

Wie Sprache auf die Nerven geht

„Sie ist ziemlich alt und hat verschiedene Formen; sie kann zärtlich sein und auch ärgerlich, sanft und brutal; sie kann die Liebe erklären, aber auch den Krieg. Wir alle kennen sie – und doch irgendwie nicht so richtig. Wir begegnen ihr täglich – und doch: Müssten wir sie beschreiben, täten wir uns schwer. Sie kommt zu uns und wird ein Teil von uns – und doch wissen wir nicht wie.“ Mit diesem Rätsel, es meint die Sprache, leitete **PROF. ANGELA FRIEDERICI**, Direktorin am Leipziger **MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR NEUROPSYCHOLOGISCHE FORSCHUNG**, ihren öffentlichen Vortrag im Rahmen der diesjährigen Hauptversammlung der Max-Planck-Gesellschaft in Halle ein. Lesen Sie im Folgenden, was man heute über die neuronalen Hintergründe des Sprachverstehens weiß.

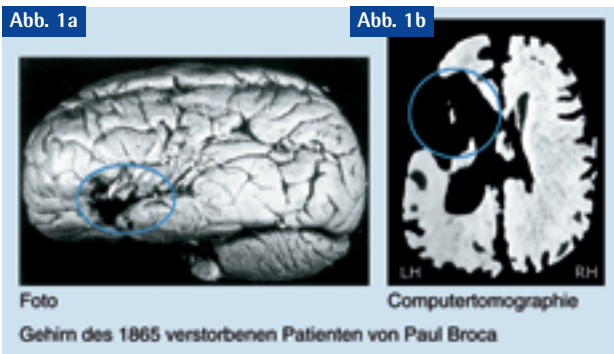


Die Sprache hat Philosophen und andere Denker beschäftigt. Doch der Naturwissenschaft schien sie nicht zugänglich – bis vor ungefähr 140 Jahren Paul Broca, ein französischer Neurologe und Anthropologe, den ersten Nachweis dafür erbrachte, dass Sprache wie andere Formen des Geistes an Materie gebunden ist. Broca berichtete über einen Patienten, der keine Sprache mehr produzieren konnte, außer einer einzigen Silbe: „tan“. Dieser Patient war sehr wohl in der Lage, einfache Fragen zu verstehen, und er signalisierte das mit jeweils bejahenden oder verneinenden Betonungen von „tan“.

Zwei Jahre später starb dieser Patient. Die Autopsie ergab eine Läsion des Gehirngewebes in der linken Hemisphäre – und zwar am Fuß der dritten Stirnhirnwindung. Der Zufall wollte es, dass das Originalgehirn des Patienten hundert Jahre später in einem Anatomie-Institut in Paris wiederentdeckt wurde. Das Gehirn zeigt die beschriebene Läsion in der dritten Stirnhirnwindung (Abb. 1 a). Interessanterweise hatte Broca das Gehirn in seiner Gänze erhalten und es nicht wie sonst üblich zur genaueren Untersuchung seziiert – als hätte er geahnt, dass mehr als hundert Jahre später eine Methode entwickelt würde, die es erlaubt, das Gehirn in seiner inneren Struktur zu betrachten, ohne es zu zerteilen: die Computertomographie. Sie zeigt eine große Schädigung des Gehirns im vorderen Teil der linken Hemisphäre; der Defekt ist weit größer, als man von der Außenbetrachtung annehmen würde (Abb. 1 b).

