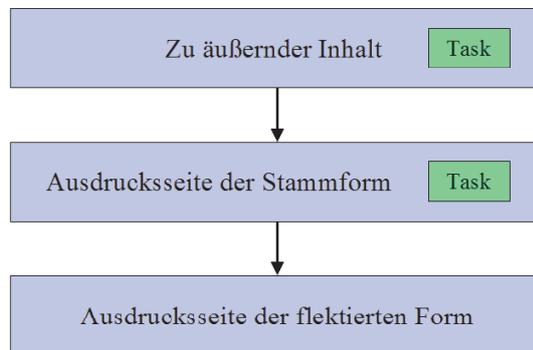


Abbildung 7.5–1: Schema zur Erzeugung flektierter Formen in einem verteilt-konnektionistischen Produktionsmodell; Erläuterungen im Text

Auch dann, wenn die Ausdruckssequenzen durch ein rekurrentes Netz Phonem für Phonem parallel produziert werden, sind es doch zwei phonologische Repräsentationen, die erzeugt werden, und die Form der zweiten wird (wenn man von der Task-Komponente absieht) durch die Form der ersten bestimmt.

Man beachte, daß dahinter die Voraussetzung steht, daß die Wortbedeutung keinen Einfluß z. B. auf die Form des Präteritums eines Verbs hat. Schon Pinker & Prince (1988) haben auf Gegenbeispiele im Englischen hingewiesen. Ein entsprechender Fall im Deutschen ist das Verb *wiegen*, das je nach Bedeutung im Präteritum *wog* oder *wiegte* lautet. Also muß mindestens zusätzlich zur Bestimmung durch die phonologische Gestalt der Stammform die Wortbedeutung eine steuernde Funktion haben.

Jetzt kann man umgekehrt natürlich fragen, ob die phonologische Gestalt der Stammform notwendigerweise repräsentiert werden muß, um bestimmte Flexionsformen zu erzeugen. Das ist nicht zwingend, denn wenn die Gestalt der Stammform über die zu äußernde Bedeutung bestimmt wird, ist es prinzipiell auch möglich, eine beliebige Flexionsform, ob mit der Stammform lautlich irgendwie korreliert oder nicht, ebenfalls direkt von der Bedeutungsrepräsentation bestimmt sein zu lassen – auch dann, wenn man eine phonologische Regelmäßigkeit feststellt, z. B. eine, die verhindert, daß Lautkombinationen entstehen, die in einer bestimmten Sprache unaussprechbar sind.

Man sollte in diesem Zusammenhang überlegen, ob es nicht möglich ist, daß im Laufe der Sprachgeschichte durch Linguisten beobachtbare Regelmäßigkeiten entwickelt werden, die zu keinem Zeitpunkt zu einer tatsächlichen Repräsentation von „Regeln“ oder äquivalenten Strukturen führen.

Die Idee einer doppelten Repräsentation von Ausdrucksseiten, wie in Abbildung 7.5–1 dargestellt, ist jedenfalls aus den Verarbeitungsbedingungen heraus kaum zu rechtfertigen, von den für den Spracherwerb zusätzlich erforderlichen Lernprozessen ganz zu schweigen. Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebene morphologische Segmentierung führt jedenfalls nicht zu entsprechenden Strukturen.

Andererseits werden die im Zusammenhang mit dem Modell von McClelland & Rumelhart diskutierte Verlaufsbeobachtungen für den Spracherwerb, nämlich daß unregelmäßige Formen zunächst perfekt gelernt werden, später Übergeneralisierungen regelmäßiger Formen auftreten, bis in einem dritten Stadium die Formen der Umgebungssprache (annähernd) perfekt realisiert werden, problemlos erklärt:

Wenn die zunächst gelernten Formen häufige Formen sind, sind sie als Ganzes lexikalisiert. Die morphologische Segmentierung setzt voraus, daß auch unbetonte Elemente wahrgenommen und ausreichend präzise analysiert werden und daß die entsprechenden als Lautsequenzen analysierten Ausdrücke mit ausreichender Häufigkeit auftreten, aber eben auch nicht so häufig, daß eine komplette Lexikalisierung erzielt würde. Übergeneralisierungen geschehen auf der Basis bereits erworbener morphologischer Segmente, und erst dann, wenn sie erworben worden sind. Es ist möglich, aber nicht notwendig, daß korrekte „unregelmäßige“ Formen aufgrund eines Vergessensprozesses vorübergehend nicht mehr verfügbar sind, es genügt, daß zusätzlich die Möglichkeit „regelmäßiger“ Bildungen besteht. Der schließliche Abbau der Übergeneralisierungen kann durch Vervollständigung des Lernprozesses bei den unregelmäßigen Formen und deren „Verstärkung“ durch Ausbau der Redundanz erfolgen (vgl. insgesamt Marcus, 2000).

8 Sprache und Denken

8.1 Sprache des Denkens

Um die Darstellung zu vereinfachen, gelten in diesem Kapitel die folgenden terminologischen Vereinbarungen:

- „natürliche Sprache“ wird für die Lautsprache (das Kommunikationsmittel) und deren interne Repräsentation verwendet, in Abgrenzung zu einer „Sprache des Denkens“, die nicht damit identisch sein muß. Natürliche Sprache schließt den Vorgang des Sprechens nicht ein.
- „Sprechen“ bezieht sich ausschließlich auf die aktuelle Verwendung natürlicher Sprache in Verstehens- oder Produktionsprozessen, Sprechen wird also nicht vollständig gleichbedeutend mit Saussures „parole“ oder Chomskys „performance“ verwendet, sondern beschränkt auf den prozeßhaften Aspekt.

Das Thema „Sprache und Denken“ wird im allgemeinen mit Whorfs „sprachlichem Relativitätsprinzip“ (Whorf, 1997, in englischer Sprache zuerst 1956) verbunden, das heißt – grob – mit der These, daß der Sprachbesitz einer Sprachgemeinschaft deren Realitätsinterpretation beeinflusst. Wenn man versucht, von der neuronalen Modellierung von Spracherwerbsvorgängen her diesen Komplex anzugehen, wird rasch deutlich, daß diese These bestimmte Aspekte hat, die behandelt werden müssen, ehe zu der ohne Zweifel den Spracherwerb betreffenden Kernfrage übergegangen werden kann.

Zu den vorab zu diskutierenden Themen gehört die Frage nach der Möglichkeit einer Sprache des Denkens. Diese Frage stellt sich vor al-

lem dann, wenn man bestimmte Vorstellungen über mentale Vorgänge als Datenverarbeitungsvorgänge teilt. In der Formulierung von Fodor (2000: 3 f.):

„The cognitive science that started fifty years or so ago more or less explicitly had as its defining project to examine a theory, largely owing to Turing, that cognitive mental processes are operations defined on syntactically structured mental representations that are much like sentences. The proposal was to use the hypothesis that mental representations are language-like to explain certain pervasive and characteristic properties of cognitive states and processes; [...]“

Es ist bei dieser Auffassung nicht prinzipiell unmöglich, die Sprache des Denkens, das heißt also die Grundlage für die syntaktische Strukturierung der mentalen Repräsentationen, mit der natürlichen Sprache gleichzusetzen, wie es wohl der Position von Wittgenstein entsprechen würde (vgl. Burri, 1997). Das ergibt aber ohne Zweifel eine zu enge Beschränkung für den Begriff des Denkens. Den umgekehrten Effekt erzielt man, wenn Denken mit mentalen Prozessen schlechthin identifiziert wird und also sozusagen von den Sinnesorganen bis zum Muskel reicht. Eine diskussionswürdige Problemstellung entsteht nur dann, wenn man mit einer Variante der Modularitätsthese rechnet, bei der die natürliche Sprache (neben anderen Bereichen) ein Modul bildet, das von einem Bereich der zentralen Verarbeitung, in dem dann definitionsgemäß Denken stattfindet, abgegrenzt ist.

Wenn man die Vorstellungen von Fodor (1983 und 2000) zugrunde legt, bedeutet die Abgrenzung von Modulen vor allem das Vorhandensein von Kommunikationsbeschränkungen (das Vorhandensein von definierten Schnittstellen) und eine aufgabenspezifische Ausstattung. Eine sinnvolle mentale Organisation kann sich aber wie Fodor feststellt, nicht ausschließlich aus aufgabenspezifischen Kompartimenten zusammensetzen, sondern es ist auch eine übergeordnete, globale Funktion erforderlich, für die dann das Stichwort Denken gebraucht werden kann und deren Basis eine Sprache des Denkens sein könnte.

Wenn im Gehirn eine Unterscheidung von Daten und Verarbeitungsarchitektur nicht stattfindet, müßten dann im Bereich des Denkens andere neuronale Strukturen gelten als im Bereich der Sprache. Ein gutes Argument dafür wäre der Nachweis, daß bestimmte Denkprozesse mit

der von uns in den vorangegangenen Kapiteln entwickelten neuronalen Architektur nicht realisierbar sind. Kandidaten dafür wären vielleicht die logische Folge, die aber doch wohl eine Sequenzbeziehung ist, oder der – wie man weiß aber insgesamt schwierige – Wahrheitsbegriff. Das Haupthindernis für den Erfolg einer solchen Argumentation ist, daß die für die Sprachverarbeitung erforderlichen Architekturkomponenten so elementar sind, daß nur wenig Spielraum für Alternativen bleibt. Die Struktur des Kortex ist sehr einheitlich.

Zweifel an der Existenz wesentlicher Architekturdifferenzen zwischen einem Bereich, der der natürlichen Sprache zuzuordnen ist und einem Bereich, in dem eine Sprache des Denkens gilt, ergeben sich aber in viel grundsätzlicherer Art aus dem allgemeinen Prinzip der Repräsentation von Konzepten. Die Großmutterzellentheorie setzt voraus, daß die mit einer Bedeutung versehenen neuronalen Einheiten über Verbindungen mit der Sinnesperipherie oder der Motorik definiert sind, wie oben in Abschnitt 2.3 herausgearbeitet. Das gilt auch für Konzepte, die zu einer möglichen Sprache des Denkens gehören. Würde man darauf verzichten, müßte man annehmen (wie Fodor, 2000, in seiner Kritik an konnektionistischen Modellen behauptet), daß die Position der Zelle in einem in sich abgeschlossenen Netzwerk allein die Definition leistet. (Wenn man in irgendeiner unbestimmt bleibenden Form mit einer wohldefinierten universellen, angeborenen Sprache des Denkens rechnen möchte, muß man sich dem Bootstrapping-Problem stellen, das, wie oben in Abschnitt 5.1 behauptet, unlösbar ist.)

Für sich allein genommen ist dieser Punkt allerdings nicht ausschlaggebend. Man beachte jetzt aber, daß es aufgrund des Definitionsproblems keine Semantik geben kann, die auf das Sprachmodul beschränkt ist, und daß es unsinnig ist anzunehmen, daß semantische Konzepte, die in dem Sprachmodul lokalisiert sind, beim Verstehensprozeß in Konzepte überführt werden, die dem Bereich des Denkens zuzuordnen wären. Hier herrscht auf breiter Front ein Ausmaß an Identität von Strukturen, das mit der Vorstellung von der Existenz einer Schnittstelle nicht vereinbar ist.

Man beachte: Nicht alle „inhaltlichen“ Konzepte sind in dem Sinne sprachliche Konzepte, daß ihnen sprachliche Ausdrucksseiten zugeordnet wären. Man kann, unter der Perspektive des Spracherwerbs, auch nicht behaupten, daß es keine vorsprachlichen „inhaltlichen“ Konzepte gäbe. Es gibt auch Konzepte (wenn man diesen Begriff in einem wei-

ten Sinn verwendet), die man speziell der natürlichen Sprache zuordnen kann, z. B. alle Konzepte, die mehr oder weniger direkt etwas mit der auditiven oder artikulatorischen Verarbeitung zu tun haben (Phoneme usw.). Aber wir stoßen überall auf gleitende Übergänge und nirgendwo auf einen grundsätzlichen Überschlag aus einer Repräsentationsform in eine andere.

