

DER LAUSCHER IM KOPF

Wo verarbeitet unser Gehirn die Elemente gehörter Sprache? Neuen Forschungen zufolge werden verschiedene Hirnregionen nacheinander aktiv – in einer präzise festgelegten zeitlichen Abfolge.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

VON ANGELA D. FRIEDERICI

Tan.« Das war die einzige Silbe, die der Mann noch sprechen konnte, als ihn Paul Broca (1824–1880) vor rund 140 Jahren untersuchte. Dabei war »Monsieur Tan« sehr wohl noch in der Lage, einfache Fragen zu verstehen. Er beantwortete sie, indem er seine »tans« unterschiedlich betonte. Als der Patient zwei Jahre später starb, zeigte die Autopsie, dass seine linke Hirnhälfte unten an der dritten Windung des Stirn-

hirns stark geschädigt war. Der französische Neurologe und Anthropologe betrachtete daher diese Region – noch heute wird sie ihm zu Ehren als Broca-Areal bezeichnet – als denjenigen Ort im Gehirn, an dem Sprache entsteht.

Einige Jahre später, 1874, beschrieb der Breslauer Neurologe Carl Wernicke (1848–1905) genau den umgekehrten Fall: Patienten, die zwar noch sprechen, aber Gesprochenes nicht mehr verstehen konnten. Bei den Betroffenen war die obere Windung des linken Schläfenlap-

pens geschädigt, weshalb diese Hirnregion fortan als die Region des Sprachverstehens galt (siehe Bild Seite 45).

Lange Zeit war diese Aufteilung der Sprachfunktionen auf das Broca- und das Wernicke-Areal allgemein akzeptiert, wobei bei fast allen Rechtshändern wie auch bei etwa zwei Drittel der Linkshänder nur die linke Gehirnhälfte an diesen Aufgaben beteiligt ist. Doch dann begannen Forscher zunehmend an diesem Konzept zu zweifeln, vor allem auf Grund detaillierter Untersuchungen von sprachgestörten Patienten mit Hirnschäden. Aber auch Experimente, in denen das elektrische Reizen unterschiedlicher Regionen der Großhirnrinde sehr spezifische Sprachstörungen hervorrief, widersprachen dieser Vorstellung. Allmählich kristallisierte sich heraus: Das Zwei-Areale-Modell ist viel zu einfach.

Stattdessen begannen Neurolinguisten, ein neues Modell zu entwerfen. Sprachfunktionen beschränken sich demzufolge nicht auf einige wenige, eng begrenzte Orte, sondern verteilen sich über einen beträchtlichen Teil der Großhirnrinde. Sogar einige unter dieser liegende Regionen scheinen für die Sprachfähigkeit von Bedeutung zu sein, so etwa der linke hintere Thalamus. Beim Sprechen wie auch beim Verstehen von Sprache dürften entsprechend komplizierte Netz-

GLOSSAR

Broca-Areal: Unterer Teil der dritten Windung im linken Stirnlappen der Großhirnrinde; ist zentral an der Erzeugung von Sprache beteiligt.

Lexikon: Die Gesamtheit der Wörter einer Sprache.

Prosodie: Die Betonungsmuster und Tonhöhenverläufe, welche die wörtliche Bedeutung modifizieren können – auch Sprachmelodie genannt. Sie kann das Gesagte charakterisieren, zum Beispiel ob es sich bei einem Satz um eine Aussage oder eine Frage handelt oder ob der Sprecher gerade traurig oder fröhlich ist.

Semantik: Die Bedeutungen, die mit Wörtern und Sätzen verknüpft sind.

Syntax: Alle zulässigen Kombinationen von Wörtern zu Phrasen und Sätzen, also das, was man gemeinhin unter Grammatik versteht.

Wernicke-Areal: Obere Windung des linken Schläfenlappens; ist zentral am Verstehen von Sprache beteiligt.

▷ werke verschiedener Teile des Gehirns aktiv werden. Die einzelnen Module sind dabei zum Teil auf bestimmte Aufgaben spezialisiert, etwa Verben zu bilden oder Gelesenes zu verstehen.

Besonders die rasante Entwicklung der modernen bildgebenden Verfahren erlaubt Forschern heute, der Hirnaktivität während einer kognitiven Aufgabe auf die Spur zu kommen. Mithilfe dieser neuen Techniken haben wir am Max-Planck-Institut für neuropsychologische Forschung in Leipzig in den letzten Jahren genauer untersucht, wo Sprache im Gehirn verarbeitet wird und wie die beteiligten Hirnareale zusammenarbeiten. Jetzt können wir ein Modell darüber aufstellen, was genau vom Eintreffen eines akustischen Inputs bis zur Interpretation des Gehörten im Gehirn geschieht.