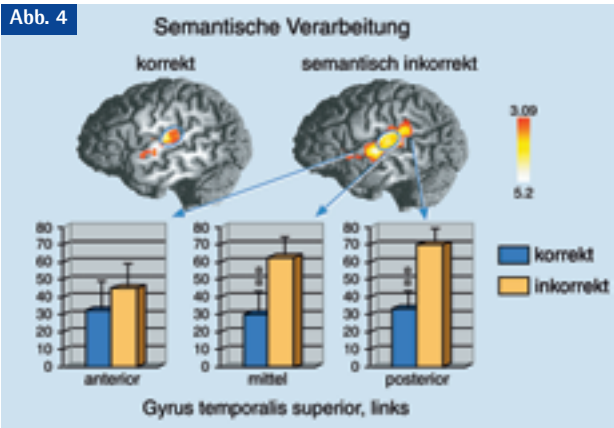
Die ursprüngliche Außensicht auf die Hirnläsion veranlasste Paul Broca, im unteren Teil der dritten Stirnhirnwindung den Sitz der Sprachproduktion zu sehen; noch heute bezeichnet man dieses Gebiet in der linken Hirnhälfte als Broca-Areal. Einige Jahre später, 1874, beschrieb der Breslauer Neurologe Carl Wernicke eine Reihe von Patienten, die Sprache wohl produzieren, aber nicht verstehen konnten. Diese Patienten wiesen Läsionen in der oberen Windung des Temporallappens auf. Fortan galt diese Hirnregion als die Region des Sprachverstehens. Diese Aufteilung entsprach lange Zeit dem Stand des Wissens (Abb. 2).

Heute jedoch können wir die neuronalen Grundlagen der Sprache genauer spezifizieren. Dazu haben drei Faktoren beigetragen: Da ist zunächst die grundlegende Theoriebildung bei Sprache und Sprachverarbeitung; diese Theorien beschreiben zum Teil sehr genau, was wir un-



tersuchen wollen – nämlich die Sprache und deren einzelne Komponenten. Zweitens haben sich so genannte bildgebende Verfahren rasant entwickelt; mit ihnen lässt sich die Hirnaktivität während einer kognitiven Aufgabe darstellen – und zwar sowohl hinsichtlich der Frage, welche Hirnareale während einer mentalen Tätigkeit aktiv sind, als auch bezüglich der Frage, wie die verschiedenen Hirnareale in der Zeit zusammenarbeiten. Der dritte und vielleicht wichtigste Faktor jedoch heißt Interdisziplinarität: Wissenschaftler aus verschiedenen Bereichen – den Geisteswissenschaften und den Naturwissenschaften – arbeiten eng zusammen, um der Natur des Geistes und der Natur der Sprache auf die Spur zu kommen. Von diesem Abenteuer soll hier berichtet werden. ▶

Foto: Wolfgang Filser / Abb.: MPI für Neuropsychologische Forschung



Einige werden fragen: Kann man denn das, was wir unter Sprache verstehen und was vielleicht eher Assoziationen wie „Goethe“ oder „Schiller“ hervorruft, mit naturwissenschaftlichen Methoden untersuchen? Man kann – nämlich dann, wenn man nicht Gedichte interpretieren will, sondern die biologischen Grundlagen der menschlichen Fähigkeit, Sprache zu verstehen, untersucht.

Was sind nun die Prozesse, die beim Hören und Verstehen von Sprache ablaufen, vom akustischen Input bis zu dem Moment, in dem eine Interpretation für das Gesagte gefunden wurde? Ein Schema dieser Abläufe zeigt Abbildung 3. Zunächst muss das System eine akustisch-phonetische Analyse des Gesagten vornehmen. Dann werden weitere Informationen herausgefiltert, und zwar auf zwei Wegen: Innerhalb eines Verarbeitungspfades erfolgt zunächst der Zugriff auf Wortkategorie und Erstellung der syntaktischen (grammatischen) Struktur, dann erst der Zugriff auf die Semantik (Bedeutung). In der Phase des semantischen Zugriffs werden thematische Rollen vergeben: Es wird festgelegt „wer tut was wem“. Danach wird das Gesagte interpretiert.