Unter Berücksichtigung aller dieser Faktoren kann die Annahme einer Sprache des Denkens wohl kaum begründet werden, und eine strenge Modularitätsthese ist nicht aufrechtzuhalten.

8.2 Sprechen und Denken

Es geht in diesem Abschnitt um die Frage, inwieweit Sprechen eine Beziehung zum Denken hat, z. B. ungefähr so, daß man sprechen kann um (besser) zu denken. Wygotski (1993, zuerst erschienen in russischer Sprache 1934), in Auseinandersetzung mit frühen Arbeiten von Piaget, beobachtet, daß das nicht an einen Kommunikationspartner gerichtete Sprechen bei Kindern dann vermehrt auftritt, wenn Probleme zu lösen sind. Wygotskis Beispiel (Wygotski, 1993: 38):

„Ein Kind (5 Jahre 6 Monate) zeichnet z. B. in unseren Versuchen eine Straßenbahn. Als es mit dem Bleistift ein Rad zeichnet, drückt es zu stark auf. Die Bleistiftspitze bricht ab. [...] Das Kind sagt leise zu sich selbst: »Es ist kaputt«, und beginnt nun mit Tuschfarben einen beschädigten Wagen zu malen, der nach einem Unfall repariert wird, wobei es von Zeit zu Zeit mit sich selbst über das veränderte Sujet seiner Zeichnung weiterspricht.“

Offensichtlich hat hier das Sprechen also tatsächlich eine Funktion für die Bewältigung von Problemen. Bei Erwachsenen entspricht dem nicht an einen Kommunikationspartner gerichteten lauten Sprechen des Kindes das innere (lautlose) Sprechen.

Wenn inneres oder auch lautwerdendes Sprechen eine Funktion beim Problemlösen hat, ist es zwar verständlich, daß viele Sprecher, wenn man sie befragt, angeben, sie würden sprachlich denken, das heißt aber natürlich noch nicht, daß inneres Sprechen schlechthin identisch ist mit Denken oder daß diese Identität wenigstens für nicht-anschauliches Denken notwendig gilt. Die Behandlung des Problems in der psychologischen

Literatur zeigt, daß die Rolle, die dem Sprechen beim Problemlösen zugeordnet wird, eher indirekter ist, als sie sich aus einer solchen Gleichsetzung ergeben würde. Hussy (1987: 14 f.) unterscheidet drei mögliche Funktionen (vgl. auch Clark, 1998):

- *Kodierungsfunktion:*
Die Benennung von Gegenständen in einer typischen Problemlösungsaufgabe kann Hinweise z. B. auf einen Werkzeugcharakter enthalten, die die Lösung erleichtern.
- *Stabilisatorfunktion:*
„Sprachliche Kodierung fixiert und präzisiert [...] bildhafte Vorstellungen und nimmt ihnen die für klares analytisches Denken nachteilige Instabilität.“
- *Steuerungsfunktion:*
„[...] das Verbalisieren steuert den Lösungsprozeß, indem es das Ziel und den potentiellen Weg zum Ziel immer wieder mit Aufmerksamkeit belegt und benennt.“

Empirische Untersuchungen des Effekts von sprachlichem Denken auf die Problemlöseleistung kommen nicht zu eindeutigen Ergebnissen, was vermutlich u. a. auf methodische Probleme zurückzuführen ist (Roth, 1987; Deffner, 1989; Bartl & Dörner, 1998; vgl. auch Bartl-Storck & Müller, 1999). Das heißt, es ist nicht leicht zu zeigen, daß die Lösung nicht-sprachlicher Probleme durch eine Versprachlichung des Lösungsvorgangs profitiert.

Interessant ist in unserem Zusammenhang immerhin, daß sowohl die Kodierungsfunktion als auch die Stabilisatorfunktion – um hier die Kategorien von Hussy zu gebrauchen – sich auf Besonderheiten sprachlicher Bedeutung beziehen. Die Stabilisatorfunktion kann verstanden werden, wenn man bedenkt, daß mit sprachlicher Ausdrucksseite versehene Konzepte mit höherer Frequenz erscheinen, also mit höherer Redundanz repräsentiert sein werden und als Ergebnis langsamerer Lernprozesse weniger von Kontextvariationen abhängig sind als gerade aktuelle und ggf. kurzfristig gebildete reine Wahrnehmungskonzepte. Von hier ausgehend ergibt sich ein direkter Bezug zu dem im folgenden Abschnitt zu behandelnden Problem des sprachlichen Relativitätsprinzips.

8.3 Sprachliches Relativitätsprinzip und Spracherwerb

Gumperz & Levinson (1996: 25) formulieren den Kern der Whorfschen These und eine Gegenposition in zwei „Syllogismen“, die als Basis für die folgende Diskussion hier im Wortlaut wiedergegeben werden:

“The Whorfian syllogism

- (1) Different languages utilize different semantic representation systems which are informationally non-equivalent (at least in the sense that they employ different lexical concepts);
 - (2) semantic representations determine aspects of conceptual representations;
- therefore*
- (3) users of different languages utilize different conceptual representations.

The anti-Whorfian syllogism

- (1') Different languages utilize the same semantic representation system (if not at the molecular then at least at the atomic level of semantic primes);
 - (2') universal conceptual representations determine semantic systems, indeed THE semantic representation system just is identical to THE propositional conceptual system (the innate ‘language of thought’);
- therefore*
- (3') users of different languages utilize the identical conceptual representation system.”

Der *anti-Whorfian syllogism* ist von den oben angestellten Überlegungen zur Sprache des Denkens her zu kritisieren. Es ist zwar notwendig, so etwas wie einen „*atomic level of semantic primes*“ anzunehmen, dieser *level* ist aber nicht eine zentrale innere Basis des Denkens, sondern entspricht Eigenschaften der Sinnesorgane und der Motorik und unmittelbar an diese anschließender Verarbeitungsinstanzen. Die „Atome“, an die dabei zu denken ist, sind sehr primitiv. Sobald diese Ebene überstiegen wird, geht die Universalität, die durch Vererbung gewährleistet wird, verloren, und wir bewegen uns im Bereich von Konzepten, die durch Lernprozesse

in Anpassung an die Umwelt erworben werden. Das „conceptual representation system“, sofern es nicht auf rein formale Prinzipien reduziert wird, muß auf molekularen Konzepten beruhen bzw. mit molekularen Konzepten arbeiten.

Der *Whorfian syllogism* ist natürlich insofern zu revidieren, als eine Unterscheidung von *semantic representations* und *conceptual representations* im neuronalen Modell nicht akzeptierbar ist. Wir riskieren dann aber eine völlige Banalisierung der Behauptung: Die Whorfsche Position unterscheidet sich von der Anti-Whorfschen nur noch durch die Universalismus-These, die für die molekulare Ebene der Konzepte, wie angedeutet, nicht haltbar ist. (Man sollte sich allerdings bewußt halten, daß Whorf selbst sich überwiegend auf (morpho-)syntaktische Phänomene bezieht, was die Argumentation erschwert und von uns im folgenden übergangen wird, in der Erwartung, daß sich daraus keine grundsätzliche Verfälschung der Problematik ergibt. Zum Verhältnis Sapir/Whorf vs. Weisgerber vgl. Lehmann, 1998.)

Whorfs These schließt aber noch ein Moment ein, dem damit nicht Rechnung getragen ist: Das semantische System einer Sprache, das im Sprecher sicherlich mit individueller Variation gespiegelt ist, ist Gegenstand einer Überlieferung von Generation zu Generation, und es ist dieses System, das Einfluß auf das Denken der Sprachteilnehmer hat. In gewisser Weise gehen hier sprachliche Konzepte den Konzepten, die das Denken verwendet, bestimmend voran. Das widerspricht der Annahme, daß Konzepte bereits in wenigstens vorläufiger Form vorhanden sein müssen, ehe durch einen Lernvorgang eine Bindung an eine sprachliche Ausdrucksseite erfolgen kann, was sich zwingend aus der Charakteristik der Lernvorgänge an ODER-Zellen (vgl. oben Kapitel 4) ergibt. Es kann keine Lösung sein, einfach zuzugestehen, daß die „*cognition first*“-Hypothese offenbar nicht gilt, „da die jeweilige Muttersprache bereits sehr frühzeitig, möglicherweise sogar von Anfang an, den Erwerb sprachlicher Bedeutungen (mit)beeinflußt“ (Weinert, 2000: 335). Wir müssen uns um die zugrundeliegenden neuronalen Mechanismen kümmern.

Ein sicherer Ausgangspunkt ist die banale Feststellung, daß das bloße Hören lexikalischer Ausdrucksseiten – Ausdrucksseiten, für die noch keine Bedeutung etabliert ist – keinen Aufschluß über deren Bedeutung gibt. Das ist der Kern von Saussures Arbitraritätsprinzip und (von den bekannten Ausnahmen abgesehen) unbestreitbar. Etwas weitergehend ist auch ausgeschlossen, daß das bloße Hören einer Ausdrucksseite ei-

ne Bedeutung modifizieren kann. Ebenso sicher ist aber, daß Kinder im Verlauf des Spracherwerbs ihre Wortbedeutungen an den Standard der Umgebungssprache wenigstens so weitgehend anpassen, daß die Kommunikation eventuelle Auffälligkeiten verliert. Die entscheidende Frage ist, wie man sich diesen Anpassungsprozeß auf dem Hintergrund neuronaler Modelle zu denken hat.

Es sind verschiedene (Begleit-)Umstände zu beachten:

- Ein Wort wird mit ausreichender Frequenz in „situativen“ Kontexten gehört, in die es nach den bisher vom Kind erworbenen Konzepten nicht paßt. Das führt auf der einen Seite zu einer Inkohärenz, auf der anderen Seite zu Lernprozessen, die das Wort mit diesen unpassenden Kontexten verbindet. Da Inkohärenz zum Versickern von Bottom-up-Aktivität führt und dadurch verursacht auch anschließende Vorstellungsprozesse nicht initiiert werden können, wird Vergessen, also Abbau entsprechender neuronaler Verbindungen, begünstigt.
- Gerade im semantischen Bereich werden Kinder durch Bezugspersonen korrigiert. Das bedeutet, es wird ein bestimmter Gebrauch negativ bewertet und damit tendenziell vermieden (was wieder den Abbau von Verbindungen begünstigt), unter gleichzeitiger Wirksamkeit entsprechender Lernprozesse.
- Konzepte werden zwar grundsätzlich zeitlich vor der Verknüpfung mit sprachlichen Ausdrucksseiten gebildet und existieren auch unabhängig davon, ob es überhaupt zu einer solchen Verknüpfung kommt. Es ist aber klar, daß die Versprachlichung zu einer höheren Gebrauchsfrequenz der betroffenen Konzepte führt und diese Konzepte dadurch stabilisiert werden. So kann letztlich eine (nicht vollständig) sprachspezifische Auswahl von Konzepten entstehen.

