ANGELA D. FRIEDERICI

Sprache und Gehirn¹

Abstract

Sprachverstehen ist ein hochkomplexer Prozess bei dem eine Reihe von Subprozessen aufgerufen und zeitlich koordiniert werden müssen. Linguistische Theorien und psycholinguistische Modelle postulieren unterschiedliche Prozessdomänen für die Verarbeitung von gesprochener Sprache: Semantik, Syntax und Phonologie und innerhalb dieser, die Prosodie. Neurophysiologische Studien, die auf den zeitlichen Verlauf dieser Prozesse im Gehirn fokussieren, zeigen, dass syntaktische Information früh und unabhängig von semantischer Information verarbeitet wird. Bildgebende Verfahren belegen, dass diese verschiedenen Prozessdomänen von unterschiedlichen neuronalen Netzwerken in der linken Hirnhälfte unterstützt werden. Für die syntaktische Verarbeitung können dabei zwei Subnetzwerke differenziert werden. Ein Netzwerk, bestehend aus dem frontalen Operculum und dem anterioren Anteil des oberen Temporalgyrus, zeichnet verantwortlich für die Verarbeitung der lokalen Phrasenstruktur. Ein zweites Netzwerk, bestehend aus dem Broca-Areal und dem hinteren Anteil des oberen Temporalgyrus, ist verantwortlich für die Verarbeitung hierarchischer Strukturen. Die rechte Hirnhälfte ist vornehmlich für die Verarbeitung prosodischer Information auf Satzebene zuständig. Die schnelle Kommunikation zwischen beiden Hirnhälften ist Voraussetzung für eine enge Koppelung von syntaktischer und prosodischer Verarbeitung auf dem Weg zum Sprachverstehen. Diese wird durch eine Hirnstruktur gesichert, die die beiden Hemisphären miteinander verbindet. Als Beleg hierfür gilt der Befund, dass Patienten mit Schädigung dieser Hirnstruktur keine normale Interaktion zwischen grammatischer und prosodischer Information zeigen.

1. Neurobiologische Grundlagen

Der vorliegende Beitrag, der auf die Frage fokussiert, wie Sprache und Gehirn zusammenhängen, befindet sich zweifellos ganz am äußeren Pol der Gesamthematik der diesjährigen Tagung „Sprache, Kognition, Kultur“.

Wenn wir nach den neurobiologischen Grundlagen der Sprachfähigkeit des Menschen fragen, gibt es einen weitgehenden Konsens darüber, dass die Sprachfähigkeit durch die genetische Ausstattung des Menschen bedingt ist. Das Gehirn des Menschen ist es, das die Leistung des Sprechens und des Ver-

¹ Der vorliegende Beitrag basiert auf einen Vortrag, den Angela Friederici auf der Tagung des IDS 2007 gehalten hat. Er berichtet vornehmlich über empirische Arbeiten aus dem eigenen Labor.

stehens erbringt, Fähigkeiten, die wir täglich und mühelos realisieren. Auch wenn wir mit großer Sicherheit wissen, dass dies so ist, so wissen wir noch relativ wenig darüber, wie das Gehirn im Detail funktioniert. Es wäre nicht nur aus theoretischen Gründen wünschenswert, besser über diese Vorgänge und Zusammenhänge Bescheid zu wissen. Vielmehr könnten wir, wenn wir besser wüssten, wie das Gehirn diese Leistung erbringt, mit mehr Aussicht auf Erfolg an die Entwicklung von Computerprogrammen gehen, die es dann in dieser Hinsicht dem Menschen gleich tun könnten.

Um die für die Sprachfähigkeit relevanten Aspekte besser beschreiben zu können, ist es von Interesse, die uns nächstverwandte Spezies anzuschauen, die nichtmenschlichen Primaten, die genetisch gesehen nur 1,7 Prozent von uns entfernt sind. Denn trotz dieser Nähe verfügen die Affen nicht über diese Fähigkeit. Affen können natürlich nicht sprechen, weil sie keine Artikulationsorgane haben. Aber es gelingt ihnen auch nicht, Sprache zu verstehen, obwohl sie Sprachlaute hören können.