Neben der syntaktischen und der semantischen Information enthält gesprochene Sprache aber auch noch prosodische Information: Information also über den Tonhöhenverlauf. Der Volksmund nennt das „Satzmelodie“. Diese wird in einem zweiten Pfad verarbeitet. Prosodie kann

ebenfalls die Struktur eines Satzes signalisieren. So erlaubt sie zum Beispiel, zwischen Aussagesatz und Frage zu unterscheiden, oder zeigt an, ob etwas traurig oder fröhlich gesagt wurde. Alle diese Informationen verarbeitet das System in kürzester Zeit, von Wort zu Wort in weit weniger als einer Sekunde – genauer gesagt: in 600 Millisekunden.

Um herauszufinden, wie das Gehirn das bewältigt, müssen zunächst zwei Fragen geklärt werden: Welche Gehirnareale unterstützen die Satzverarbeitung, insbesondere syntaktische, semantische und prosodische Prozesse? Und wie werden diese verschiedenen Teilprozesse zeitlich koordiniert? Zur Klärung stehen heute verschiedene Verfahren zur Verfügung, mit denen sich die Aktivität des „arbeitenden“ Hirns registrieren lassen. Da ist zum einen die Methode der ereigniskorrelierten Hirnpotenziale: Dabei wird mittels der Elektroenzephalographie (EEG) das Summenpotenzial von einer großen Anzahl synchron aktiver Neuronen registriert. Die Zeitauflösung dieses Verfahrens liegt bei einer Millisekunde, doch ist seine räumliche Auflösung auch bei der Verwendung einer größeren Zahl von Elektroden recht ungenau.

Die andere Methode, die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT), bietet dagegen eine hervorragende räumliche Auflösung von ungefähr zwei Millimetern, ist aber in ihrem zeitlichen Auflösungsvermögen weniger gut. Die fMRT erfasst die Sauerstoffpegel des Bluts und zeigt deren Veränderung während neuronaler Aktivität. Mit der Kombination beider Verfahren können wir die mit der Sprachverarbeitung verbundene Hirnaktivität räumlich und zeitlich recht genau beschreiben.

Zunächst zu der Frage, wo im Gehirn syntaktische und semantische Prozesse ablaufen. Dabei haben wir mithilfe der funktionellen Kernspintomographie eine Reihe von Experimenten angestellt (Abb. 4). In einem dieser Versuche präsentierten wir Sätze, die entweder korrekt waren („Die Gans wurde gefüttert“), oder die einen semantischen, also einen Bedeutungsfehler, enthielten („Das Lineal wurde gefüttert“) oder einen syntaktischen, also einen Fehler der Grammatik („Die Kuh wurde im gefüttert“).

Mit solchen fehlerhaften Sätzen kann man testen, ob das Gehirn unterschiedlich auf die zwei Fehlertypen reagiert – auf semantische oder syntaktische Information. Für die semantisch korrekte und inkorrekte Satzbedingung (Abb. 4) zeigen sich deutliche Aktivierungen im oberen Gyrus des Temporallappens. Die Unterschiede zwischen der korrekten und semantisch inkorrekten Bedingung sind im hinteren und mittleren Anteil des oberen Gyrus des Temporallappens am größten. Für die syntaktische Bedingung (Abb. 5) findet man vor allem im mittleren Anteil des oberen Gyrus des Temporallappens eine weniger starke Aktivierung. Der vordere Anteil des Gyrus temporalis superior zeigt dagegen eine deutliche Aktivierung. Hier ist der Unterschied zwischen der korrekten und syntaktisch inkorrekten Bedingung am größten.

Diese Daten belegen, dass verschiedene Anteile des Gyrus temporalis superior spezifisch und abhängig von syntaktischen und semantischen Prozessen aktiviert werden. Der vordere Anteil des Gyrus ist vor allem bei der Verarbeitung syntaktischer Aspekte aktiv, der mittlere Anteil hingegen bei der Verarbeitung semantischer. Der hintere Anteil des Gyrus scheint bei beiden Prozessen gleichermaßen aktiviert zu werden, spielt also bei der Integration von Semantik und Syntax eine Rolle.