Die Umgebungssprache wird also tatsächlich notwendig die vom sprachlernenden Kind verwendeten Konzepte überformen und filtern. Wenn eine Trennung von semantischem und konzeptuellem System nicht existiert, bedeutet das, daß das Denken (die Verwendung von Konzepten) tatsächlich durch die Traditionen der Umgebungssprache beeinflußt wird. „Denken“ ist hier wohl gemerkt in einem allgemeinen Sinn gebraucht und schließt den Wahrnehmungsprozeß und die Bildung von Vorstellungen mit ein. Da Wahrnehmung (in einem nicht atomaren Sinn)

außerhalb existierender Konzepte nicht möglich ist, werden sprachlich abgedeckte Bereiche immer sozusagen vermittelt durch den sprachlichen Filter wahrgenommen.

Die Sprache-als-System hat damit auch eine wichtige positive Funktion für die Tradition nützlicher, überlebensrelevanter Konzepte in historischen Dimensionen. Ein Stück weit ist jeder Sprecher in seinem Denken ein Opfer der Sprachgeschichte.

Am Rande sei hier noch angemerkt, daß die Herausbildung sprachspezifischer Konzepte im Sinne Whorfs und die Nichttrennung von Semantik und außersprachlichem Konzeptsystem entscheidende Konsequenzen hat für das Verständnis von Formulierungsprozessen in der Sprachproduktion. Der Weg vom Gedanken zum Wort wird kürzer.

9 Sprachliche Universalien, Universalgrammatik

9.1 Elementare universelle Eigenschaften natürlicher Sprachen

Universelle Eigenschaften im Sinne dieses Abschnitts sind Eigenschaften der Repräsentationsarchitektur von Sprache und der Verarbeitungsprozesse, die genetisch determiniert sind. Selbstverständlich sind auch Eigenschaften denkbar, die sich empirisch als universell erweisen, für die das nicht gilt! Es ist nicht impliziert, daß es sich um spezifisch sprachliche, also Sprache gegenüber anderen kognitiven Leistungen charakterisierende Elemente handelt, im Gegenteil: es ist die Behauptung beabsichtigt, daß es sich um Eigenschaften handelt, die – mit vielleicht gradmäßigen Unterschieden – für kognitive Leistungen generell grundlegend sind. Sie sind jedenfalls Grundvoraussetzungen für jede Form von Lernprozessen im Rahmen des Spracherwerbs.

Eine strategisch leitende Annahme für die Modellbildungen der vorangegangenen Kapitel war die These, daß Sprache auf Elementen beruht, die nicht durch komplizierte neuronale Apparaturen gewährleistet werden müssen, sondern sich zwanglos aus der neuronalen Basis ergeben („Sprache ist nahe am Gehirn“). Dabei geht es nicht nur um die statische Repräsentation der sprachlichen Kompetenz, sondern um ein System, das Daten, Verarbeitungsalgorithmen und die ausführende „Maschine“ untrennbar integriert. Es hat sich nun in der Tat zeigen lassen, daß eine ganze Reihe von biologisch selbstverständlichen oder sich aus unbestrittenen Erfordernissen ergebenden neuronalen Grundlagen in den Sprachstrukturen gespiegelt werden.

Wenn konkrete Objekte der Wahrnehmung in flexibler Weise kategorisiert werden sollen, ist dieser Vorgang auf eine komponentielle Natur des sensorischen Inputs angewiesen. Versucht man, die Komponentialität im Gedankenexperiment wegzunehmen, sind nur noch angeborene Kategorien möglich, eine individuelle Anpassung des Verhaltens an wechselnde Umgebungsbedingungen durch Lernprozesse ist ausgeschlossen. Der Zusammenhang der Komponenten ist ein zeitliches Phänomen, der Prozeß der Kategorisierung ist auf die Auswertung dieses zeitlichen Zusammenhangs angewiesen. Neuronal kommt dafür nur der Vorgang der zeitlichen Summation in Frage, der auf der Gedächtnisfunktion beruht, die durch das Andauern des exzitatorischen postsynaptischen Potentials (EPSP) entsteht. Auf dieser Basis ist zunächst die *Gleichzeitigkeit* von Komponenten zu verstehen. Aktionspotentiale gelten in diesem Zusammenhang als gleichzeitig, wenn sie innerhalb eines Zeitfensters auf eine Zelle einwirken, das durch Andauern des EPSP gebildet wird. Das ist die Funktion von Zellen, die wir als „instanzenbildende Zellen“ bezeichnet haben.

Sprache ist aber nicht nur dadurch charakterisiert, daß Einheiten verwendet werden, die als Konzepte aus quasi gleichzeitig anstehenden Komponenten zu verstehen sind, sondern es werden solche Einheiten in eine Abfolge gestellt, die mehr oder weniger geregelt ist. Da die Vorgänger-Nachfolger-Beziehung wieder ein zeitliches und damit ein Gedächtnisphänomen ist, ist es möglich, auch diese Eigenschaft über die Grundfunktion der zeitlichen Summation zu erklären. Die Unterscheidung der Abfolge von der Gleichzeitigkeit setzt unterschiedliche EPSP-Dauern voraus, so daß die Realisierung von Abfolgen auf einen eigenen Zelltyp gelegt werden muß, die von uns so genannten „sequenzenbildenden Zellen“. Da es um Abfolgen von Konzepten geht, müssen Sequenzen als Ketten von Konzeptrepräsentationen verstanden werden.

Eine Erklärung von Konzeptbildung und Abfolge in dieser Art ist auf die Großmutterzellen-Theorie der mentalen Repräsentation angewiesen. Es handelt sich sicherlich um eine maximal einfache Erklärung, da sie auf der Funktion einzelner Zellen beruht und entsprechende Leistungen nicht auf kleinere Zellbestandteile übertragen werden können. Aus den Mechanismen der Konzeptbildung ergibt sich eine wesentliche Eigenschaft der Kategorisierung, nämlich das Entstehen prototypischer Effekte. Die Prototypizität der Konzepte ist eine wichtige Voraussetzung für deren tatsächliche Flexibilität und Brauchbarkeit. Die Repräsentationsform für Sequenzen ergibt sich aus den Grundlagen des neuronalen Ler-

nens (Aufbau von Verbindungen nur zwischen Neuronen, die innerhalb eines Zeitfensters aktiviert sind). Es entstehen z. B. Repräsentationen lexikalischer Ausdrucksseiten, die einen effektiven Lexikonabgleich leisten (nicht nur gewährleisten).

Bildung von Konzepten (Prototypizität) und Sequentialität sind in besonders deutlicher Weise universelle Grundlagen natürlicher Sprachen, da sie auf Eigenschaften einzelner Neuronen beruhen, Eigenschaften, die ihrerseits nicht durch Lernprozesse zustande kommen.

Bestimmte Architekturdetails über die einzelne Zelle hinaus werden allerdings auch dabei schon für eine problemlose Funktion vorausgesetzt. „Architekturdetails“ meint bestimmte Verschaltungsstrukturen zwischen einzelnen Neuronen. Grundsätzlich bestimmend sind solche Architekturdetails für andere wichtige Eigenschaften, so z. B. die als „Faltung“ bezeichnete Verschaltung als Grundlage für die hierarchische Natur der Sprache. Hierarchie entsteht dadurch, daß Verarbeitungsschritte gleicher Art auf einer Verarbeitungsbahn von der Sinnesperipherie zu einem Zentrum hin (oder in umgekehrter Richtung) wiederholt werden können. Für die Zahl der möglichen Wiederholungen gibt es wahrscheinlich Beschränkungen aufgrund der erforderlichen Verarbeitungszeit, die ein (schwer bestimmbares) Maximum nicht überschreiten darf, wenn keine Verarbeitungsstörungen entstehen sollen. Ein Verschaltungsmuster, das ODER-Verbindungen erlaubt, ist für alle Formen von Alternativen verantwortlich, auch die Alternative, die durch die sprachliche Zuordnung von Ausdruck und Inhalt entsteht.

Es ist charakteristisch für natürliche Sprachen, daß die für den Verstehensprozeß wesentlichen Formen auch für die Produktion genutzt werden. Formen für die Produktion müssen nur an der äußersten Peripherie losgelöst von der Perzeption (durch einen Versuchs-Irrtums-Prozeß) aufgebaut werden. Letzteres zeigt, daß diese Parallelität doch nicht so selbstverständlich ist, wie man vielleicht denkt. Entsprechende Top-down-Strukturen werden durch ein eigenes System von Zellen, von uns „prädiktives System“ genannt, gewährleistet.

Zu den wichtigen Eigenschaften des Verarbeitungsprozesses von natürlich-sprachlichen Äußerungen gehört die unmittelbare Kohärenzkontrolle durch ein notwendigerweise zentrales System und entsprechende Top-down-Reparaturen, die durch die hierarchische Organisation und das prädiktive System ermöglicht werden.

Alle bisher angesprochenen Zusammenhänge zwischen angeborener neuronaler Struktur und Eigenschaften natürlicher Sprachen betreffen eher „formale“ Elemente. Angeborene Kategorien („Daten“) kann es nur (und muß es) an der Sinnesperipherie bzw. motorischen Peripherie geben.

9.2 Sprache ohne Semantik

Ein Bereich der Linguistik, in dem das Stichwort „Universalien“ eine besonders große Rolle gespielt hat, ist die Semantik. Katz & Fodor (1963) haben als Basis der Semantik eine Metatheorie verlangt, die eine Liste universeller semantischer Marker enthalten sollte. Auch dann, wenn solche universellen Komponenten in Beschreibungen von Lexemen nicht einfache Aufzählungen sondern komplexe Strukturen bilden, werden sie als atomar angesehen.

Die Verwendung dieser Grundsätze ist in der Vergangenheit allerdings nie über das Stadium von Beispielen hinaus gediehen. Wenn von der neuronalen Modellbildung her Zweifel angemeldet werden können an der Lernbarkeit einer eigenständigen sprachlichen Semantik (siehe oben Abschnitt 4.1), ist es aber eine mögliche Strategie, die nicht lernbaren Elemente für universell zu erklären. Es handelt sich dann um universelle Elemente, die nicht an der Sinnesperipherie, sondern weiter im Zentrum der Verarbeitung anzusiedeln sind – und damit unterliegen sie dem, wie oben in Abschnitt 5.1 gezeigt, unlösbaren Bootstrapping-Problem.

Wenn die Annahme semantischer Universalien das Lernproblem für die Semantik nicht lösen kann, bleibt nur noch die Identifikation der vermeintlich semantischen Kategorien mit den Wahrnehmungskategorien, wie oben in Kapitel 4 auch realisiert.

Das Universalien-Thema ist damit für den Bereich „inhaltlicher“ Konzepte nicht vom Tisch, denn es bleibt die schon mehrfach angesprochene Universalität der Sinneskategorien und peripheren motorischen Zuordnungen. Diese Kategorien sind am äußersten Ende als atomar zu charakterisieren (wenn man an einer solchen Charakterisierung interessiert ist), es ist aber auch in dem noch angeborenen und nicht aufgrund von Lernprozessen veränderbaren Bereich mit zusammengesetzten Kategorien zu rechnen. Auf einer Ebene, die den üblichen semantischen Beschreibungen von Lexemen entspricht, sind wahrscheinlich alle Komponenten schon hoch komplex.

Wenn man auf die Annahme einer eigenständigen Semantik verzichtet, werden nicht nur Lernprozesse möglich und erklärbar, sondern auch der Realitätsbezug sprachlicher Inhalte wird problemlos.

9.3 Formen der „Kreativität“

Eine Grundannahme der generativistischen Spracherwerbstheorie ist, daß der Sprachbesitz eines Erwachsenen nicht allein erklärt werden kann als Ergebnis des sprachlichen Inputs, dem er als Lerner ausgesetzt war. Das Zustandekommen der Erwachsenenkompetenz trotz der „Unterdeterminiertheit“ durch die sprachlichen Erfahrungen wird als „logisches Problem des Spracherwerbs“ bezeichnet. Es hat mehrere Facetten, darunter auch eine quantitative: Der erwachsene Sprecher kann *mehr* verschiedene Sätze und Strukturen produzieren, als er je gehört oder gelesen hat.

