



## Anna, Anmut, Anker: Die Struktur der Wörter im Gehirn

Horst H. Müller

Fakultät für Linguistik und Literaturwissenschaft

Wie kommt es im menschlichen Gehirn zur Sprachfähigkeit? Welche Teilprozesse lassen sich feststellen? Wie ist die enorme Geschwindigkeit der Sprachverarbeitung zu erklären? Ergebnisse der experimentellen Neurolinguistik haben während der letzten Jahre einige Antworten auf solche Fragen erbringen können. Beispielsweise zur Binnenstruktur des Lexikons und der kortikalen Repräsentation der Wörter (also ihres „Sitzes“ in der Hirnrinde, dem Kortex). Betrachtet man die Ergebnisse der Hirnforschung, so scheint die seit der Antike belegte Einteilung der Wörter in Wortarten (z. B. Verben, Nomen, Eigennamen) durchaus über eine in der Hirnfunktion verankerte „kognitive Realität“ zu verfügen. Hinsichtlich der Binnenstruktur der Wortarten – für die Verben beispielsweise die weitere Unterteilung in Handlungsverben, Zustandsverben usw. – ergeben sich nach neurolinguistischen Befunden jedoch Veränderungen. Auch der in wenigen Zehntelsekunden ablaufende Verstehensprozess von konkreten und abstrakten Nomen sowie von Eigennamen ist nun etwas besser bekannt.



Abbildung 1: Das EEG-Labor der Arbeitsgruppe Experimentelle Neurolinguistik: Vorbereitung der Versuchsperson für ein EEG-Experiment. Die EEG-Elektroden werden positioniert und mit einem leitenden Gel gefüllt, um so den Kontakt zur Hautoberfläche des Kopfes zu gewährleisten. Nach der anschließenden Überprüfung und Angleichung der Hautwiderstandswerte findet das eigentliche Experiment in einer abgeschirmten Versuchskammer statt (s. Abbildung 2).

### ■ Was ist experimentelle Neurolinguistik?

Bei der experimentellen Neurolinguistik handelt es sich um ein fächerübergreifendes Forschungsgebiet aus Teilen der Linguistik, Sprachphilosophie, Neurobiologie, Neuropsychologie und Neuroinformatik. Einzelne Prozesse der Sprachverarbeitung werden hier mit elektrophysiologischen bzw. bildgebenden Verfahren der Neurowissenschaft untersucht, um die

zugrunde liegenden hirnhysiologischen Prozesse zu analysieren. Zum Einsatz kommen Techniken aus der so genannten „Cognitive Neuroscience“: Beispielsweise werden bei der Elektroenzephalographie (EEG) Elektroden auf die Kopfhaut aufgesetzt, um die elektrische Aktivität der darunter liegenden Neuronen abzuleiten (siehe Abbildungen 1 und 2). Bei der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) wird der Kopf der Versuchsperson in einem künst-

Abbildung 2: Während des Experimentes zur Sprachverarbeitung sitzt die Versuchsperson in einer schallreduzierten und elektrisch abgeschirmten Versuchskammer (links). Dort hört die untersuchte Person einige Hundert Sätze oder Wörter, unterbrochen von kurzen Ruhepausen. Während der Wahrnehmung im Gehirn der Versuchsperson ablaufende Sprachverarbeitungsprozesse können anhand der nachfolgenden Analyse des EEG-Signals erfasst werden. Die Durchführung eines solchen Experimentes ist in etwa drei Stunden erledigt. Die vorherige Planung, die Bereitstellung der Stimuli sowie vor allem die nachfolgende Analyse der erhobenen Daten beanspruchen mehrmonatige Bearbeitungszeiten.



lichen Magnetfeld untersucht, um anhand des Sauerstoffverbrauchs der Nervenzellen auf die Hirnaktivität während der Sprachverarbeitung zu schließen (siehe Abbildung 3).