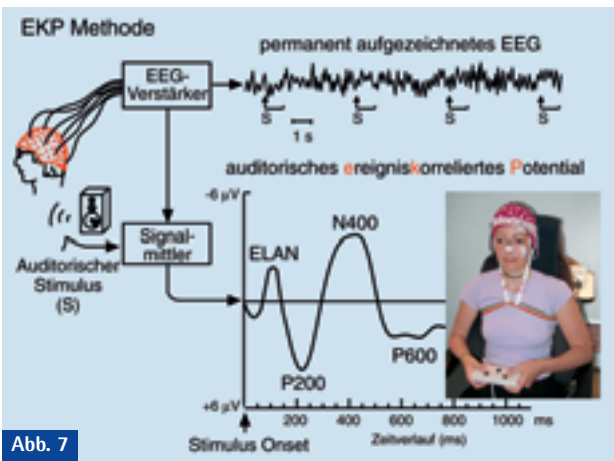
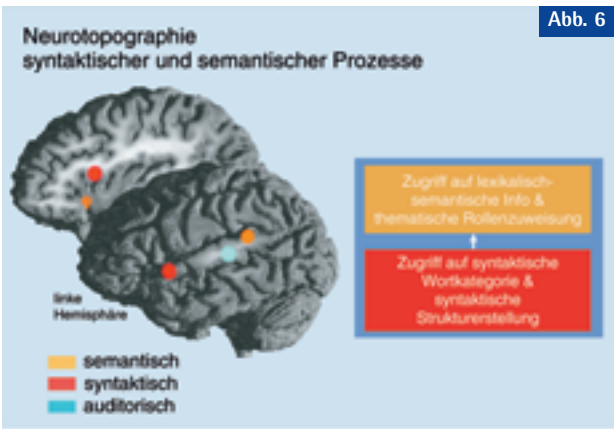
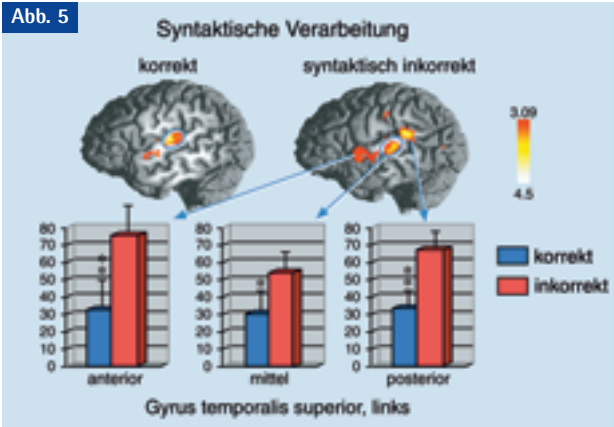
Syntaktische und semantische Bedingungen unterscheiden sich darüber hinaus in der Aktivierung frontaler Arealen. Die syntaktische „Verletzungsbedingung“ aktiviert im Gegensatz zur semantischen zusätzlich das frontale linke Operculum, das nahe dem Broca-Areal liegt. Diese und eine Reihe ähnlicher Untersuchungen im fMRT zeigen, dass die verschiedenen Prozesse – primär auditorische, syntaktische oder semantische – von unterschiedlichen Hirnarealen unterstützt werden. Interessant ist, dass nicht jeweils nur ein Areal für semantische oder syntaktische Prozesse zuständig ist, sondern ein Prozess jeweils gleichzeitig ein Areal im Temporal- und im Frontallappen aktiviert, die beide ein spezifisches Mini-Netzwerk bilden. Klar zu unterscheiden sind in der linken Hemisphäre das Netzwerk für syntaktische Prozesse (in Abb. 6 rot markiert) und für semantische Prozesse (orange). Die frontalen Anteile des Mini-Netzwerks werden häufig erst dann deutlich aktiv, wenn semantische und syntaktische Prozesse einen höheren Aufwand erfordern, das heißt, wenn die Sätze komplexer sind als im geschilderten Experiment.