Diese quantitative „Kreativität“ der Sprache kommt auf verschiedene Weise zustande. Eine unter dem Gesichtspunkt des Spracherwerbs relativ unproblematische Variante ist die, daß gesteuert durch syntaktische Eigenschaften von Konstituenten (Beispiel: Wortartinformation) neue Kombinationen gebildet werden. Der Spracherwerbsprozeß im syntaktischen Bereich, wie oben in Kapitel 6 beschrieben, schafft die entsprechenden Voraussetzungen dafür in selbstverständlicher Weise.

Schwieriger wird es aber in den Fällen, die Chomsky ursprünglich durch die Rekursivität der syntaktischen Regelsysteme zu erfassen versucht hat. Nur diese Variante liefert tatsächlich die *unendlich vielen* möglichen Sätze, die für den Generativisten eine Sprache ausmachen. Im Hinblick auf netzförmige neuronale Strukturen ist es wichtig, noch einmal zwei Untertypen zu unterscheiden, die schon in den frühen Arbeiten von Chomsky (z. B. Chomsky, 1957) als verschieden behandelt werden: eine Form von Rekursivität, die auch bei „*finite state*“-Grammatiken möglich ist und die einfach darin besteht, daß Elemente beliebig oft wiederholt werden können, und eine Form, die auf den Formalismus der Phrasenstrukturgrammatiken angewiesen ist. Letzteres ist der Fall bei deutschen Beispielen wie dem berühmten Satz aus Tesnière (1959: 558) „Die, die die, die die Bäume beschädigen, anzeigen, werden belohnt“. Wenn man in diesem Satz die Konstituenten, auf die es ankommt, ohne sich weiter um die syntaktischen Details zu kümmern, durch die Buchstaben *a* und *b* ersetzt, hat er die Form *aaabbb* und wird durch die folgende, bei

Chomsky (1957:30) angegebene Phrasenstrukturgrammatik erzeugt:

$$\begin{aligned} \Sigma: Z \\ \text{F: } Z &\rightarrow ab \\ &Z \rightarrow aZb \end{aligned}$$

Man würde wahrscheinlich zunächst annehmen, daß die bloße Wiederholung von Konstituenten (z. B. in Aufzählungen) für ein neuronales System unproblematisch ist, weil das auch sonst für netzförmige Grammatiken gilt. Man denke auch an die neuronale Repräsentation von Längen, für die oben in Abschnitt 4.3 Wiederholungsschleifen eingeführt worden sind. Wiederholungsschleifen müssen allerdings, wie dort argumentiert, angeboren sein, werden also nicht bei Bedarf durch Verstärkung von Synapsen etabliert, sondern umgekehrt durch einen gesteuerten Vergessensprozeß abgebaut, wenn sie nicht gebraucht werden. Aber: Länge einer Konstituente ist nicht identisch mit der Wiederholung dieser Konstituente. Die Wiederholung der Konstituente ist erst möglich nach der Aktivierung des die Konstituente abschließenden Endelements. Also müßte eine Schleife, die eine Wiederholung einer syntaktischen Konstituente ermöglichen würde, von dem Endelement ausgehen, wie in Abbildung 9.3-1 dargestellt.

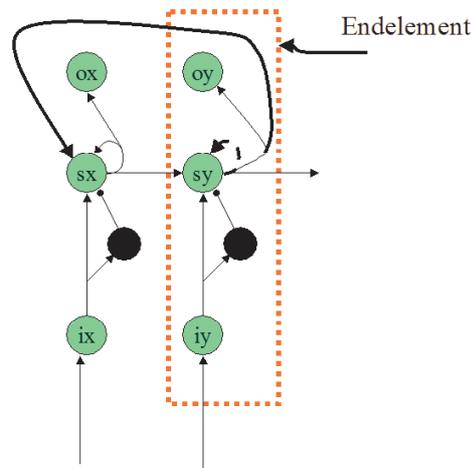


Abbildung 9.3-1: Schleifenförmige Verbindung (fett ausgezeichnet) zur Wiederholung einer syntaktischen Konstituente

Die Frage ist natürlich, ob man solche angeborenen Verbindungen zugehen möchte. Die Konsequenz wäre wahrscheinlich, daß man die Zuordnung potentieller Endelemente, also eine Art Paarbildung, ebenfalls für angeboren erklären müßte. Auf der anderen Seite ist zu fragen, ob tatsächlich beliebig lange Aufzählungen unverdächtige Bestandteile von Sätzen sein können, also Bestandteile, bei deren Verarbeitung es keine Gedächtnisprobleme gibt. Man beachte, daß die syntaktische Verarbeitung im neuronalen Modell nicht standardmäßig mit einer adressierbaren Kurzzeitgedächtniskomponente arbeitet! Ist eine Phrase wie „die große, schöne, saftige, reife, grüne Birne“ ebenso unauffällig wie die kürzere Version „die schöne, saftige Birne“? Was passiert, wenn die Reihe der Adjektive weiter verlängert wird? In dem Augenblick, wo wir Gedächtniseffekte zugestehen, wird es wahrscheinlich, daß die Verarbeitung durch Strukturen geschieht, in denen Sequenzen unterschiedlicher, aber fester Länge vorgesehen sind.

Für den komplizierteren Fall der selbsteinbettenden Struktur, die durch eine Phrasenstrukturgrammatik realisiert werden muß, gilt von vornherein, daß sie, bei Annahme einer Verarbeitung „von links nach rechts“, auf die Verwendung eines Stapelspeichers angewiesen ist, also eine Apparatur, die man sich in effektiver Form kaum anders als in einem *symbolverarbeitenden*, also eben nicht *neuronalen* System vorstellen kann.

Das Fazit ist also, daß die Annahme der Unendlichkeit der Satzmengen in natürlichen Sprachen mit Fragezeichen versehen werden muß, wenn man sich auf den tatsächlich in den Sprechern mental repräsentierten Sprachbesitz bezieht. Daß die Bedeutung von beliebig langen Sätzen mit einiger Mühe *konstruiert* werden kann, ist kein Widerspruch.

9.4 Spracherwerb ohne „angeborene Ideen“

Viele Voraussetzungen für den Spracherwerb sind angeboren, aber sie haben nicht den Status einer angeborenen Universalgrammatik. Es handelt sich außerdem um Voraussetzungen, die nicht spezifisch für die Sprachfähigkeit sind. Man mag zweifeln – jedenfalls im ersten Augenblick –, ob es überhaupt sprachspezifische angeborene Eigenschaften geben kann. Aber es gibt sie tatsächlich. Viel Energie ist aufgewendet worden, um zu zeigen, daß die menschlichen Artikulationsorgane (und damit auch der relativ periphere neuronale Hintergrund) in der frühkindlichen

Entwicklung einen Stand erreicht haben müssen, der eine sprachliche Artikulation zuläßt. Das gilt schon für die Zeit Lennebergs (vgl. Lenneberg, 1967). Es ist erst viel später wahrscheinlich gemacht worden, daß es im auditiven Bereich angeborene Detektoren für sprachspezifische phonetische Merkmale geben muß. Wir haben in Abschnitt 3.1 argumentiert, daß sich die Annahme solcher sprachspezifischer angeborener Strukturen aus den Bedingungen der Sprachverarbeitung heraus zwingend ergibt. Die angeborenen Eigenschaften im Bereich der Artikulation und der auditiven Wahrnehmung unterliegen nicht der Bootstrapping-Problematik, weil sie von vornherein entweder äußerste Peripherie sind oder mit ihr jedenfalls in direkter, nicht durch konstruktive Lernvorgänge aufzubauender Beziehung stehen. Die zu den Artikulationsorganen führenden Top-down-Verbindungen, soweit sie nicht angeboren sind, können durch einen Versuchs-Irrtums-Prozeß fixiert werden.

Von der „Universalgrammatik“ der Generativisten sind so gesehen nur minimale, unverdächtige Reste übrig. Der Spracherwerbsvorgang beruht auf der Lernfähigkeit einer differenzierten neuronalen Architektur, insbesondere auf spezifischen Lerncharakteristika unterschiedlicher Zelltypen.

Technik	liefert
Instanzenbildung	Konzepte aller Art und Instanzen davon
Sequenzenbildung	lexikalische Ausdrucksseiten, syntaktische Sequenzen, Produktionsstrukturen
Bildung von ODER-Verbindungen	Hierarchien, Syntax, Produktionsstrukturen
Trial-and-error	Verbindungen mit der Motorik (nicht nur im sprachlichen Bereich)
gesteuertes Vergessen	Abbau von Wiederholungsschleifen (Längen) in Phonologie und Syntax

Tabelle 9.4-1: Zusammenstellung der Lernprozesse und ihrer Leistung

Das bedeutet auch, daß der Spracherwerb dezentral ist und nicht der Steuerung einer übergeordneten Spracherwerbsapparatur unterliegt. Der

beobachtbare universelle Verlauf, für den Steuerungsvorgänge verantwortlich gemacht worden sind, muß sich als natürliche Konsequenz aus der gegenseitigen Abhängigkeit von aufeinander aufbauenden Teilprozessen ergeben. Beispiele: Die Entwicklung komplexer Begriffe setzt Hierarchien elementarerer Begriffe voraus. Der Übergang von der Einwortphase zur Zweiwortphase in der Syntax setzt die Weiterentwicklung von Wortartenkonzepten voraus. Die beobachtbaren(!) Ergebnisse morphologischer Segmentierung liegen relativ spät, da sie Input mittlerer Häufigkeit voraussetzen und außerdem einen Stand der Entwicklung der phonologischen Analysekatoren, die auch schwächer betonte Elemente ausreichend genau analysierbar machen usw.

Es ist auch keine Zentrale erforderlich, die so etwas wie eine Einfachheitsbewertung durchführen und so für größtmögliche Generalisierung der gelernten Strukturen sorgen würde, worauf in den älteren Versionen der generativen Spracherwerbtheorie besonderen Wert gelegt wurde. Das Prinzip der größtmöglichen Einfachheit ist, über die selbstverständliche Leistung der neuronalen Architektur hinaus, kein leitendes Prinzip für Spracherwerbsprozesse.

Das Kind entscheidet nicht, Sprache lernen zu wollen. Es ist sprachlichem Input ausgesetzt, genauso wie anderen Eindrücken, denen es sich nicht entziehen kann. Der frühe Spracherwerb ist kein „aktiver Konstruktionsprozeß“ (gegen Klann-Delius, 1999: 135), auch dann nicht, wenn Sprachproduktion zugegebenermaßen auf einen Antrieb (um es möglichst neutral auszudrücken) angewiesen ist. Der Spracherwerb ist im wesentlichen eine „passive“ Reaktion des Gehirns gegenüber der Umgebung aufgrund *einfacher* dezentraler und nicht sprachspezifischer Struktur- und Lernprinzipien im Kortex – und ggf. *komplexerer* angeborener, teilweise auch sprachspezifischer Strukturen an der Peripherie.

Anhang: Das Simulationsprogramm

A1 Systemvoraussetzungen

Betriebssysteme:

Windows-Betriebssysteme ab Windows 95.

Bildschirm:

Auflösung mindestens 800×600 Pixel, optimal 1024×768 Pixel.

Speicherbedarf auf der Festplatte:

weniger als 1 MB.

A2 Aufruf und Schließen

Das Programm wird, wie üblich, durch Klick auf x geschlossen. Eine manchmal interessante alternative Möglichkeit ist die Tastatureingabe von **q** (für quit).