Wir interessierten uns bei unseren Experimenten vor allem für folgende zwei Fragen:

▷ Welche Gehirnareale verarbeiten Syntax, Semantik und Prosodie (also Satzbau, Wortbedeutung und Satzmelodie; siehe Glossar Seite 43) gehörter Sprache?

▷ Wie spielen die verschiedenen Teilprozesse zeitlich zusammen?

Zunächst versuchten wir herauszufinden, wo im Gehirn Syntax und Semantik verarbeitet werden. Hierzu nutzten wir die so genannte funktionelle Kernspintomografie. Diese Methode registriert Aktivitäten von Nervenzellen über Veränderungen des Sauerstoffgehalts im Blut. Sie besitzt eine gute räumliche Auflösung von ungefähr zwei Millimetern, ist jedoch zeitlich recht ungenau. In unseren Experimenten maßen wir die Hirnaktivität von Versuchspersonen, während sie drei Arten von Sätzen hörten:

- ▷ Korrekte Sätze (zum Beispiel: Die Gans wurde gefüttert),
- ▷ Sätze, die semantisch falsch waren, also eine falsche Wortbedeutung enthielten (Das Lineal wurde gefüttert), oder
- ▷ Sätze mit einem syntaktischen – grammatikalischen – Fehler (Die Kuh wurde im gefüttert).

Um nun herauszufinden, welche Hirnregionen semantische Informationen verarbeiten, spielten wir den Probanden nacheinander Sätze vor, bei denen Syntax

und Prosodie konstant bleiben und sich nur die Semantik ändert: Aus der »Gans« wird ein »Lineal«. Verändert sich nun die neuronale Aktivität in einer bestimmten Hirnregion, ist diese vermutlich für Wortbedeutungen zuständig – alle anderen Aspekte bleiben schließlich gleich.

Spezialisierte Mini-Netzwerke

Auf diese Weise testeten wir, ob das menschliche Gehirn auf semantische und syntaktische Informationen unterschiedlich reagiert. Das Ergebnis: Die verschiedenen Sätze aktivieren allesamt vor allem die Wernicke-Region – jedoch deren vordere, mittlere und hintere Anteile in völlig unterschiedlichem Maße. Vorne verarbeitet diese Hirnwindung vornehmlich den Satzbau, während sich ihre Mitte um Wortbedeutungen kümmert. Der hintere Teil schließlich scheint für beide Aufgaben gleichermaßen zuständig zu sein. Vermutlich hilft er mit, die Bedeutung der Wörter und ihre grammatikalische Verknüpfung unter einen Hut zu bringen. Erst dadurch kann überhaupt eine Interpretation des Gesagten entstehen.

SPRACHVERARBEITUNG AM FLIESSBAND – EIN NEUES MODELL

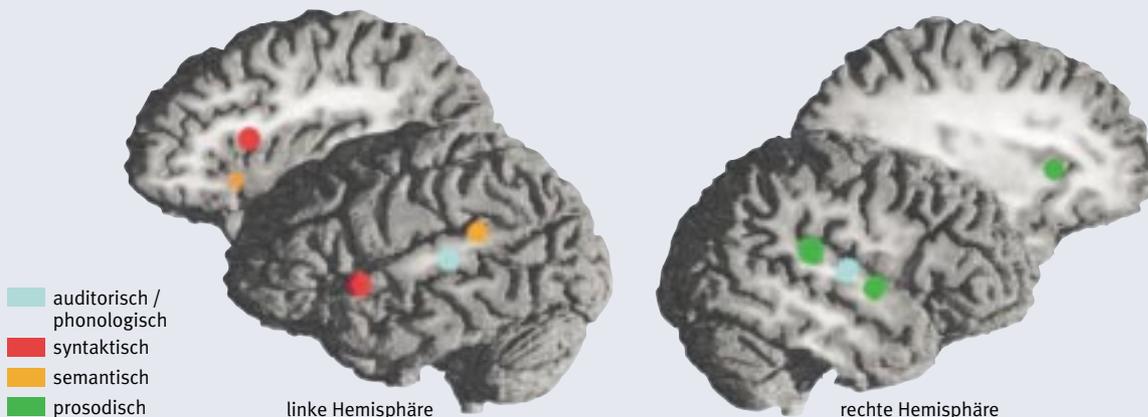
HÖREN WIR GESPROCHENE SPRACHE, versucht zunächst das Spracherkennungssystem im Gehirn, die einzelnen Lauteinheiten zu erfassen – es führt eine so genannte akustisch-phonetische Analyse durch. Danach filtert es auf zwei Wegen weitere Informationen heraus: Vornehmlich in der linken Hemisphäre betrachten oberflächliche Teile des Schläfenlappens und tiefer gelegene Regionen des Stirnlappens (im Bild links) gemeinsam zunächst die Wortkategorien. Das Spracherkennungssystem entscheidet also etwa, ob es ein Substantiv oder ein Verb vor sich hat, und erfasst auf diese Weise die syntaktische Struktur.