Damit kennt man jene Hirnareale, in denen die Verarbeitung von syntaktischen und semantischen Merkmalen abläuft. Was aber sind die zeitlichen Parameter? Wird syntaktische Information – wie das Modell sagt – in der Tat vor der semantischen Information verarbeitet? Zur Klärung dieser Frage benutzen wir das Verfahren der ereigniskorrelierten Hirnpotenziale (EKP); es erlaubt eine zeitliche Auflösung im Millisekundenbereich. Da aus dem fortlaufenden EEG (Abb. 7 oben) wegen der relativ großen Hintergrundaktivität des Gehirns bei Präsentation einzelner Stimuli (hier mit „S“ bezeichnet) nur wenig spezifische Hirnaktivität zu erkennen ist, wird die Gehirnaktivität in Bezug auf eine Reihe von Stimuli einer bestimmten Klasse gemittelt. Diese Mittelung liefert eine interpretierbare Gehirnkurve – das ereigniskorrelierte Hirnpotenzial (Abb. 7 unten).

Das verwendete Stimulusmaterial im EKP-Experiment war identisch mit jenem im vorhin beschriebenen Experiment: Es umfasste korrekte, semantisch inkorrekte und syntaktisch inkorrekte Sätze. Die Hirnantworten auf semantisch und auf syntaktisch fehlerhafte Satzbedingungen unterscheiden sich deutlich. Die Hirnantwort auf das letzte Wort im semantisch fehlerhaften Satz ist für eine Elektrode („Cz“) in der oberen Hälfte von Abbildung 8 dargestellt. Die durchgezogene Linie zeigt die korrekte

Bedingung, die gepunktete die inkorrekte. Beide Kurven laufen bei ungefähr 400 Millisekunden auseinander und kommen bei etwa 700 Millisekunden wieder zusammen. Diese negative Komponente wird gemäß ihres zeitlichen Auftretens N400 genannt. Das Gehirn reagiert also auf den semantischen Fehler im Satz.

Der untere Teil von Abbildung 8 zeigt die Differenz zwischen der korrekten und der semantisch inkorrekten Bedingung in ihrer Topographie, gemessen an den über die Kopfoberfläche verteilten Elektroden. Negativität ist



orange kodiert, und man erkennt, dass die N400 sich über den hinteren Teil des Kopfes ausbreitet.

Die syntaktische Verletzung (gepunktete Linie in Abb. 9 oben links), evoziert eine sehr frühe Hirnantwort, die um die 160 Millisekunden einsetzt. Diese Komponente haben wir ELAN (Early Left Anterior Negativity) genannt. Unten links zeigt Abbildung 9 die Topographie für diese Komponente: Sie tritt nur anterior auf und ist links etwas stärker als rechts. Das bedeutet, dass syntaktische Information in der Tat früher als semantische Information verarbeitet wird. Diese Verteilung weist auf die Aktivität spezifischer Hirnareale für die syntaktische Verarbeitung im Gegensatz zur semantischen hin. Syntaktische Fehler rufen eine zweite, spätere Komponente hervor: eine Positivierung