2. Relevante Hirnareale

Wie können wir das erklären? Können wir jene neuronalen Grundlagen spezifizieren, die diese dem Menschen eigene besondere Leistung des Sprachverstehens mit sich bringen? Um dieser Frage etwas genauer nachzugehen, sehen wir uns einmal im Vergleich die Bilder eines menschlichen und eines Affenhirns an.

Wenn man die beiden Hirne vergleicht, stellt man fest, dass vor allem der präfrontale Kortex beim Affen sehr viel kleiner ist als beim Menschen (Abb. 1).

Abb. 1

Innerhalb dieses präfrontalen Kortex sind nun diejenigen Bereiche, die in der Abbildung besonders markiert sind, von besonderem Interesse. Da ist vor allem das Broca-Areal (die Areale 44 und 45b in Abb. 1), von dem wir wissen, dass es für die der Grammatikverarbeitung zuständig ist und zwar sowohl in der Sprachproduktion wie im Sprachverstehen. Im Vergleich sieht man, dass gerade diese beiden Areale bei dem Affen sehr klein sind.

Wie kommt man dazu, diese beiden Areale von anderen abzugrenzen? Das geschieht aufgrund der Zytoarchitektonik, die die einzelnen Areale haben. Die Entdeckung dieser Unterschiede geht auf das Jahr 1909 zurück, als Korbinian Brodmann (Brodmann 1909) diese verschiedenen Kortexareale beim Menschen analysiert hat und dabei feststellte, dass es offensichtlich zwischen diesen verschiedenen Arealen Unterschiede gibt. Analysiert hat er die aus sechs Schichten bestehende Großhirnrinde im Hinblick auf ihre Zellstruktur. Unterschiede fand er bezüglich der Zelldichte in Schicht IV des Kortex. Die Brodmann Areale (BA) 44 und 45 sind diejenigen, die man als dysgranulär (44) beziehungsweise granulär (45) bezeichnet. Diese Areale sind phylogenetisch jünger als die anderen Areale, z. B. Areal 4 und 6, die von agranulärer Struktur sind (Sanides 1962). Es ist vielleicht nicht von ungefähr, dass gerade diese phylogenetisch jüngeren Areale bei unserem nichtmenschlichen Verwandten – dem Makaken – so klein sind (Petrides/Pandya 1994).

Die Areale 44 und 45 bilden gemeinsam das sogenannte Broca-Areal. Wie kommt es dazu, dass dieses Areal Broca-Areal genannt wird? Paul Broca hat 1865 einen Beitrag veröffentlicht (Broca 1865), in dem er einen Patienten beschrieb und gleichzeitig auch die Hirnläsion, die dieser Patient hatte. Er hatte diesen Patienten in seinem Verhalten lange beobachtet und als der Patient dann fünf Jahre später starb, konnte er nach einer Autopsie auch Informationen darüber gewinnen, welche Hirnareale bei diesem Patienten durch einen Schlaganfall geschädigt waren.

Abb. 2

Abbildung 2a zeigt das Originalgehirn dieses Patienten, Mr. Le Borgne. Mr. Le Borgne hatte eine Läsion im vorderen Anteil des Frontalkortex der linken Hemisphäre (eingekreister Teil) und konnte nur noch eine Silbe produzieren. Mit dieser einen Silbe war er allerdings in der Lage, zu zeigen, dass er Sprache verstehen konnte. Er konnte sie entweder mit positiver oder negativer Intonation artikulieren und damit Fragen, die an ihn gerichtet wurden, bejahen oder verneinen. Dieses Gehirn wurde fast hundert Jahre später in Paris in einem pathologischen Institut gefunden und damals hatte man dann die Möglichkeit, dieses Gehirn in einem Computertomographen und die Läsion, die dieser Patient hatte, genauer zu analysieren. In dem in Abbildung 2b abgebildeten horizontalen Gehirnschnitt werden die durch den Schlaganfall geschädigten Partien sichtbar (eingekreister Teil). Wenn man die linke mit der rechten Hemisphäre vergleicht, wird deutlich, dass sich in der linken Hälfte des Gehirns eine große Läsion befindet. Die Tatsache, dass dieser Patient nur noch eine Silbe produzieren konnte, aber keine Sätze mehr, hat Paul Broca dazu gebracht, das geschädigte Hirnareal als das Areal zu kennzeichnen, das für die Sprachproduktion zuständig sei (Abb. 3). Heute wissen wir, dass das Broca-Areal nicht nur für die Sprachproduktion zuständig ist, sondern für die Verarbeitung von syntaktischen Strukturen, und das nicht nur in der Sprachproduktion sondern auch im Sprachverstehen. Patienten mit Läsionen in diesem Areal sprechen agrammatisch. Ihr Defizit in der Perzeption zeigt sich allerdings nur, wenn sie mit Sätzen konfrontiert werden, die nicht mehr auf Grund von semantischem oder pragmatischem Wissen verarbeitet werden können, sondern der syntaktischen Analyse bedürfen.