Danach kommen auf diesem Verarbeitungskanal semantische, also Bedeutungsinformationen an die Reihe. Es entscheidet sich: Wer tut was wem? Daneben enthält gesprochene

ne Sprache auch noch so genannte prosodische Informationen über den Tonhöhenverlauf – die Satzmelodie. Sie wird in einem zweiten Kanal, vorwiegend in der rechten Hemisphäre, verarbeitet. Das Ganze geschieht rasend schnell: Für alle diese Vorgänge benötigt das System höchstens etwa 600 Millisekunden pro Wort.

DER REIHE NACH

Die Hörrinde (blau) analysiert die lautliche Zusammensetzung des Gehörten. In der linken Hirnhälfte werden dann Syntax (rot) und Semantik (orange) untersucht, die prosodische Verarbeitung findet vorwiegend in der rechten Hirnhälfte statt (grün). Hinter der Außenansicht der Hirnhemisphären vorne im Bild ist jeweils ein in etwa zwei Zentimeter Tiefe verlaufender Längsschnitt zu sehen.



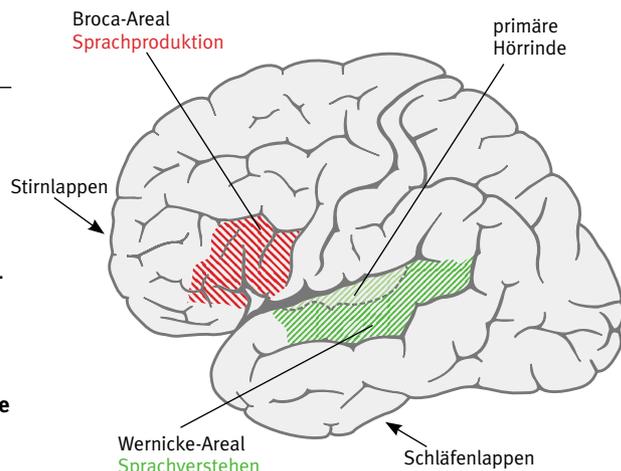
Die Verarbeitung von Sprache beschränkt sich jedoch nicht auf die Wernicke-Region. Auch daneben liegende Teile des linken Stirnhirns helfen fleißig mit. Syntaktische Informationen aktivieren beispielsweise Teile des so genannten frontalen Operculums – einer Hirnregion, die das Broca-Areal an der Oberfläche umfasst, aber auch noch etwa zwei Zentimeter tief ins Gehirn hineinreicht. Jeweils ein Areal im Schläfen- wie im Stirnlappen verarbeiten immer gemeinsam Semantik beziehungsweise Syntax und bilden auf diese Weise eine Art Mini-Netzwerk. Der Stirnlappen wird dabei häufig erst dann richtig aktiv, wenn die Anforderungen steigen – also bei komplexeren Sätzen als den genannten Beispielen.

Schließlich galt es auch noch die prosodische Information von Semantik und Syntax zu trennen. Dazu filterten wir aus einem normalen gesprochenen Satz den Verlauf der Tonhöhe heraus und spielten die isolierte Satzmelodie als Tonfolge den Probanden im Kernspintomografen vor. Daneben bekamen sie auch normal gesprochene Sätze zu hören, in denen jedoch nur eine syntaktische Struktur und kein Inhalt zu erkennen war, da sie nur bedeutungslose Pseudowörter enthielten. Diese Experimente zeigten: Im Unterschied zu Satzbau und Wortbedeutung wird die Satzmelodie vor allem in der rechten Hemisphäre verarbeitet – also derjenigen Hirnhälfte, die sich eher auf emotionale Informationen konzentriert. Um gesprochene Sprache effektiv zu verarbeiten, müssen daher linke und rechte Hemisphäre eng zusammenarbeiten.

Doch wie laufen all diese Prozesse zeitlich ab? Um das herauszufinden, benutzen wir ein in zeitlicher Hinsicht präziseres Verfahren als die Kernspintomografie: Wir registrierten die so genannten ereigniskorrelierten Hirnpotenziale mithilfe der Elektroencephalografie (EEG). Diese Methode mittelt sehr viele EEG-Einzelmessungen und macht auf diese Weise typische Ausschläge in der Hirnstromkurve sichtbar – in einem einzelnen EEG sind diese wegen der starken Hintergrundaktivität des Gehirns nicht zu erkennen. Enthält ein gehörter Satz etwa ein falsches Wort, so ändert sich der Kurvenverlauf in charakteristischer Weise.