Abb. 8

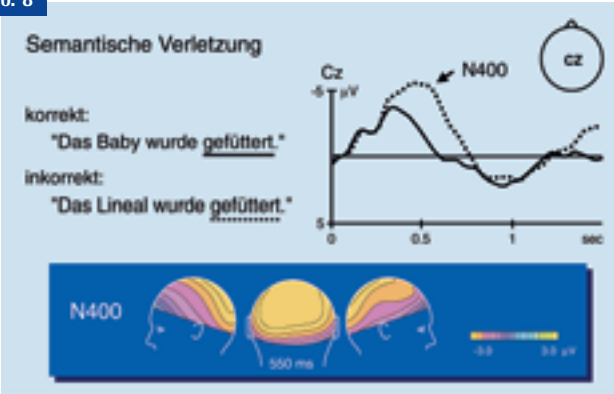


Abb. 9

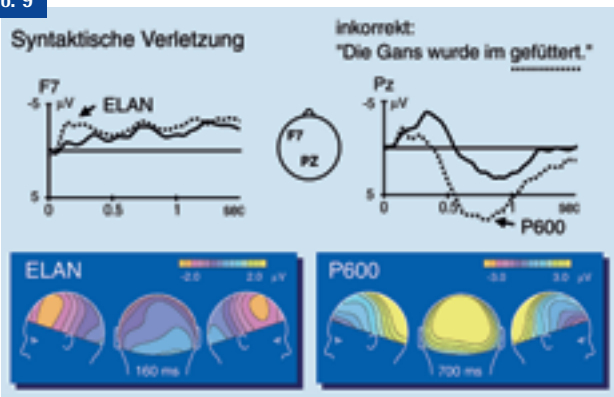
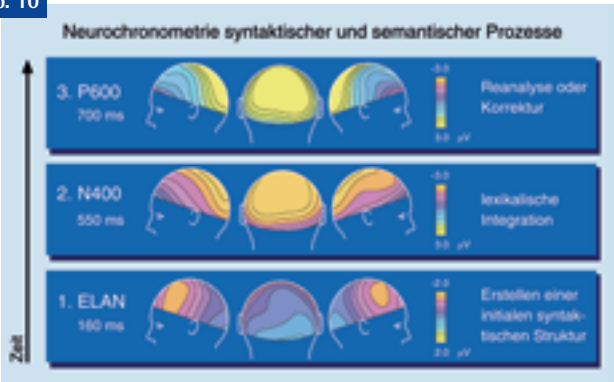


Abb. 10



um die 600 Millisekunden, daher P600 genannt (Abb. 9 oben rechts). Unten rechts in Abbildung 9 ist die Verteilung dieser Komponente über den Kopf dargestellt. Sie ist deutlich verschieden von der frühen syntaktischen Komponente ELAN.

Diese Daten belegen ein präzises zeitliches Zusammenspiel von syntaktischen und semantischen Prozessen, das sich in drei Phasen gliedert (Abb. 10): Zunächst wird schnell und automatisch eine syntaktische Struktur erstellt (ELAN), dann werden lexikalisch-semantische Inhalte abgerufen und integriert (N400). Ist beides ohne Probleme möglich, kann die Botschaft interpretiert werden. Treten aber Probleme auf, geht das System in eine Korrekturphase (P600) mit dem Ziel, eine adäquate Interpretation zu finden.

Aus diesen zwei Experimenten lässt sich der Weg vom auditorischen Input innerhalb der linken Seite des Modells bezüglich seiner neuronalen Aspekte beschreiben und das räumlich präzise, jedoch zunächst statische Hirnaktivitätsmodell nun in seinem zeitlichen Ablauf spezifizieren (vgl. Abb. 6). Zunächst wird die akustische Information im primären auditorischen Kortex bilateral verarbeitet, dann erfolgt die schnelle syntaktische Verarbeitung in einem temporal-frontalen Netzwerk und danach die semantische in einem anders verteilten temporal-frontalen Netzwerk. Die erfolgreiche Integration dieser verschiedenen Informationstypen ist Voraussetzung für die Interpretation.

Ein zusätzliches Experiment im Magnetenzephalographen (MEG) mit insgesamt 148 Kanälen belegte, dass schon der frühe syntaktische Prozess das temporal-frontale Netzwerk aktiviert. Es wurden dieselben Stimuli wie in den vorangegangenen Versuchen verwendet, und die Quellen der Hirnaktivität im frühen Zeitfenster um die 160 Millisekunden individuell für fünf Probanden errechnet. Interessanterweise zeigten sich für dieses frühe Zeitfenster zwei Quellen: ein temporaler und ein frontaler Dipol. Dies bedeutet, dass das definierte Mini-Netzwerk schon in der frühen Phase der syntaktischen Verarbeitung aktiv ist.