Der Aufruf des Programms hat die Form

```
sspwin[.exe] <Titel> <Netzdatei> <Eingabedatei>  
[<Modusparameterliste>]
```

Angaben in eckiger Klammer sind wahlfrei.

<Titel> ist eine beliebige Zeichenkette; wenn sie Leerzeichen enthält, muß sie in doppelte Anführungszeichen gesetzt werden.

<Netzdatei> ist der Name der Datei, die die Netzdefinition enthält.

<Eingabedatei> ist der Name der Datei mit den externen Eingaben.

Für die Bezeichnungen von <Netzdatei> und <Eingabedatei> gelten die Beschränkungen des Betriebssystems, der Titel und beide Dateien müssen immer angegeben werden.

<Modusparameterliste>

Innerhalb der Modusparameterliste ist die Reihenfolge beliebig. Verfügbare Modusparameter:

c

Die Druckausgabe erfolgt auf eine BMP-Datei (24-bit-Bitmap) mit dem Dateinamen bild.bmp; ohne diese Option erfolgt die Druckausgabe auf eine PCL-Datei mit dem Dateinamen bild.pcl.

d <laufende Nummer>

<laufende Nummer> ist die Nummer der ersten auszugebenden Zelle bei den Optionen g, G und bei Fehlen von Modusparametern. Die Zellen werden nach ihrer Reihenfolge in der Netzdatei numeriert, und zwar so, daß die zuletzt aufgeführte Zelle die Nummer 1 hat.

g

bewirkt eine oszilloskopförmige Bildschirmausgabe, es werden nur die Aktionspotentiale in zeitlichem Verlauf gezeichnet.

G

bewirkt eine oszilloskopförmige Bildschirmausgabe, es werden die Aktionspotentiale und die EPSPs/IPSPs in zeitlichem Verlauf dargestellt.

k

bewirkt eine listenförmige Ausgabe, bei der nur die Identifikationen der feuernenden Zellen zusammen mit dem Zeitpunkt des Feuerns angezeigt werden.

p <Wahrscheinlichkeit>

<Wahrscheinlichkeit> kann ganzzahlige Werte von 50 bis 99 annehmen und legt fest, wie wahrscheinlich eine Zelle, die prinzipiell feuern würde, zu einem bestimmten Zeitpunkt tatsächlich feuert. Ein hoher Wert bedeutet eine hohe Wahrscheinlichkeit. Wenn die Zelle nicht feuert, wird die Entscheidung im nächsten Zeittakt wiederholt. Dieses Verfahren dient zur zufälligen Streuung des Zeitverhaltens einer Zelle. Fehlt diese An-

gabe, ist die Wahrscheinlichkeit 100%. Das Ergebnis bei aufeinanderfolgenden Simulationsläufen ist gleich.

P <Wahrscheinlichkeit>

wirkt wie **p**, das Ergebnis bei aufeinanderfolgenden Simulationsläufen ist aber verschieden.

R <Zeitrafferparameter>

Zusammen mit den Optionen **G** oder **g** wird in der Ausgabe die durch <Zeitrafferparameter> angegebene Zahl von Zeittakten unterdrückt. Aktionspotentiale werden aber immer dokumentiert.

v

Der Bildschirm zeigt ein Abbild des Netzes mit Anzeige der Anfangs-Verbindungsgewichte.

V

Der Bildschirm zeigt ein Abbild des Netzes mit Anzeige der Verbindungsgewichte, die laufend dem aktuellen Zustand angepaßt werden.

x <X-Verschiebung>

y <Y-Verschiebung>

Diese Parameter bewirken eine Positionierung des Simulationsbilds bei den Modi **V** und **v** auf dem Bildschirm (z.B. zur Anpassung an unterschiedliche Bildschirmgrößen). X-Verschiebung und Y-Verschiebung werden aus historischen Gründen in Zeilen und Spalten angegeben, genauso wie die Positionen in den Netzdateien.

Z <Zeitlupenparameter>

Der Ablauf der Simulation wird verlangsamt. Realistische Werte für den <Zeitlupenparameter> sind (geräteabhängig!) ca. 1 bis 100.

Wenn kein Modusparameter aus der Menge g, G, v, V und k angegeben ist, erfolgt die Ausgabe in Form einer Zahlentabelle, die die Höhe der EPSPs/IPSPs angibt.

Beispiele für Aufrufe:

```
sspwin.exe "Lernen A" n.net d.ein P 98 d 20 c Z 10 G
sspwin Lernen_B netz.net daten.ein p 97 c V x 10 y 5
```

Man beachte: Die Leerzeichen, auch im Bereich der Modusparameter, sind obligatorisch!

A3 Netzdefinition

Das zu simulierende neuronale Netz wird in der Netzdatei definiert. Die Definition besteht aus den Teilen

```
<Liste der Zellen>
[f
<Liste der Default-Parameter>]
```

Der Default-Teil kann weggelassen werden, wenn man sicher ist, alle relevanten Parameter in der Liste der Zellen angegeben zu haben. Die vom Programm erzeugte Zustandsausgabe verwendet dieses Format. Es empfiehlt sich aber wegen des geringen Aufwands, immer einen entsprechenden Satz von Default-Werten zu vereinbaren.

Für die Netzdefinition insgesamt gilt, daß Zeilen, die mit einem Leerzeichen beginnen, als Kommentarzeilen betrachtet und ignoriert werden. Kommentare können an das Ende einer gültigen Zeile angeschlossen werden, wenn dort keine optionalen Elemente weggelassen worden sind.

<Liste der Default-Parameter>

a <Abnahmerate des EPSP>

<Abnahmerate des EPSP> ist der Wert, mit dem der alte EPSP-Wert in jedem Zeittakt multipliziert wird, um den neuen Wert zu erhalten; typisch z. B. 0.982.

d <Leitungsverzögerung>

<Leitungsverzögerung> ist ein ganzzahliger Wert, der die Impulslaufzeit von Zelle zu Zelle in Zeittakten angibt; typisch z. B. 2.

r <Refraktärzeit>

<Refraktärzeit> ist ein ganzzahliger Wert, der die Refraktärzeit der Zellen in Zeittakten angibt; typisch z. B. 4.

s <Schwellenwert>

<Schwellenwert> ist der Schwellenwert der Zelle; typisch z. B. 50.0.

w <Gewicht>

<Gewicht> gibt das Anfangsgewicht der Synapsen an, bzw. bei Simulationen ohne Lernvorgänge das Gewicht der Synapsen; typisch z. B. 1.0.

l <Lernschritt>

<Lernschritt> gibt den Betrag an, um den eine veränderbare Synapse verstärkt werden soll, wenn sie benutzt wird. Der angegebene Wert wird mit dem Parameter Zellplastizität verrechnet; typisch z. B. 60.0.

m <Gewicht>

<Gewicht> gibt das Maximalgewicht der Synapsen an; typisch z. B. 49.0.

i <Abnahmerate>

<Abnahmerate> gibt den Wert an, mit dem die Synapsengewichte in jedem Zeittakt zu multiplizieren sind. Der angegebene Wert wird mit dem Parameter Zellplastizität verrechnet; typisch z. B. 0.995.

v <Plastizitätswert>

<Plastizitätswert> gibt die Anfangsplastizität der Zelle an. Werte zwischen 0 und 1 sind möglich; typisch z. B. 0.6.

g <Abnahmerate>

<Abnahmerate> gibt den Wert an, mit dem die Zellplastizität in jedem Zeittakt zu multiplizieren ist. Werte zwischen 0 und 1 sind möglich; typisch z. B. 1.0

h <Wert>

<Wert> bestimmt die Veränderung der Zellplastizität pro Aktionspotential auf der betroffenen Zelle. Negative Werte bewirken eine Reduktion, positive eine Steigerung der Zellplastizität. Ein negativer Wert von -0.9999 z. B. reduziert die Zellplastizität in einem Schritt auf einen Wert nahe 0.

x <Fenstergröße>

<Fenstergröße> ist ein ganzzahliger Wert, der die Länge des Fixationszeitfensters in Zeittakten angibt; typisch z. B. 100.

Beispiel für eine Definition von Default-Werten mit Kommentaren:

```
f
a 0.982  Abnahmerate des EPSP
d 2      Leitungsverzoegerung
r 4      Refraktaerzeit
s 50.0   Schwellenwert
w 1.0    Anfangsgewicht der Synapsen
l 60     Lernschritt
m 49     Maximalgewicht der Synapsen
i 0.995  Abnahmerate der Synapsengewichte pro Zeittakt
v 0.6    Anfangsplastizitaet der Zelle
g 1.0    Abnahmerate der Zellplastizitaet pro Zeittakt
h -0.9999 Zunahmerate der Zellplastizitaet pro Spike
x 100    Fixations-Zeitfenster</P>
```

<Liste der Zellen>

Die Liste der Zellen enthält Zelldefinitionen der folgenden Form:

```
z <Zellidentifikation> [<Bildschirmposition>]
[<Zellparameter>]
[<Definition der Verbindungen mit anderen Zellen>]
```

Die einzelnen Angaben müssen, wie hier angedeutet, durch Leerzeichen separiert und auf einzelne Zeilen gestellt werden.

<Zellidentifikation>

Die Zellidentifikation besteht aus 1–3 Zeichen. Es gibt keine weiteren Beschränkungen.

<Bildschirmposition>

gibt für alle Zellen, die bei den Optionen v oder V auf dem Bildschirm erscheinen sollen, die Koordinaten in der Form <Zeile> <Spalte> (Reihenfolge beachten!) an. Zeile und Spalte sind ganzzahlige Werte. Die tatsächlichen Pixelpositionen werden aus diesen Werten errechnet. Typische Werte sind z. B. 20 40 .

<Zellparameter>

Zellparameter sind Parameter, die nicht einzelne Verbindungen, sondern die Zelle als Ganzes betreffen, also die Parameter a, r, s, v, g und h.

Sie werden in einer jeweils eigenen Zeile festgelegt, wie oben bei der Beschreibung der Default-Definitionen angegeben. Parameter, die den Default-Werten entsprechen, müssen nicht notiert werden.

<Definition der Verbindungen mit anderen Zellen>

Die Definition der Verbindungen mit anderen Zellen hat die Form

c <Zellidentifikation> [<Synapsengewicht>] [<Leitungsverzögerung>]
[<Synapsenparameter>]

<Zellidentifikation>

ist eine Zeichenkette aus 1–3 Zeichen, siehe oben.

<Synapsengewicht>

gibt das Gewicht der Synapse an. In lernenden System gibt dieser Wert das Anfangsgewicht der Synapse an. Vgl. oben die Beschreibung des entsprechenden Default-Werts.

<Leitungsverzögerung>

Wenn dieser Parameter hier angegeben werden soll, muß auch das Synapsengewicht angegeben werden. Vgl. wieder die Beschreibung bei den Default-Parametern.

<Synapsenparameter>

sind w, l, m, i und x. Sie werden jeweils in einer eigenen Zeile notiert, wie oben bei der Beschreibung der Default-Parameter angegeben. Parameter, die den Default-Werten entsprechen, können weggelassen werden.

Beispiel für eine Liste von Zellen:

```
z zz1 10 10
a 9.81
c zz2
c zz1 10 5
c zz3 10
l 40
m 15
i 1

z zz2 10 20

z zz3
```

A4 Eingabe äußerer Ereignisse

Zur Eingabe äußerer Ereignisse dient eine Eingabedatei, in der festgelegt wird, welche der in der Netzdefinition enthaltenen Zellen in welchen Zeittakten ein überschwelliges EPSP haben sollen. Die Angaben bestehen aus Paaren von <Zellidentifikation> und <Zeittakt>, durch Leerzeichen getrennt.