Carl Wernicke hat kurze Zeit später sechs Patienten beschrieben, die im Grunde genommen ein Spiegelbild des Verhaltens dazu darstellten (Wernicke 1876). Diese Patienten konnten Sprache nicht mehr verstehen, hatten aber einen flüssigen Sprachoutput. Wenn man jedoch genau hinhörte, stellte man fest, dass ihr Sprachoutput inhaltsleer war. Es waren grammatische korrekte Floskeln, die mit Wörtern wie z. B. *das Dings da* oder entsprechende inhaltsarme Formulierungen gefüllt waren. Auch in diesen Fällen konnte nach dem Tod der Patienten die Art der Läsionen genauer bestimmt werden. Diese Patienten hatten alle Läsionen im Temporallappen, und zwar im oberen Gyrus des Temporallappens, dort wo sich die in Abbildung 3 markierte Region, die als Wernicke-Areal bezeichnet wird, befindet.

Die beiden gerade vorgestellten Areale werden in den klassischen Modellen als das Broca-Areal zuständig für die Sprachproduktion und das Wernicke-Areal zuständig für das Sprachverstehen definiert. Diese klassische Grundannahme ist in neuerer Zeit revidiert worden. Heute geht man davon aus, dass das Broca-Areal vornehmlich für syntaktische Verarbeitung relevant ist und das Wernicke-Areal für lexikalisch-semantische Prozesse. Für das Sprachverstehen sind soweit beide Areale von Bedeutung. Dem Sprachverstehen wollen wir uns im weiteren gezielt zuwenden.

Abb. 3

3. Grundlagen des Sprachverstehens

3.1 Leitfragen der Forschung

Wenn man die neuronalen Grundlagen des Sprachverstehens zu erforschen versucht, folgt man den folgenden die Forschung leitenden Fragen:

Da ist zunächst einmal die Frage, welche Gehirnareale die Satzverarbeitung, d. h. die syntaktischen, semantischen und prosodischen Prozesse unterstützen. Mit der Frage, wo im Gehirn etwas geschieht, haben wir aber noch nicht beantwortet, wie Sprachverstehen vor sich geht.

Eine zweite relevante Frage ist die nach der zeitlichen Koordination der verschiedenen Teilprozesse. Bei der akustischen Wahrnehmung von Sprache sind die Prozesse stark miteinander verknüpft. Die Forschungsstrategie ist nun, zu sehen, wie man den komplexen Prozess zeitlich auseinanderziehen kann, um die Subprozesse getrennt beobachten zu können. Zur systematischen empirischen Erforschung dieser Prozesse braucht man ein Modell, innerhalb dessen die einzelnen Experimente einzelne Prozesse untersuchen. Modelle dieser Art sind sicherlich eine verkürzte oder vereinfachte Version der Annahmen, die in der Psycholinguistik bezüglich der verschiedenen Prozesse der Sprachverarbeitung gemacht werden. Dennoch wollen wir ein solches Modell als Ausgangspunkt nehmen.

3.2 Die Verarbeitung akustischer Sprachinformation

Wenn man der Frage nachgeht, wie und in welchen Schritten akustische Sprachinformation verarbeitet wird, ist naheliegender Weise zunächst anzu-

nehmen, dass die akustisch-phonetische Verarbeitung den ersten Schritt in der Verarbeitungsserie darstellt.