Mit modernen computergestützten Analyseverfahren können z. B. aus dem EEG-Signal bedeutsame Informationen ermittelt werden: Bei der Analyse des Ereigniskorrelierten Potentials (ERP) wird die Gesamtheit der auf ein bestimmtes Ereignis zurückgehenden Nervenaktivitäten („neuronale Summenaktivität“) ermittelt. Im Unterschied dazu wird bei der Spektralanalyse das EEG-Signal in einzelne Frequenzkomponenten aufgespalten, so dass eine Transformation der Signale vom Zeitbereich in den Frequenzbereich erfolgt. Die Kohärenzanalyse erlaubt somit eine Beurteilung der Zunahme oder Abnahme von Synchronisationsprozessen zweier Gehirnareale im jeweiligen Frequenzband während der Wahrnehmung eines Satzes. Die Ergebnisse solcher Untersuchungen liefern Antworten zu Fragen nach der Funktionsweise von Sprache im Gehirn. Einige der bislang unbeantworteten Forschungsfragen der Neurolinguistik zeigt die folgende Aufstellung:

- Ist die Sprachfunktion überhaupt im Gehirn zu lokalisieren oder handelt es sich vielmehr um variable neuronale Netzwerke?
- Falls die Sprache verortet werden kann: Wo und wie ist Sprache im Gehirn lokalisiert?
- Wie ist das „Lexikon“ (also der gespeicherte Wortschatz) in der Hirnrinde organisiert und aufgebaut? Werden z. B. konkrete und abstrakte Nomen an getrennten Orten verarbeitet?

- Teilen sich Muttersprache und später erlernte Fremdsprachen die gleichen Hirnbereiche oder nutzt der kindliche Mutterspracherwerb ganz besondere Hirnbereiche, die nur in frühester Kindheit zur Verfügung stehen?

#### ■ Wörter im Gehirn

Aus neurolinguistischer Sicht handelt es sich beim Verstehen sprachlicher Kommunikation um ein gleichzeitiges Zusammenspiel von sprachspezifischen und sprachunspezifischen Kognitionsprozessen, deren neuronales Substrat in verteilten, kortikalen und subkortikalen Gehirnregionen beider Hemisphären liegt. Weiterhin sieht es so aus, als ob es keine ausschließlich sprachspezifischen Hirnbereiche gibt. Die Befunde der Cognitive Neuroscience legen vielmehr nahe, dass die in „cell assemblies“ organisierten kortikalen Neuronen zu unterschiedlichen Zeitpunkten in unterschiedlichen, ggf. auch nichtsprachlichen Netzwerken aktiv sein können. Dennoch lassen sich Teilleistungen der Sprachfunktion isolieren und gewisse Ordnungsprinzipien feststellen.

Angesichts der hohen Geschwindigkeit, mit der wir Sprache verstehen und auf Gehörtes angemessen antworten können, müssen wir von einem Ordnungssystem der Wörter im Kopf ausgehen. Anders wäre ein so schneller Zugriff auf die etwa 10.000 bis 50.000 Wörter im Gehirn eines Menschen nicht zu erklären. Doch wie sieht dieses Ordnungssystem aus? Durch Schriften belegt ist, dass bereits in der Antike Philosophen die Menge der Wörter in



Abbildung 3: Eine weitere wichtige Untersuchungstechnik zur Lokalisierung bestimmter Sprachfunktionen ist die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT). Das Bild zeigt die Vorbereitung einer Versuchsperson im MRT (Epilepsiezentrum Bethel) zur Untersuchung der Verarbeitung von Eigennamen, konkreten und abstrakten Nomen. Nach dem Anbringen der Gradientenspule wird die Versuchsperson in den Scanner gefahren und hört die sprachlichen Stimuli per Kopfhörer. Bereits wenige Minuten nach Beginn der Untersuchung erscheinen die anatomischen Details des Gehirns auf dem Monitor im benachbarten Kontrollraum. Nach einem weiteren Test ist bereits auch sichtbar, ob die Sprachfunktion der jeweiligen Person überwiegend in der linken (häufig) oder rechten Gehirnhälfte (selten) angesiedelt ist. Die umfangreiche Auswertung über alle Versuchspersonen findet dann erst nach Abschluss der Datenaufnahme statt.

unterschiedliche Wortarten eingeteilt haben. Aber entspricht diese seither nur unwesentlich veränderte Einteilung in Wortarten auch dem Ordnungssystem des Gehirns oder handelt es sich dabei lediglich um eine noch immer alltagstaugliche, jedoch in kognitiver Hinsicht realitätsferne „Erfindung“ der Antike? Um nur ein Beispiel zu nennen: In der Gruppe der Nomen wird in der Linguistik vor allem die Sonderstellung der Eigennamen diskutiert. Diese Diskussion ist bereits viele hundert Jahre alt, und es ist bis jetzt unklar, ob 1. die Eigennamen (Nomina propria) in der Kognition als eigenständige Gruppe existieren und 2. was dann genau zur Gruppe der Eigennamen zu zählen ist (z.B. Vornamen, Ortsnamen, Warennamen usw.).