Beispiel:

```
AA 0 zz1 20 zz2 120  
zz3 240 *** 260  
.
```

Die Angaben müssen streng aufsteigend nach Zeittakten sortiert sein. Die Kombination *** <Zeittakt> bewirkt einen Simulationsstop. Es können beliebig viele Simulationsstops verlangt werden.

Die Eingabedatei muß durch einen Punkt auf der ersten Position einer neuen Zeile abgeschlossen werden.

Wie in der Netzdatei werden in der Eingabedatei Zeilen, die mit Blank beginnen, als Kommentarzeilen interpretiert und ignoriert.

Ebenso wird Text hinter dem schließenden Punkt ignoriert.

A5 Simulationsverlauf und Ergebnisse

Nach dem Aufruf des Programms erscheint bei den Optionen v und V ein Anfangszustand, und es werden einige Schaltflächen am oberen Rand sichtbar. Bei allen anderen Optionen sind nur die Schaltflächen sichtbar, und die übrige Fensterfläche bleibt leer. Wenn die Fenstergröße verändert werden soll, ist dieser Zeitpunkt vor Beginn der eigentlichen Simulation vor allem bei den Optionen g, G und ohne Option am günstigsten dafür.

Die eigentliche Simulation kann auf zweierlei Weise gestartet werden:

- Durch Klick auf die Schaltfläche „Simulation bis Stop“. Die Simulation läuft automatisch mit der ggf. durch die Option **Z** bestimmten Geschwindigkeit bis zum nächsten in der Eingabedatei bestimmten

Simulationsstop, längstens bis zur letzten Zeitangabe in der Eingabedatei. Dieser Ablauf kann nicht unterbrochen werden.

- Durch Betätigen der Leertaste. Diese Methode funktioniert auch nach der letzten Zeitangabe in der Eingabedatei.

Besondere Funktionen:

Bei der Option **k** und bei Fehlen einer Formatoption wird eine Schaltfläche „Logfile starten“ angezeigt. Mit Klick auf diese Schaltfläche wird ein File mit dem Namen logfile.txt geöffnet, in das der Bildschirminhalt zusätzlich gesichert wird.

Mit Klick auf die Schaltfläche „Druckausgabe“ kann eine Druckdatei erzeugt werden, vgl. oben die Beschreibung des Modusparameters **c**.

Bei Klick auf die Schaltfläche „Zustandsausgabe“ wird der augenblickliche Zustand des Netzes in eine Datei mit Namen zustand.txt gesichert. Dieser Zustand kann unverändert als Netzdatei in einem späteren Aufruf verwendet werden.

Mit Klick auf die Schaltfläche „Neustart“ kann das System auf die Anfangswerte zurückgesetzt werden. Bei Option **P** wird die folgende Simulation mit anderen Zufallswerten versehen.

Fehlermeldungen:

Bei einigen Netzfehlern erfolgt die Ausgabe zusätzlicher Informationen auf der Datei protok.txt. Das Netz ist oberflächlich in Ordnung, wenn diese Datei leer ist.

Ergänzende Hinweise:

Für die graphische Ausgabe in den Modi **v**, **V**, **G** werden die Aktivationswerte nach oben gerundet, damit auch kleine Werte noch sichtbar bleiben. Der Nachteil ist, daß knapp unter-schwellige Werte nicht mehr von überschwelligen unterschieden werden können.

Bei den Verbindungsgewichten wird zuungunsten der kleinen Werte gerundet, knapp unter-schwellige Gewichte bleiben damit erkennbar.

Klick auf das Fenster vervollständigt ggf. die Darstellung bei **v** und **V**.

Die verwendete Abstraktionsebene der Darstellung impliziert eine Zeitdefinition zwischen ca. 0,1 und 1 ms als Dauer eines Zeittaktes.

Literatur

- Aitchison, J. (1997) *Wörter im Kopf. Eine Einführung in das mentale Lexikon*. Aus d. Engl. von M. Wiese. Tübingen: Niemeyer
- Allen, J. (1995) *Natural language understanding*. 2. ed. Redwood City/Calif.: Benjamin/Cummings Publ.
- Baker, C. L. & McCarthy, J. J. (1981 eds.) *The logical problem of language acquisition*. Cambridge/Mass.: MIT Press
- Bartl, C. & Dörner, D. (1998) Sprachlos beim Denken – zum Einfluß von Sprache auf die Problemlöse- und Gedächtnisleistung bei der Bearbeitung eines nicht-sprachlichen Problems. *Sprache & Kognition 17*, 224–238
- Bartl-Storck, C. & Müller, G. (1999) Beeinträchtigung der Problemlösefähigkeit bei Broca-Aphasie. *Sprache & Kognition 18*, 98–112
- Berko, J. & Brown, R. (1960) Psycholinguistic research methods. In: Mussen, P. H. (ed.) 517–557
- Bernhardt, B. H. & Stemberger, J. P. (1998) *Handbook of phonological development from the perspective of constraint-based nonlinear phonology*. San Diego/Calif.: Academic Press
- Bierwisch, M. & Schreuder, R. (1992) From concepts to lexical items. *Cognition 42*, 23–60
- Blevins, J. (1995) The syllable in phonological theory. In: Goldsmith, J. A. (ed.), 206–244
- Bloom, P. (1999) Theories of word learning. Rationalist alternatives to associationism. In: Ritchie, W. C. & Bhatia, T. K. (eds.), 249–278
- Bloom, P. (2000) *How children learn the meanings of words*. Cambridge/Mass., London: MIT Press
- Bresnan, J. (1982 ed.) *The mental representation of grammatical relations*. Cambridge/Mass.: MIT Press
- Broeder, P. & Murre, J. (2000 eds.) *Models of language acquisition. Inductive and deductive approaches*. Oxford: Oxford University Press

- Browman, C. & Goldstein, L. (1992) Articulatory phonology. An overview. *Phonetica* 49, 155–180
- Burri, A. (1997) Einleitung: Zwischen Sprache und Denken. In: Burri, A. (Hg.), 1–29
- Burri, A. (1997 Hg.) *Sprache und Denken*. Berlin, New York: de Gruyter
- Carruthers, P. & Boucher, J. (1998, eds.) *Language and thought. Interdisciplinary themes*. Cambridge: Cambridge University Press
- Chomsky, N. (1957) *Syntactic structures*. 's-Gravenhage: Mouton
- Chomsky, N. (1965) *Aspects of the theory of syntax*. Cambridge/Mass.: MIT Press
- Chomsky, N. (1975) *Reflections on language*. New York: Pantheon
- Chomsky, N. (1980) *Rules and representations*. Oxford: Blackwell
- Chomsky, N. (1999) On the nature, use, and acquisition of language. In: Ritchie, W. C. & Bhatia, T. K. (eds.), 33–54
- Chomsky, N. & Halle, M. (1968) *The sound pattern of English*. New York: Harper & Row
- Clark, A. (1998) Magic words. How language augments human computation. In: Carruthers, P. & Boucher, J. (eds.), 162–183
- Deffner, G. (1989) Interaktion zwischen lautem Denken, Bearbeitungsstrategien und Aufgabenmerkmalen? Eine experimentelle Prüfung des Modells von Ericsson und Simon. *Sprache & Kognition* 8, 98–111
- Demuth, K. (1996) The prosodic structure of early words. In: Morgan, J. L. & Demuth, K. (eds.), 171–184
- Diesmann, M., Gewaltig, M.-O. & Aertsen, A. (1999) Stable propagation of synchronous spiking in cortical neural networks. *Nature* 402, 529–533
- Dominey, P. F. & Ramus, F. (2000) Neural network processing of natural language: I. Sensitivity to serial, temporal and abstract structure of language in the infant. *Language and Cognitive Processes* 15, 87–127
- Dresher, B. E. (1999) Child phonology, learnability and phonological theory. In: Ritchie, W. C. & Bhatia, T. K. (eds.), 299–346
- Ellis, R. & Humphreys, G. W. (1999) *Connectionist psychology. A text with readings*. Hove: Psychology Press
- Elman, J. L. et al. (1996) *Rethinking innateness. A connectionist perspective on development*. Cambridge/Mass.: MIT Press
- Elsen, H. (1991) *Erstspracherwerb. Der Erwerb des deutschen Lautsystems*. Wiesbaden: DUV
- Engel, A. K., König, P. & Singer, W. (1993) Bildung repräsentationaler Zustände im Gehirn. *Spektrum der Wissenschaft* 9/1993, 42–47

- Engelkamp, J. & Rummer, R. (1999) Die Architektur des mentalen Lexikons. In: Friederici, A. D. (Hg.), 155–201
- Fletcher, P. & MacWhinney, B. (1995) *The handbook of child language*. Oxford, Cambridge/Mass.: Blackwell
- Fodor, J. A. (1983) *The modularity of mind. An essay on faculty psychology*. Cambridge/Mass.: MIT Press
- Fodor, J. A. (1998) *Concepts. Where cognitive science went wrong*. Oxford: Clarendon Press
- Fodor, J. A. (2000) *The mind doesn't work that way. The scope and limits of computational psychology*. Cambridge/Mass., London: MIT Press
- Frauenfelder, U. H. & Floccia, C. (1999) Das Erkennen gesprochener Wörter. In: Friederici, A. D. (Hg.), 1–48
- Friederici, A. D. (1999 Hg.) *Sprachrezeption*. Göttingen u. a.: Hogrefe
- Gerstner, W. (1999) Spiking neurons. In: Maass, W. & Bishop, C. (eds.), 3–53
- Goebel, R. & Indefrey, P. (2000) A recurrent network with short-term memory capacity learning the German -s plural. In: Broeder, P. & Murre, J. (eds.), 177–200
- Goldsmith, J. A. (1995 ed.) *The handbook of phonological theory*. Oxford: Blackwell
- Gopnik, M. (1997 ed.) *The inheritance and innateness of grammars*. New York, Oxford: Oxford University Press
- Grainger, J. & Jacobs, A. M. (1998 eds.) *Localist connectionist approaches to human cognition*. Mahwah/NJ: Lawrence Erlbaum Associates
- Grimm, H. (2000 Hg.) *Sprachentwicklung*. Göttingen u. a.: Hogrefe
- Grimshaw, J. (1981) Form, function, and the language acquisition device. In: Baker, C. L. & McCarthy, J. J. (eds.), 165–182
- Gumperz, J. J. & Levinson, S. C. (1996) Introduction to part I. In: Gumperz, J. J. & Levinson, S. C. (eds.), 21–36
- Gumperz, J. J. & Levinson, S. C. (1996 eds.) *Rethinking linguistic relativity*. Cambridge: Cambridge University Press
- Hardcastle, W. J. & Laver, J. (1997 eds.) *The handbook of phonetic sciences*. Oxford: Blackwell
- Hebb, D. O. (1949) *The organization of behavior*. New York: Wiley
- Hennon, E., Hirsh-Pasek, K. & Golinkoff, R. M. (2000) Die besondere Reise vom Fötus zum spracherwerbenden Kind. In: Grimm, H. (Hg.), 41–103
- Hussy, W. (1987) Zur Steuerfunktion der Sprache beim Problemlösen. *Sprache & Kognition* 6, 14–22