Die linke Seite des Modells (Abb. 4) stellt die Aktivitäten in der linken Gehirnhälfte dar. Annahme ist, dass nach dem ersten Verarbeitungsschritt initial eine lokale syntaktische Struktur erstellt wird. In einem weiteren Schritt müssen semantische Relationen, sowie grammatische und thematische Relationen festgelegt werden, damit es zu einer Interpretation kommen kann. Für eine Interpretation werden diese letztgenannten Informationen in einer dritten Verarbeitungsphase miteinander integriert.

Abb. 4

Für die akustische Sprachverarbeitung gilt nun noch ein zweiter Verarbeitungsweg. Wenn man akustische Sprachinformation wahrnimmt, werden auch Informationen über die Prosodie, also Tonhöheninformationen und ganz bestimmte Betonungsmuster wahrgenommen und verarbeitet. Prosodische Information ist nicht nur wichtig, um die emotionale Bedeutung einer Äußerung zu interpretieren, sondern die Tonhöheninformation ist vor allem relevant, wenn es darum geht, Intonationsphrasengrenzen im Sprachinput zu identifizieren. Dies ist insofern von Bedeutung als jede Intonationsphrasengrenze gleichzeitig eine syntaktische Grenze darstellt. Dass und wie der Mensch diese Intonationsphrasengrenzen für die akustische Sprachverarbeitung nutzt, wird unten genauer dargelegt werden.

Die bildgebenden Verfahren, die es uns erlauben, die Orte und zeitlichen Abläufe von Aktivitäten des Gehirns bei der Sprachverarbeitung zu dokumentieren, lassen erkennen, dass syntaktisch-semantische Verarbeitungsprozesse von der linken Hemisphäre (LH) geleistet werden und dass prosodische

Information von der rechten Hemisphäre (RH) verarbeitet wird (Abb. 4). Bei dieser Aufteilung der Informationsverarbeitung stellt sich natürlich die Frage, wie diese beiden Informationstypen während der Sprachverarbeitung zusammenkommen. Auch dies wird zu diskutieren sein.

Oben wurde bereits darauf hingewiesen, dass es bei der empirischen Erforschung der Sprache gilt, diese in unserer alltäglichen Wahrnehmung in einem komplexen Akt stattfindenden Prozesse zeitlich auseinander zu ziehen. Dass das ein objektives Problem ist, kann man schon daraus ableiten, dass alle Prozesse, die wir als Teile dieses Aktes beschrieben haben, in weniger als einer Sekunde stattfinden. Für die Sprachintegrationsprozesse werden z. B. 600 Millisekunden gebraucht, d. h. alle diese Informationsverarbeitungsprozesse laufen mit Hochgeschwindigkeit ab.

4. Syntaktische und semantische Verarbeitungsprozesse

4.1 Experimente: korrekte und inkorrekte Sätze

Wie kann man unter den so gegebenen Umständen die semantischen und syntaktischen Verarbeitungsprozesse, die während der Satzverarbeitung gemeinsam ablaufen, genauer untersuchen? Hier haben die bildgebenden Verfahren, die neuerdings zur Verfügung stehen, viele neue Evidenzen darüber gebracht, wie einzelne Prozesse im Gehirn repräsentiert sind. Während bis vor zwanzig Jahren die Information, die wir von Patienten mit entsprechenden Sprachstörungen hatten, die hauptsächliche Basis unserer Modelle bildete, so können wir heute – mit all den damit gegebenen methodischen Beschränkungen, die die neuen Verfahren mit sich bringen – in das lebende, gesunde Gehirn schauen, um diese Sprachverarbeitungsprozesse abzubilden.

Das ermöglicht die Technik der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT). Sie misst den regionalen Blutfluss über den metabolischen Veränderungen, also die Sauerstoffveränderung im Blut. Aktivitäten von einzelnen Neuronen erfordern Sauerstoff, der durch das Blut transportiert wird. Da sauerstoffreiches Blut stärker paramagnetisch ist als sauerstoffarmes Blut, kann dies mit dem MRT gemessen werden und als Indiz für entsprechende Gehirnaktivitäten gelesen werden.