Neben dieser Fragestellung bilden weitere Arbeitsschwerpunkte der Bielefelder Arbeitsgruppe Untersuchungen zur Verarbeitung von komplexeren Äußerungen, zum Verstehen multimodaler Kommunikation und zur Struktur des zweisprachigen Gehirns.

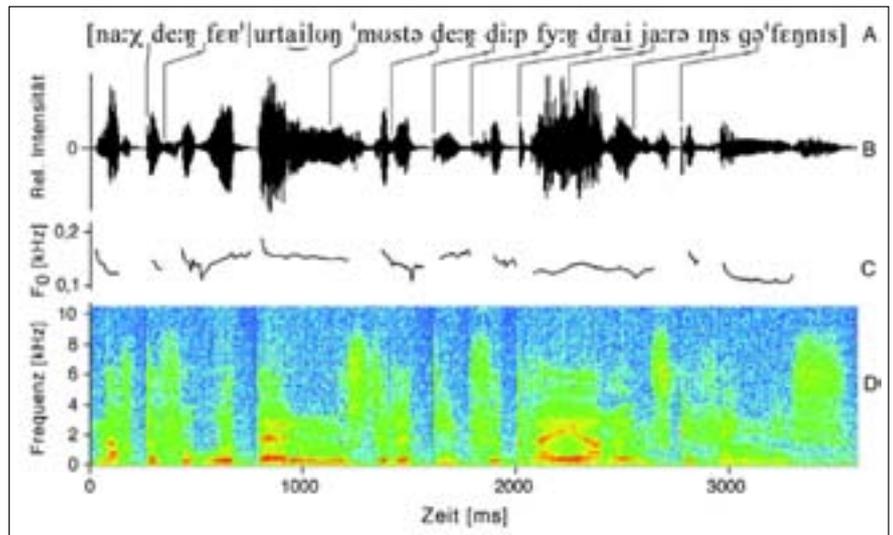
■ **Die antike Wortarteneinteilung: Kompatibel mit neuesten neurolinguistischen Erkenntnissen**

Im neurolinguistischen Experiment wird den Versuchspersonen eine große Anzahl unterschiedlicher Wörter zufallsverteilt präsentiert, während die Gehirntätigkeit mittels Elektroenzephalographie (EEG)

oder funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) erfasst wird. Von den vielen theoretisch möglichen Einteilungen der Wörter in Gruppen gehen einige mit signifikanten Unterschieden in der Hirntätigkeit einher. Kann eine bestimmte Gruppierung der Wörter anhand eines physiologischen Maßes belegt werden, gilt das als ein starker Beweis für die kognitive Realität dieser Einteilung. Jüngste Magnetresonanztomographie-Experimente in Zusammenarbeit mit Dr. Friedrich Wörmann (MRT des Epilepsiezentrum Bethel) zeigen, dass die Verarbeitung von konkreten Nomen (z. B. „Anker“) und abstrakten Nomen (z. B. „Anmut“) mit unterschiedlicher Hirnaktivität einhergeht. Anhand der Analyse des ereigniskorrelierten Potentials (ERP) im Elektroenzephalogramm (EEG) konnte gezeigt werden, dass sich innerhalb der Gruppe der konkreten Nomen die Verarbeitung von Eigennamen (z. B. „Anna“) signifikant von der der Gattungsbezeichnungen (z. B. „Anker“) unterscheidet. Mittlerweile sind diese Verarbeitungsunterschiede in der Arbeitsgruppe „Experimentelle Neurolinguistik“ auch in unterschiedlichen psycholinguistischen Experimenten belegt worden, bei denen die Versuchspersonen Eigennamen möglichst schnell als solche erkennen (Reaktionszeitmessung) oder lediglich anhand von Wortbruchstücken unterscheiden sollen (Gating-Paradigma). Da die ermittelten Unterschiede nicht nur in anderen Sprachen, sondern auch bei natürlich-