- Kandel, E. R., Schwartz, J. H. & Jessell, T. M. (1996 Hg.) *Neurowissenschaften. Eine Einführung*. Heidelberg: Spektrum
- Katz, J. J. & Fodor, J. A. (1963) The structure of a semantic theory. *Language* 39, 170–210
- Kauschke, C. (2000) *Der Erwerb des frühkindlichen Lexikons. Eine empirische Studie zur Entwicklung des Wortschatzes im Deutschen*. Tübingen: Narr
- Klann-Delius, G. (1999) *Spracherwerb*. Stuttgart, Weimar: Metzler
- Kleiber, G. (1998) *Prototypensemantik. Eine Einführung*. 2. Aufl. Tübingen: Narr
- Kleiber, G. et al. (1999 Hg.) *Kognitive Linguistik und Neurowissenschaften. Referate des gleichnamigen EUCOR-Kolloquiums im Herbst 1998 in Freiburg*. Tübingen: Narr
- Klinke, R. & Silbernagl, S. (1996 Hg.) *Lehrbuch der Physiologie*. 2., neugestaltete u. überarb. Aufl. Stuttgart, New York: Thieme
- Kochendörfer, G. (1989) *Notation, Modellbildung, Simulation. Grundlagenprobleme kognitivistischer Darstellungen in der Linguistik*. Tübingen: Narr
- Kochendörfer, G. (1997) *Neuronale Modelle des Sprachverstehens*. Freiburg i. Br.: HochschulVerlag
- Kochendörfer, G. (1999a) *Gedächtnisformen in neuronalen Modellen der Sprachverarbeitung*. Tübingen: Narr
- Kochendörfer, G. (1999b) Silbe kontra Morphem. In: Kleiber, G. et al. (Hg.), 211–229
- Kochendörfer, G. (2000) *Simulation neuronaler Strukturen der Sprache*. Tübingen: Narr
- Kochendörfer, G. (2002) Wortfindung und Benennen im Rahmen neuronaler Modellierung. In: Schecker, M. (Hg.)
- Kosslyn, S. M. (1994) *Image and brain. The resolution of the imagery debate*. Cambridge/Mass.: MIT Press
- Kuhl, P. K. & Meltzoff, A. N. (1997) Evolution, nativism and learning in the development of language and speech. In: Gopnik, M. (ed.), 7–44
- Kuhn, T. S. (1999) *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*. 2., rev. und um das Postskriptum von 1969 erg. Aufl. Frankfurt a. M.: Suhrkamp
- Ladefoged, P. (1997) Linguistic phonetic descriptions. In: Hardcastle, W. J. & Laver, J. (eds.), 589–618
- Lakoff, G. (1987) *Women, fire and dangerous things. What categories reveal about the mind*. Chicago, London: University of Chicago Press
- Lehmann, B. (1998) *ROT ist nicht »rot« ist nicht [rot]. Eine Bilanz und Neuinterpretation der linguistischen Relativitätstheorie*. Tübingen: Narr

- Lenneberg, E. H. (1967) *Biological foundations of language development*. New York: Wiley
- Levelt, W. J. M. (1989) *Speaking. From intention to articulation*. Cambridge/Mass.: MIT Press
- Maass, W. (1999) Computing with spiking neurons. In: Maass, W. & Bishop, C. (eds.), 55–85
- Maass, W. & Bishop, C. (1999 eds.) *Pulsed neural networks*. Cambridge/Mass., London: MIT Press
- MacKay, D. G. (1987) *The organization of perception and action. A theory for language and other cognitive skills*. New York: Springer
- Macken, M. A. (1995) Phonological acquisition. In: Goldsmith, J. A. (ed.), 671–696
- MacWhinney, B. (1987 ed.) *Mechanisms of language acquisition*. Hillsdale/NJ: Lawrence Erlbaum Associates
- Marcus, G. F. (2000) Children's overregularization and its implications for cognition. In: Broeder, P. & Murre, J. (eds.), 154–176
- Marslen-Wilson, W. D. (1987) Functional parallelism in spoken word-recognition. *Cognition* 25, 71–102
- Marslen-Wilson, W. D. & Tyler, L. K. (1980) The temporal structure of spoken language understanding. *Cognition* 8, 1–71
- Marslen-Wilson, W. D. & Welsh, A. (1978) Processing interactions and lexical access during word recognition in continuous speech. *Cognitive Psychology* 10, 29–63
- McClelland, J. L. & Elman, J. L. (1986) Interactive processes in speech perception. The TRACE model. In: McClelland, J. L. & Rumelhart, D. E., 58–121
- McClelland, J. L. & Rumelhart, D. E. (1986) *Parallel distributed processing. Explorations in the microstructure of cognition. Vol. 2: Psychological and biological models*. Cambridge/Mass.: MIT Press
- Morgan, J. L. & Demuth, K. (1996 eds.) *Signal to Syntax. Bootstrapping from speech to grammar in early acquisition*. Mahwah/NJ: Lawrence Erlbaum Associates
- Mussen, P. H. (1960 ed.) *Handbook of research methods in child development*. New York: Wiley
- Oerter, R. & Dreher, M. (1998) Entwicklung des Problemlösens. In: Oerter, R. & Montada, L. (Hg.), 561–621
- Oerter, R. & Montada, L. (1998 Hg.) *Entwicklungspsychologie*. 4. korr. Aufl. Weinheim: Psychologie-Verlags-Union
- O'Grady, W. (1999) The acquisition of syntactic representations. A general nativist approach. In: Ritchie, W. C. & Bhatia, T. K. (eds.), 157–193

- Penner, Z. (2000) Phonologische Entwicklung. Eine Übersicht. In: Grimm, H. (Hg.), 105–139
- Pinker, S. (1982) A theory of the acquisition of lexical interpretive grammars. In: Bresnan, J. (ed.), 655–762
- Pinker, S. (1984) *Language learnability and language development*. Cambridge/Mass.: Harvard University Press
- Pinker, S. (1987) The bootstrapping problem in language acquisition. In: MacWhinney, B. (ed.), 399–441
- Pinker, S. (1989) *Learnability and cognition. The acquisition of argument structure*. Cambridge/ Mass.: MIT Press
- Pinker, S. & Prince, A. (1988) On language and connectionism. Analysis of a parallel distributed processing model of language acquisition. *Cognition* 28, 73–193
- Plunkett, K. (1995) Connectionist approaches to language acquisition. In: Fletcher, P. & MacWhinney, B. (eds.), 36–72
- Plunkett, K. & Elman, J. L. (1997) *Exercises in rethinking innateness. A handbook for connectionist simulations*. Cambridge/Mass.: MIT Press
- Plunkett, K. & Marchman, V. (1993) From rote learning to system building. Acquiring verb morphology in children and connectionist nets. *Cognition* 48, 21–69
- Ritchie, W. C. & Bhatia, T. K. (1999 eds.) *Handbook of child language acquisition*. San Diego/Calif.: Academic Press
- Roelofs, A. (1997) Syllabification in speech production. Evaluation of WEAVER. *Language and Cognitive Processes* 12, 657–693
- Rosch, E. (1975) Cognitive representations of semantic categories. *Journal of Experimental Psychology. General* 104, 192–233
- Rosch, E. & Mervis, C. (1975) Family resemblances: studies in the internal structure of categories. *Cognitive Psychology* 7, 573–605
- Roth, G. (1997) *Das Gehirn und seine Wirklichkeit. Kognitive Neurobiologie und ihre philosophischen Konsequenzen*. Frankfurt a. M.: Suhrkamp
- Roth, T. (1987) Erfolg bei der Bearbeitung komplexer Probleme und linguistische Merkmale des Lauten Denkens. *Sprache & Kognition* 6, 208–220
- Rumelhart, D. E. & McClelland, J. L. (1986) *Parallel distributed processing. Explorations in the microstructure of cognition. Vol. 1: Foundations*. Cambridge/Mass.: MIT Press
- Rumelhart, D. E. & McClelland, J. L. (1986a) On learning the past tenses of English verbs. In: McClelland, J. L. & Rumelhart, D. E., 216–271
- Saussure, F. de (1967) *Grundfragen der allgemeinen Sprachwissenschaft. Hg. v. Charles Bally [...]* 2. Aufl. mit neuem Register. Berlin: de Gruyter

- Schade, U. (1992) *Konnektionismus. Zur Modellierung der Sprachproduktion*. Opladen: Westdeutscher Verlag
- Schade, U. (1999) *Konnektionistische Sprachproduktion*. Wiesbaden: DUV
- Schecker, M. (2002 Hg.) *Wortfindung und Wortfindungsstörungen*. Tübingen: Narr
- Schmidt, R. F. (1995 Hg.) *Neuro- und Sinnesphysiologie*. 2., korr. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer
- Schmidt, R. F. & Thews, G. (1985 Hg.) *Physiologie des Menschen*. 22., korr. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer
- Schmidt, R. F., Thews, G. & Lang, F. (2000 Hg.) *Physiologie des Menschen*. 28., korr. u. aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer
- Sharkey, N., Sharkey, A. & Jackson, S. (2000) Are SRNs sufficient for modelling language acquisition? In: Broeder, P. & Murre, J. (eds.), 33–54
- Siskind, J. M. (2000) Learning word-to-meaning mappings. In: Broeder, P. & Murre, J. (eds.), 121–153
- Szagan, G. (1996) *Sprachentwicklung beim Kind*. 6., vollst. überarb. Aufl. Weinheim: Beltz, Psychologie-Verlags-Union.
- Taylor, J. R. (1995) *Linguistic categorization. Prototypes in linguistic theory*. 2. ed. Oxford: Clarendon Press
- Tesnière, L. (1959) *Éléments de syntaxe structurale*. Paris: Klincksieck
- Weinert, S. (2000) Beziehungen zwischen Sprach- und Denkentwicklung. In: Grimm, H. (Hg.), 311–361
- Wexler, K. (1999) Maturation and growth of grammar. In: Ritchie, W. C. & Bhatia, T. K. (eds.), 55–109
- Whorf, B. L. (1997) *Sprache, Denken, Wirklichkeit. Beiträge zur Metalinguistik und Sprachphilosophie*. 21. Aufl. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt
- Wygotski, L. S. (1993) *Denken und Sprechen*. Frankfurt a. M.: Fischer-Taschenbuch-Verlag

Index

- Abnahmrate der Zellplastizität
61
- Abnahmrate des EPSP 21
- Abstraktionsprozeß 46, 54, 65
- Aitchison, J. 55
- Aktionspotential 21
- Allen, J. 128
- Allophon(e) 160
- angeborene Ideen 69, 70, 79, 86,
100, 114, 115, 117, 139,
186
- Aphasie 108
- Arbitrarität 89, 91, 179
- Argumente 62
- Artikulationsorgane 189
- Bartl, C. 177
- Bartl-Storck, C. 177
- Begriffshierarchien 107–114, 141,
143
- Benennen 108
- Berko, J. 82
- Bernhardt, B. H. 86
- Betriebssysteme 9, 193
- Bhatia, T. K. 14
- Bierwisch, M. 91
- bildgebende Verfahren 65
- Bishop, C. 15
- Blevins, J. 157
- Bloom, P. 63, 148
- Bootstrapping 123–127, 175, 186,
190
- Broeder, P. 14
- Browman, C. 87
- Brown, R. 82
- Burri, A. 174
- Chaos 63–66
- Chomsky, N. 13–15, 69, 73, 86,
173, 187
- Clark, A. 177
- Cluster 143, 146–148
- Deffner, G. 177
- Demenz 108
- Demuth, K. 144
- Denken 173–181
- Diphthonge, 68
- Dominey, P. F. 18
- Doppelwellentheorie 60, 151, 152
- Dörner, D. 177
- Dreher, M. 46
- Dresher, B. E. 84
- Druckausgabe 201
- E-Mail-Adresse 9
- Einfachheitsbewertung 191
- Eingabe, externe 23
- Eingabedatei 200
- Einwortsätze 144–154, 191