Damit kommen wir zur Verarbeitung prosodischer Information (vgl. rechte Seite des Modells in Abb. 3). Die Frage, wo im Gehirn prosodische Information verarbeitet wird, wurde mittels funktioneller MRT untersucht. Um die Prosodie getrennt von Semantik und Syntax zu analysieren, wurde die spektrale Information aus einem normalen gesprochenen Satz herausgefiltert (Abb. 11 oben). Erhalten blieb der Tonhöhenverlauf (Abb. 11 unten). Die spezifische Aktivierung für die Prosodie wird deutlich im Vergleich der Hirnaktivierung zwischen den gefilterten Sätzen – die nur prosodische Information enthielten – und normal gesprochenen Sätzen, die neben der prosodischen auch spektrale Information transportierten; in ihnen war jedoch nur eine syntaktische Struktur und kein Inhalt zu

erkennen, da alle Inhaltswörter durch Pseudowörter ersetzt waren. Die Daten belegen eine dominante Involvierung der rechten Hemisphäre bei der Verarbeitung prosodischer Information (Abb. 12).

Das funktionale Gehirnmodell stellt die Verarbeitung gesprochener Sprache wie folgt dar (Abb. 13): Homologe Areale im superioren Gyrus des Temporallappens und im inferioren Gyrus des Frontallappens der linken und der rechten Hemisphäre sind aktiviert. Syntax und Semantik werden in domänen-spezifischen Mini-Netzwerken verarbeitet – und zwar vor allem in der linken Hemisphäre –, Prosodie dagegen vornehmlich in der rechten. Es ist zu vermuten, dass linke und rechte Hemisphäre in Echtzeit zusammenwirken, um eine effektive Verarbeitung gesprochener Sprache zu sichern.

Wie aber werden Syntax und Semantik mit der Prosodie zusammengeführt? Dazu bietet man Versuchspersonen Sätze mit einer so genannten inkorrekten Prosodie, wie beispielsweise: „Peter verspricht, Anna zu arbeiten und das Büro zu putzen“ (anstatt „Peter verspricht Anna, zu arbeiten und...“ oder „Peter verspricht, Anna zu entlasten und...“). Tatsächlich reagiert das Gehirn auf derart irreführende Informationen zunächst mit einer N400-Antwort als Zeichen dafür, dass es das unpassende Verb „arbeiten“ – statt des richtigen Verbs „entlasten“ – syntaktisch nicht in den Satz integrieren kann. Dann aber folgt eine P600-Komponente als Ausdruck eines Korrekturprozesses – und so wird der Satz am Ende doch verstanden.

Schwieriger ist es, die Interaktion zwischen Semantik und Prosodie aufzudecken. Dazu verwendet man Sätze mit emotional positiv oder negativ gefärbten Wörtern und trägt diese Sätze mit jeweils passender oder unpassender emotionaler Stimmfärbung vor. Dabei zeigt sich – anders als bei allen anderen Experimenten – ein Unterschied zwischen Männern und Frauen: Männerhirne reagieren auf die unpassende Information langsamer als Frauenhirne, die auf prosodisch emotionale Informationen sehr früh ansprechen – schon nach 200 Millisekunden. Darin könnte ein Grund für manche Missverständnisse zwischen Frauen und Männern liegen.

Doch ungeachtet dieses interessanten Aspekts lässt sich insgesamt für alle Gehirne feststellen: Der Weg vom akustischen Input führt über räumlich getrennte Mini-Netzwerke; jeweils gesondert verarbeiten sie spezifische Informationen des Gehörten und verständigen sich binnen einer Sekunde über den Inhalt. Das gilt für reife Gehirne. Wie aber lernen Kinder von der Geburt bis zum Alter von sechs Jahren, Sprache zu verstehen? Dieser Zusammenhang zwischen Sprachentwicklung und Hirnentwicklung wird an 250 Kindern erforscht. Diese Kinder sind derzeit gerade ein Jahr alt, und es gibt darüber noch nicht viel zu berichten. Das fordert noch Geduld – eine der Tugenden, die jeder Wissenschaftler braucht.