Wenn man diese Technik in einem Experiment nutzt, so kann man sehen, in welchen Regionen Hirnaktivitäten als Reaktion auf ganz bestimmte spezifische Inputs und dadurch ausgelöste Prozesse stattfinden.

Da die verschiedenen Informationen, um die es bei der Sprachverarbeitung geht, d. h. Syntax und Semantik im Satz stark miteinander verwoben sind, müssen diese experimentell segregiert werden. Eine Möglichkeit ist, in den Satz ganz bestimmte Fehler einzubringen, wobei der Fehlertyp für die jeweils relevante Ebene sensitiv gemacht sein muss. So kann man einen Satz durch einen Fehler, der auf semantischer Ebene liegt, semantisch inkorrekt machen (1).

(1) *Das Lineal wurde gefüttert.*

In diesem Fall erfordert das Verb ein Nomen als Subjekt des Passivsatzes, das mit einem semantischen Merkmal {+animate} verträglich ist. Syntaktische Inkorrektheit kann man dadurch herstellen, dass man nach einer Präposition, nach der eine Nominalphrase obligatorisch ist, ein Verb einfügt (2).

(2) *Die Gans wurde im gefüttert.*

Die Frage ist, ob und ggf. wie das Gehirn auf solche Fehler im Gegensatz zu einem korrekten Satz (3) reagiert.

(3) *Das Baby wurde gefüttert.*

Wenn Versuchspersonen solche systematisch variierten Sätze hören, werden unterschiedliche Hirnaktivitäten sichtbar. Auf inkorrekte Sätze reagiert das Gehirn mit mehr Aktivität als auf korrekte Sätze, und zwar im Wernicke-Areal, also im oberen Gyrus des Temporallappens.

Abb. 5

Abbildung 5 zeigt diesen Unterschied für semantisch inkorrekte Sätze gegenüber korrekten Sätzen. Wenn man die Areale der Aktivierung genauer betrachtet, fällt auf, dass innerhalb dieses Gyrus vor allem der hintere (posteriore) und der mittlere Anteil einen signifikanten Unterschied (durch * gekennzeichnet) in der Aktivierung zeigen, nicht aber der vordere (anteriore) Anteil.

Wenn es darum geht, syntaktische Fehler zu entdecken und zu verarbeiten, taucht eine signifikant vermehrte Aktivität gerade in diesem Areal im vorde-

Abb. 6

ren (anteriore) Anteil des oberen Temporalgyrus auf (Abb. 6). Dieses Areal scheint also für die Verarbeitung von syntaktischer Information spezifisch. Zusätzlich finden wir auch noch andere Gehirnregionen, die erhöhte Aktivierung zeigen. Dies ist das nahe am Broca-Areal gelegene frontale Operculum (ohne Abbildung). Auch dieses Areal erweist sich speziell für die Syntaxverarbeitung als relevant (Friederici et al. 2003).

4.2 Getrennte Netzwerke für Syntax und Semantik

Aufgrund der hier und in der Literatur berichteten Experimente liegt der Schluss nahe, dass es zwei verschiedene Netzwerke gibt (für einen Überblick siehe Friederici 2002).

Ein Netzwerk ist für die semantische Verarbeitung zuständig. Es umfasst den mittleren Anteil des oberen Temporalgyrus und die BA 45 im inferioren Frontalgyrus (Abb. 7, hellgrau markiert). Das zweite Netzwerk bezieht sich auf die syntaktische Verarbeitung, welches auch aus einem anterior temporalen und einem Anteil im Frontalgyrus (frontales Operculum (Abb. 7, dunkelgrau markiert) besteht. Diese beiden Netzwerke bilden parallele Netzwerke im Gehirn. Für die Integration von semantischer und syntaktischer Information kommt der hintere Anteil des oberen Temporalgyrus ins Spiel (Abb. 7, gestreift markiert). Von der Broca-Region (Abb. 7, weißer Kreis) war jetzt schon mehrfach die Rede, aber in den bisher berichteten Experimenten war sie nicht aktiv.