Dabei reagiert das Gehirn auf semantische und syntaktische Fehler wiederum sehr unterschiedlich. Stellt ein falscher Begriff für die semantische Verarbeitung eine schwierige Aufgabe dar, weicht die Hirnstromkurve ungefähr 400 Millisekunden nach dem Reiz stark in Richtung negativerer Werte ab. Dieser charakteristische Ausschlag der Kurve – die N400-Komponente – tritt bei allen semanti-

KLARE AUFTeilUNG
Dem klassischen Sprachmodell zufolge sind im Wesentlichen nur zwei Zentren in der linken Hirnhälfte für Sprachfunktionen zuständig. Das Broca-Areal produziert Wörter und Sätze, die Wernicke-Region erhält Informationen über akustisch wahrgenommene Sprache von der primären Hörrinde zur weiteren Verarbeitung.



schen Verarbeitungsprozessen auf, und zwar umso stärker, je schwieriger sich die Integration eines Wortes in einen Satzzusammenhang erweist. Ein syntaktischer Fehler ruft hingegen bereits nach 160 Millisekunden eine typische Hirnantwort links vorne am Kopf hervor: die so genannte ELAN-Komponente (Abkürzung für Early Left Anterior Negativity).

FRAUEN SPRECHEN SCHNELLER AN
Unser Gehirn verarbeitet also zuerst die Grammatik und erst dann die inhaltliche Bedeutung eines Satzes! Vermutlich erstellt eines der Mini-Netzwerke zwischen Stirn- und Schläfenlappen zunächst schnell und automatisch eine syntaktische Struktur des Gehörten, was sich im ELAN-Signal widerspiegelt. Dann ruft ein anderes Mini-Netzwerk Wortbedeutungsinhalte ab, die mit den Informationen über den Satzbau zusammengeführt werden (N400-Ausschlag).

Kann jedoch die Botschaft so nicht auf Anhieb interpretiert werden, etwa bei grammatikalischen Fehlern, schlägt die Hirnstromkurve noch ein weiteres Mal aus – etwa 600 Millisekunden nach dem Reiz, hin zu positiven Werten. Diese P600-Komponente verrät, dass das Gehirn das Gehörte neu analysiert, um eine angemessene Interpretation zu finden.

Und die Prosodie? Passt die Satzmelodie nicht zu den Wortbedeutungen oder zum Satzbau, verrät wiederum zunächst ein starker N400-Ausschlag das Interpretationsproblem. So etwa bei dem falsch betonten Satz (hier durch das Komma markiert) »Peter verspricht, Anna zu arbeiten.« Danach folgt auch in diesem Fall eine P600-Komponente – ein Zeichen, dass das Gehirn einen neuen Interpretationsversuch startet: »Peter verspricht Anna, zu arbeiten.«

Aus unseren Versuchsergebnissen destillierten wir nun eine Art Fließbandmodell der Sprachverarbeitung heraus (siehe Kasten Seite 44): Das Gehirn nimmt sich die einzelnen Aspekte teils nacheinander, teils parallel vor und ver-

sucht aus den Einzelergebnissen eine widerspruchsfreie Interpretation zu formen – falls nötig in mehreren Anläufen.

In neuen Versuchen spielten wir unseren Versuchspersonen Sätze mit emotional positiv oder negativ gefärbten Wörtern – etwa »geliebt« und »gehasst« – vor. Diese waren jeweils entweder passend oder unpassend betont, je nachdem also positiv oder negativ. Im Unterschied zu allen anderen unseren Experimenten stießen wir jetzt auf einen Geschlechtsunterschied: Frauen sprechen auf die emotionalen Informationen der Satzmelodie früher an als Männer – schon nach 200 gegenüber etwa 750 Millisekunden (siehe Gehirn&Geist 1/2002, S. 88). Vermutlich verarbeiten Männer im Gegensatz zu Frauen Wortinhalt und Sprechmelodie zunächst getrennt voneinander und stellen erst danach den Bezug zwischen beiden her. Für Frauen scheint dagegen die Satzmelodie wichtiger als die Bedeutung der Wörter zu sein und diese im Zweifelsfall zu dominieren.

Konnte sich also Monsieur Tan Frauen besser verständlich machen als Männern? Möglicherweise. Das änderte jedenfalls nichts daran, dass mit Paul Broca ein Mann die naturwissenschaftliche Erforschung der Sprachfunktionen begründete. Und damit letztendlich auch unsere Entdeckungen ermöglichte. ◀

ANGELA D. FRIEDERICI ist Direktorin des Max-Planck-Instituts für neuropsychologische Forschung in Leipzig und Professorin an der dortigen Universität sowie der Universität Potsdam. Sie gehört zum wissenschaftlichen Beirat von Gehirn&Geist.



Literaturtipp

Fleming, G., Rickheit, G., Müller, H. M.: Neurokognition der Sprache. Tübingen: Stauffenburg Verlag 2002.