Abb. 11

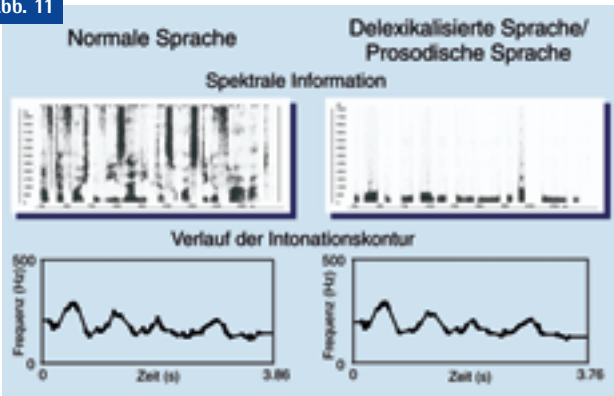


Abb. 12

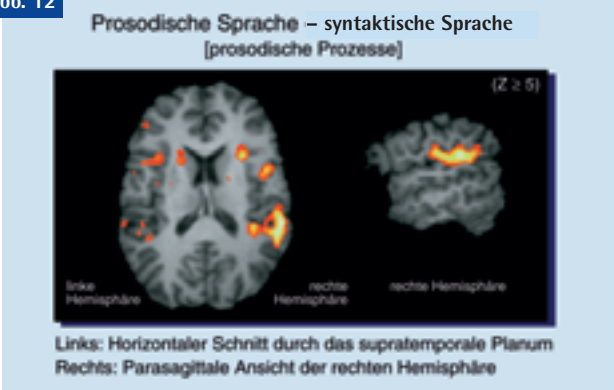
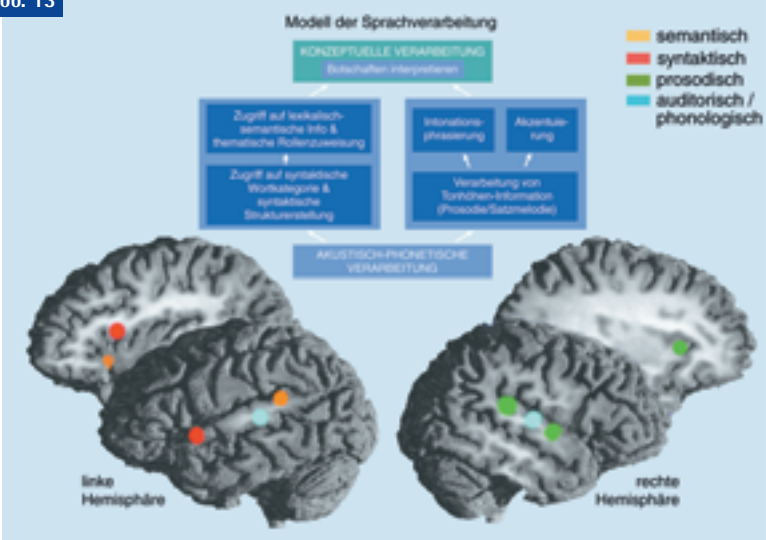


Abb. 13



PROF. DR. ANGELA D. FRIEDERICI ist Direktorin und wissenschaftliches Mitglied am Max-Planck-Institut für neuropsychologische Forschung in Leipzig. Sie forscht auf dem Gebiet der Neurobiologie der Sprache und untersucht Fragen des Sprachverstehens, der Sprachverarbeitung und der Bildung von kognitiven Prozessen. Frau Friederici ist Professorin an der Universität Leipzig und hält mehrere Honorarprofessuren inne. Zudem ist sie Direktorin am Zentrum für Kognitionswissenschaft. Für ihre Arbeit wurde sie mehrfach ausgezeichnet, beispielsweise erhielt Angela Friederici im Jahr 1997 den Gottfried-Wilhelm-Leibniz-Preis.