Abb. 7

4.3 Experimente: syntaktische Komplexität

Es stellt sich an dieser Stelle die Frage, welche Funktion der Broca-Region zukommt. Wenn ein Patient, der eine Läsion in diesem Areal hat, telegramm-artig spricht und keine komplexe Syntax mehr verarbeiten kann, dann müsste sie ja eigentlich in den Aktivitätsbildern immer dann auftauchen, wenn komplexe Syntax in irgendeiner Weise zu verarbeiten ist.

Um die Frage zu klären, wo sich die Aktivierungen zeigen, wenn es darum geht, syntaktisch zu verarbeiten, wurden 15 Studien daraufhin überprüft (Friederici 2004). Die Übersicht zeigt, dass Aktivierungen, im Broca-Areal nur für jene Studien zu finden sind, die syntaktische Komplexität variieren, und zwar im Englischen, im Deutschen und im Hebräischen. D. h. Aktivierungen im Broca-Areal scheinen universell dann aufzutauchen, wenn es darum geht, syntaktisch komplexe Sätze zu verarbeiten.

Was heißt nun „syntaktisch komplex“ und wie können wir diese Hypothese, die post-hoc aufgrund der Übersicht erstellt wurde, in einem Experiment überprüfen? Das Deutsche erlaubt es mit seinen syntaktischen Möglichkeiten recht gut, diesen Punkt zu überprüfen. So kann man z. B. den Versuchspersonen kanonische Sätze präsentieren, Sätze also, in denen man die normale Ordnung Subjekt – indirektes Objekt – direktes Objekt fin-det (4).

(4) *Heute hat der Vater dem Jungen den Lutscher geschenkt.*

Man kann die Konstruktion aber für die Versuchsperson dadurch etwas schwieriger gestalten, wenn man das indirekte Objekt in die erste Position des Satzes bringt (5):

(5) *Heute hat dem Jungen der Vater den Lutscher geschenkt.*

und noch schwieriger dadurch, dass ich nicht nur das indirekte, sondern auch das direkte Objekt vor das Subjekt setze (6):

(6) *Heute hat dem Jungen den Lutscher der Vater geschenkt.*

Wie zu erwarten war, wird in einer Bearbeitungsaufgabe der kanonische Satz als besser beurteilt als die anderen Optionen, aber alle drei Varianten werden als vom deutschen Muttersprachler als grammatisch beurteilt.

Nun ist es interessant zu sehen, wie diese verschiedenen Sätze das Broca-Areal modulieren. Die Ergebnisse dazu sind in Abbildung 8 wiedergegeben:

Abb. 8

Die Aktivierung im Broca-Areal (Abb. 8a), die in Form einer Kurve über die Zeit aufgetragen ist (Abb. 8b), ist für den kanonischen Satz am geringsten und für den Fall, dass beide Objekte nach vorne gebracht wurden am höchsten. Die Ergebnisse dieses Experiments erlauben uns festzustellen, dass das Broca-Areal wirklich systematisch als Funktion von syntaktischer Komplexität variiert (Friederici et al. 2006b).

4.4 Zwei Subnetzwerke für Syntax

Wenn wir nach diesen Ergebnissen festhalten können, dass das Broca-Areal für die Verarbeitung syntaktischer Hierarchien zuständig ist, wie ist dann der Unterschied zwischen dem frontalen Operculum und dem Broca-Areal funktionell zu bestimmen? In den oben erwähnten Experimenten war bereits ein Hinweis auf eine mögliche funktionelle Differenzierung enthalten. Das frontale Operculum war aktiv, wenn es um lokale syntaktische Verletzungen ging, das Broca-Areal, wenn es um die Verarbeitung syntaktischer Hierarchien ging. Dies legt die Hypothese nahe, dass es zwei neuronale Netzwerke für die Ebene der Syntaxverarbeitung gibt. Ein erstes Subnetzwerk besteht aus dem frontalen Operculum und dem vorderen Anteil des oberen Temporalgyrus,

das für die Bildung lokaler Phrasenstruktur verantwortlich ist. Ein zweites syntaktisches Netzwerk, das die Verarbeitung von hierarchischen Strukturen leistet, besteht aus dem Broca-Areal und dem hinteren Anteil des oberen Temporalgyrus.