Abbildung 4: Die in den Sprachverarbeitungs-Experimenten verwendeten Stimuli müssen nach psycholinguistischen Kriterien ausgesucht sein – beispielsweise Silbenlänge, die Verwendungshäufigkeit (Wortfrequenz) oder die Bildhaftigkeit der jeweiligen Wörter. Auch Merkmale wie etwa Anfangsphonem oder die Artikulationsdauer bzw. -intensität müssen kontrolliert werden. Hier dargestellt für den Stimulussatz Nach der Verurteilung musste der Dieb für drei Jahre ins Gefängnis ist die phonetische Umschreibung (A), der Amplitudenverlauf in der Intensitätsdomäne (B), der Verlauf der Grundfrequenzkontur ( $F_0$ -Kontur) (C) und eine Zeit-Frequenzmatrix (D).

(aus Müller 2002, Arbeitsbuch)



sprachlicher und schriftsprachlicher Präsentation auftreten, kann durchaus ein für alle Menschen allgemein gültiger Befund vermutet werden: Prototypische Eigennamen bilden tatsächlich eine besondere Gruppe (Nomina propria) innerhalb der Nomen. Die zumindest seit der Antike theoretisch begründete Gruppe der Eigennamen verfügt somit grundsätzlich über eine neurokognitive Realität.

#### ■ Sonderstellung der Eigennamen gilt international

In Zusammenarbeit mit Prof. Marta Kutas (University of California at San Diego, USA) wurde im ERP-Experiment festgestellt, dass Eigennamen bereits 120 ms nach Wortbeginn zu einer typischen Hirnaktivität führen. Mit einem spektralanalytischen Verfahren (EEG-Kohärenzanalyse), die die synchrone Zusammenarbeit von unterschiedlichen Gehirnregionen in bestimmten Frequenzbereichen erfasst, zeigten sich weitere Besonderheiten bei der Wahrnehmung von Eigennamen. In Zusammenarbeit mit Dr. Sabine Weiss und Prof. Peter Rappelsberger (Hirnforschungszentrum der Medizinischen Universität Wien) wurde festgestellt, dass die Verarbeitung von Eigennamen im Unterschied zu der von Gattungsbezeichnungen mit einer zusätzlichen, rechtshemisphärischen Neuronenaktivität in einem Frequenzband einhergeht. Diese rechtshemisphärische Aktivität passt gut zu jüngsten Befunden anderer Arbeitsgruppen, die mittels Magnetresonanztomographie für die Gesichtswahrnehmung und die Personenerkennung ebenfalls in der rechten Hemisphäre einen spezifischen Verarbeitungsort ausmachen konnten. Um diesen

Befund für die Verarbeitung von Eigennamen genauer zu untersuchen, haben die Bielefelder Forscher in Zusammenarbeit mit Prof. Ho-Ling Liu (Chang-Gung University, Taiwan) und Prof. Chia-Ying Lee (Academia Sinica, Taiwan) eine fMRT-Untersuchung zur Verarbeitung von Eigennamen mit Mandarin-Sprechern durchgeführt. Parallel dazu wurde – um zu allgemeineren Aussagen zu gelangen – gemeinsam mit Dr. Friedrich Wörmann (Epilepsiezentrum Bethel) ein vergleichbares Experiment mit deutschen Muttersprachlern durchgeführt. Auch die bislang vorliegenden Ergebnisse dieser Studien belegen die Verarbeitungsunterschiede zwischen Gattungsbezeichnungen und Eigennamen.

In die bislang sich vor allem durch eine Hypothesenvielfalt auszeichnende Diskussion zur Organisation des Lexikons können nun weitere empirische Daten einfließen: Die bisherigen Befunde der Bielefelder Forscher unterstützen einerseits die Sonderstellung der Eigennamen, liefern andererseits jedoch auch Hinweise für die darüber hinaus strittige Frage, was genau zu den Eigennamen gezählt werden muss. Aus neurolinguistischer Sicht gehören zur Gruppe der Eigennamen z. B. Personenvornamen und bestimmte Ortsnamen, nicht jedoch Warennamen, die zu einem abweichenden Zeitpunkt und mit einem geringfügig anderen Aktivitätsmuster der Hirnrinde verarbeitet werden. Gemeinsam mit hier nicht erwähnten Ergebnissen zu anderen Wortgruppen (z. B. Verben), liefern neurolinguistische Untersuchungen Hinweise auf die Organisationsprinzipien der Wörter im Gehirn, die für die zukünftige Umsetzung (Implementierung) von Sprachverarbeitungsprozessen in Computern notwendig sind. Gegenwärtig