- Einzelimpulskodierung 37, 38, 68–71, 86, 123
 Elementarschaltung 120, 134
 Ellis, R. 98
 Elman, J. L. 18, 169
 Elsen, H. 82, 121
 Endelement(e) 134, 136, 168, 188, 189
 Endlosschleife(n) 109–111, 113, 159
 Engel, A. K. 37
 Engelkamp, J. 115
 Epilepsie 110
 EPSP 21, 184
 ermöglichende Strukturen 151
 Ersatzwahrnehmung 58
 Erwartungspotential(e) 92–94, 99, 130, 131, 134
 Exemplarqualität 56

 Faltung 50, 51, 64, 185
 Fehlermeldungen 201
 Fis-Phänomen 82–85
 Fixations-Zeitfenster 44, 96, 101
 Floccia, C. 90, 98, 157
 Fodor, J. A. 39, 174, 175, 186
 Frauenfelder, U. H. 90, 98, 157
 Frequenzargument 35–38, 68
 Frequenzkodierung 35–38, 68, 76, 80
 Funktionsmodell 17, 18

 Garden-path-Phänomene 132
 Gedächtnis, 107, 113, 114, 131, 184, 189
 Gehirn
 Rolle in der Spracherwerbsforschung 7, 11–17
 Generalisierung 65, 153, 191

 Generativismus 11, 13, 15, 66, 69, 73, 86, 123, 126, 127, 187, 190, 191
 Gerstner, W. 37
 Gestenphonologie *siehe* Phonologie, artikulatorische
 Goebel, R. 169
 Goldstein, L. 87
 Golinkoff, R. M. 11
 Grainger, J. 34
 Grimm, H. 14
 Grimshaw, J. 123
 Großmutterzellen-Theorie 31, 37–39, 55, 58, 61, 68, 84, 86, 90, 91, 114, 123, 132, 133, 158, 175, 184
 Gumperz, J. J., 178

 Halle, M. 69, 73, 86
 Hebb, D. O. 41
 Hebb-Regel 41
 Hennon, E. 11
 Hierarchiebildung 31, 49, 85, 86, 185, 190, 191
 Hippokampus 43
 Hirsh-Pasek, K. 11
 Humphreys, G. W. 98
 Hussy, W. 177

 Indefrey, P. 169
 Informationstransport 38, 39
 inneres Sprechen 176
 Installation 9
 Instanzen
 Definition 40
 Instanzenbildung 38–47, 55, 56, 59, 62, 64, 65, 69, 75, 84, 96, 132, 135, 139, 151, 184, 190

- für Merkmalsbündel 43–48
- Intensitätskodierung 35, 69, 86;
 - siehe* auch Frequenzkodierung
- IPSP 21
- Jackson, S. 14
- Jacobs, A. M. 34
- Jessell, T. M. 32, 43

- Kandel, E. R. 32, 43
- Kasusrollen 62
- Kategorisierung 29, 54–57, 107, 184
- Katz, J. J. 186
- Kauschke, C. 148
- Klann-Delius, G. 191
- Kleiber, G. 55
- Klinke, R. 50
- Kodierungsfunktion 177
- Kohärenzkontrolle 107, 152, 185
- Kohortenmodell 107
- Kommandozeilenparameter *siehe* Modusparameter
- Kongruenz 153
- König, P. 37
- Konnektionismus 14–18, 22, 30, 34, 37, 69, 107, 169, 170, 175
- Konstituente(n) 132–134
- Kontextfilter 160, 167
- Konzeptbildung 46, 57, 64, 69, 102, 177, 180, 184
 - mehrschrittige 48–53, 108
 - Verlauf 46–54
- Konzepte 29–66, 175, 178, 179
 - abstrakte 39, 63
 - Definition 29
 - relationale 61–63
 - Repräsentation 29–38
 - syntaktische 144
- Konzepthierarchien 49, 50
- Kortex
 - Schichtung 49, 50
 - visueller 58
- Kosslyn, S. M. 58
- Kreativität 187–189
- Kuhn, T. S. 8

- Lakoff, G. 55
- Lallphase 69, 78–82, 126
- Länge
 - phonologische 98–102, 134, 135
 - syntaktische 132–136, 144, 167
- Leistungsmodell 17, 18, 20
- Lenneberg, E. H. 118, 190
- Lernparameter 21, 94
- Lernrate, Lernschritt 41, 44, 47, 55, 56
- Lernstop 42, 43
- Levelt, W. J. M. 58, 91, 118
- Levinson, S. C. 178
- Lexikon 89–123, 133, 134, 137, 139, 142, 145, 146, 148, 150, 151, 161, 164
 - Ausdrucksseiten 67, 69, 78, 84, 86, 92–98, 113, 145, 147, 179, 185, 190
 - Inhaltsseiten 102–107, 139–141, 158
 - morphologisches 165–169
- Logfile 201
- lokalistisch *siehe* Großmutterzellen-Theorie

- Maass, W. 15, 37

- Macken, M. A. 83
 Marchman, V. 169
 Marcus, G. F. 171
 Marslen-Wilson, W. D. 90, 107
 McClelland, J. L. 69, 169, 171
 Mehrdeutigkeit 71, 106, 166, 167
 Membranpotential 21
 Merkmale 43
 Mervis, C. 55
 Mikrofeatures 31
 Modell(e) *siehe* Modellbildung
 Modellbildung 7, 15–20, 183
 Modellneuron 20–23
 Parameter 21
 Modularität 174, 176
 Modusparameter 194–196
 Monitoring 58, 118
 Morgan, J. L. 144
 Morphem(e) 155, 156, 161–171,
 191
 Müller, G. 177
 Murre, J. 14
 Myelinisierung 21

 Nachpotentiale 21
 Netzdefinition 196–199
 Neurobiologie 20–27
 Neurolinguistik, 7
 Neuron *siehe* Modellneuron
 Neuropsychologie *siehe* Neurolin-
 guistik
 Neurotransmitter 21
 Neustart 201
 Nominalphrase 153

 Oerter, R. 46

 Parallelverarbeitung 34, 71
 Parameterfixierung 125

 Paraphrasie 108
 Parsingstrategien 128–132
 Penner, Z. 86
 PET 58
 Phonem(e) 29, 35, 36, 67–69, 71,
 74–80, 84–86, 90, 133,
 155, 176, 191
 Phoneminstanzen 69, 80, 84, 92,
 94, 103, 158
 Phonemsequenzen 90, 92–98
 Phonetik, Phonologie 67–87, 125,
 127, 170
 Abgrenzung 67
 Phonologie
 artikulatorische 87
 generative 69, 73, 86
 nicht-lineare 86
 Phrasenstrukturgrammatik 187,
 189
 Piaget, J. 176
 Pinker, S. 123, 170
 Plunkett, K. 169
 Potential
 exzitatorisches postsynapti-
 sches 21
 inhibitorisches postsynapti-
 sches 21
 Prädikat 62
 prädiktives System 59, 61, 116,
 151–153, 185; *siehe*
 auch Top-down-Verbin-
 dungen
 Präteritum 170
 Präzisierbarkeitsforderung 18,
 19, 98, 107
 Prince, A. 170
 Problemlösen 176, 177
 Produktion 78, 80, 81, 114–121,
 136, 137, 144, 151–153,

- 169, 170, 181, 185, 190,
191
- Produktionstakt 152
- Produktionstaktsystem 117, 118
- Propositionen 62
- Prosodie 144–146, 149
- Prototypizität 54–57, 64, 71, 77,
86, 151, 184, 185
- Pseudosilbe(n) 159, 160
- Ramus, F. 18
- Redundanz 63–66, 69, 97, 121,
164, 177
- Refraktärphase 21
- Regeln 171
- rekurrente Netze 18
- Rekursivität 187
- Relativitätsprinzip 178–181
- Reparaturen 132
- Repräsentation
 lokalistische 30–33, 38, 44,
 56, 57, 65
 verteilte 30, 31, 34, 38
- Revisionsprozess 54, 84, 85, 121–
122
- Ritchie, W. C. 14
- Roelofs, A. 156
- Rosch, E. 55
- Roth, T. 177
- Rückspiegelung, Rückmeldung 58,
80, 82, 115, 118, 152
- Ruhepotential 21
- Rumelhart, D. E. 69, 169, 171
- Rummer, R. 115
- Sapir, E. 179
- Saussure, F. de 12, 29, 89, 91, 173,
179
- Schade, U. 34, 156
- Schmidt, R. F. 50
- Schreuder R. 91
- Schwartz, J. H. 32, 43
- Schwellenwert 21
- Segmentierung 155–171, 191
- Semantik 57, 91, 107, 175, 179,
186–187
- semantische Netze 62, 108
- Sequentialität 67, 185
- Sequenzanfänge 94, 104, 107
- Sequenzbildung 90, 92, 93, 101,
135, 149, 151, 184, 190
- Sequenzverbindungen 62, 112,
149, 157, 158, 160
- Sharkey, A. *und* N. 14
- Signallaufzeit 21, 110
- Silbe(n) 68, 69, 80, 86, 90, 155–
159, 160
- Silbernagl, S. 50
- Simulationsprogramm 193–201
- Simulationsstop 200, 201
- Simulationstechnik 7, 16, 17, 20–
27
- Simulationsverlauf 200
- Singer, W. 37
- Siskind, J. M. 103
- Spontanaktivität 23, 27
- Stabilisatorfunktion 177
- Stapelspeicher 189
- Startzelle 94–96, 150
- Stemberger, J. P. 86
- Steuerungsfunktion 177
- Synapsengewicht 21
 maximales 113
- Syntax 123–154, 168
- Systemvoraussetzungen 9, 193
- Szagun, G. 46
- Taktung 22

- Taylor, J. R. 55
 Tesnière, L. 187
 Thews, G. 50
 Top-down-Verbindungen 39, 57–60, 62, 78, 79, 86, 117, 126, 151, 152, 185, 190
 Tyler, L. K. 107
 Typzellen 40
- Üben 80
 Überdiskriminierung 53
 Übergeneralisierung 53, 171
 Umkodierung 37, 71–73, 75, 76, 86
 Universalgrammatik 123, 127, 183–191
 Universalien 179, 183–191
 Underdeterminiertheit 187
- Valenz 153
 Verbalphrase 153
 Vergessen 54, 70, 71, 101, 119–122, 125, 131, 136, 167, 180, 190
 Versprecher 108
 Versuchs-Irrtums-Prozeß 79, 80, 86, 125, 126, 185, 190
 vocabulary spurt 148, 151
 Vorstellungen 57–61, 114, 180
 Vorwärtshemmung 93, 94
- Wahrnehmungsprobleme 122
 Watchdog 80, 81, 125, 139, 150, 152
 Website 9
 Weisgerber, L. 179
 Welsh, A. 107
 Wexler, K. 19
 Whorf, B. L. 173, 178–181
- Wiederholungsschleife(n) 100–102, 119, 134, 135, 188, 190
 Wissenschaftstheorie 17–20
 Wortart(en) 137–151, 153, 187, 191
 Wortfragmente 97, 122
 Wygotski, L. S. 176
- Zeichenmodell, 89, 90
 Zeitdarstellung *siehe* Taktung
 Zelle(n)
 instanzenbildende 59, 96, 184
 ODER- 59, 62, 102, 103, 105, 109, 111–114, 135, 141, 143, 158, 159, 161–163, 165, 179, 185, 190
 prädiktive 59, 116, 117, 119
 sequenzenbildende 95–97, 99, 102, 112, 114, 117, 119, 134, 184
 Typen 120, 190
 Zellplastizität 43, 61
 Zunahmerate der Zellplastizität 43, 61
 Zustandsausgabe 201
 Zweiwortsätze 144, 147–154, 156, 191