tig werden im Bereich der Cognitive Neuroscience große Fortschritte bei der Analyse der Sprachfunktion im Gehirn erreicht. Eine Ursache dafür liegt in der Verfügbarkeit neuartiger Techniken und Methoden der Neurowissenschaft. Allerdings werden durch diese Methoden enorme Datenmengen erzeugt, die erst seit der Verfügbarkeit von leistungsfähiger Hard- und Software ausgewertet werden können. Beispielsweise werden während eines ca. einstündigen EEG-Experiments mit 64 Ableit Elektroden etwa 250 Millionen Zahlenwerte erfasst, für die in nachfolgenden Analyseschritten aufwendige Berechnungen durchgeführt werden müssen (z.B. Fouriertransformationen und frequenzband-spezifische Kreuzkorrelationen). Einen weiteren Entwicklungsschub erfährt die Neurolinguistik gegenwärtig durch die neuartigen Analysemöglichkeiten der Neuroinformatik, da die großen Datenmengen mit nicht-linearen Analysemethoden (z.B. „Self-Organizing Maps“ oder „Support Vector Machines“) exploriert werden können. In Zusammenarbeit mit Prof. Helge Ritter (AG Neuroinformatik, Universität Bielefeld) werden solche Verfahren entwickelt und eingesetzt, um neuartige Sichtweisen auf die experimentellen Befunde zur Sprachfunktion zu erlangen.

#### ■ Die Zukunft: vielfältige praktische Anwendungsmöglichkeiten

Neurolinguistische Experimente sind nicht nur Grundlagenforschung zur Funktion des Gehirns. Erkenntnisse zur Physiologie der Sprachverarbeitung haben auch eine Bedeutung für anwendungsorientierte Bereiche der Sprachwissenschaft. Beispielsweise ermöglichen sie ein besseres Verständnis des kindlichen Erstspracherwerbs, aber auch des Zweitspracherwerbs bei Erwachsenen. Sie beeinflussen daher Theorien der Didaktik und das schulische Bemühen um die Verbesserung der Sprachleistung von Kindern oder den Erwerb von Fremdsprachen. Ein aktuelles Beispiel ist die Diskussion, ob Kinder eine Zweitsprache bereits im Kindergarten, in der Grundschule oder erst ab dem zehnten Lebensjahr erlernen sollen. Auch für die Klinische Linguistik und die Therapie des Sprachverlusts nach einer Hirnschädigung (Aphasie), die z.B. durch einen Schlaganfall ausgelöst werden kann, sind die neurokognitiven Grundlagen der Sprachfähigkeit von entscheidender Bedeutung. Das sprunghaft zunehmende Wissen über die

Sprachfunktion im Gehirn wird in der Zukunft große Veränderungen mit sich bringen, da diese Ergebnisse nicht nur zur weiteren Theoriebildung in der Linguistik, sondern auch zur Modellentwicklung und Simulation von Teilleistungen der Sprachverarbeitung innerhalb der Künstliche-Intelligenz-Forschung beitragen. Auch die Konstruktion von sprachverstehenden Computersystemen, die Äußerungen nicht nur per Mustererkennung identifizieren, sondern Sprache interpretieren können, wird durch das Verständnis des biologischen Vorbilds erleichtert werden.



*Horst M. Müller studierte an der Ruhr-Universität Bochum und an der Universität Bielefeld Biologie und Linguistik. Nach dem Diplom in Neurobiologie und dem M.A. in Linguistik promovierte er 1988 in Linguistik und 1993 in Neurobiologie. Nach der Habilitation im Bereich der Neurolinguistik 1997 ist er seit 2003 außerplanmäßiger Professor und lehrt im Fachbereich Klinische Linguistik bzw. Linguistik. Er ist Gründer der AG Experimentelle Neurolinguistik und arbeitet als Projektleiter im Sonderforschungsbereich 360 der Universität Bielefeld. Schwerpunkte seiner Arbeit liegen in den Bereichen Neurolinguistik, Cognitive Neuroscience und Evolution der Sprache.*