Um diese Annahme zu überprüfen, wurde ein sprachlicher Input konstruiert, aus dem jede Semantik herausgenommen ist, der jedoch grammatische Struktur enthält.

Abb. 9

In Abbildung 9a ist eine Finite-State-Grammatik (FSG) dargestellt, bei der es nur eine lokale Abhängigkeit zwischen den Elementen A und B gibt. Immer wenn ein Element A kommt, kommt als nächstes Element ein Element aus der Kategorie B. Die verschiedenen A-Kategorie- und B-Kategorie-Silben sind in der unteren Hälfte der Abbildung aufgeführt. In Abbildung 9a ist eine einfache Phrasenstrukturgrammatik (PSG) dargestellt. Im Unterschied zur FSG werden hier einfache Hierarchien aufgebaut.

Diese beiden Regelsysteme mussten von zwei verschiedenen Versuchspersonengruppen zunächst einmal vor dem Kernspinexperiment gelernt werden. Während der Kernspintomographie musste bewertet werden, ob die dargebotene Sequenz bezüglich der jeweils erworbenen Regel korrekt war oder nicht.

Die Frage war, ob sich bei der Verarbeitung gleich langer Sequenzen aus diesen beiden Grammatik-Typen Aktivierungen in verschiedenen Hirnarealen beobachten lassen werden würden. Hat der Tatbestand, dass bei gleich langen Silbensequenzen und identischen Silben minimal andere syntaktische Strukturen vorliegen, Folgen? Die funktionellen Kernspinergebnisse erlauben es, diese Frage zu bejahen. Bei der Finite-State-Grammatik war das frontale Operculum aktiv, es gab aber keine Aktivierung im Broca-Areal. Bei der Phrasenstrukturgrammatik war ebenfalls das frontale Operculum aktiv, zusätzlich kam aber das Broca-Areal ins Spiel. Dies bestätigt die Hypothese, dass das

System für die Verarbeitung hierarchischer Sequenzen auf das Broca-Areal zurückgreifen muss (Friederici et al. 2006a).

Nun könnte es bei der gerade vorgeführten Versuchsanordnung jedoch sein, dass nicht völlig klar ist, ob die Versuchspersonen im zweiten Fall auch wirklich die Hierarchien nachvollzogen haben. Sie hätten das Problem eventuell auch durch Abzählen von Elementen einer Kategorie lokal lösen können: z. B. auf vier Elemente der einen Kategorie folgen vier Elemente der anderen Kategorie. Auch wenn die theoretische Annahme plausibel erscheint, dass ein System, das hierarchische Strukturen verarbeiten kann, sich dieses Verarbeitungssystem zu Nutze macht, so wurde doch ein weiteres Experiment notwendig, das eine nicht-hierarchische Lösungsmöglichkeit prinzipiell ausschließt. Die dazu erstellte, recht komplizierte Grammatik findet sich in Abbildung 10:

Abb. 10

In dieser Grammatik ist klar definiert, dass ein bestimmtes Element A – hier A₁ – nur mit einem bestimmten Element der Kategorie B – hier B₁ – zusammengehen kann. Wenn unter diesen Regeln die Versuchsperson in der Sequenz ein falsches Element als Fehler erkennt, so zeigt das, dass sie in der Tat diese hierarchischen Strukturen, d. h. die Abhängigkeit von Element A₁ zu Element B₁ sowie von A₂ und B₂ und von A₃ und B₃ gelernt hat.

Die Ergebnisse des Experimentes, das mit dieser Regelstruktur arbeitete, bestätigten die Annahme, dass es in der Tat das Broca-Areal ist, das die hierarchischen Strukturen verarbeitet (ohne Abbildung; Bahlmann/Schubotz/Friederici, eingereicht).

Es gibt offensichtlich zwei funktionell unterschiedliche Netzwerke für die Syntaxverarbeitung. Um die Hypothese von zwei Subnetzwerken für die Syntaxverarbeitung darüber hinaus zu unterstützen, wäre es von Bedeutung, zu-

sätzlich über neuroanatomische Daten zu verfügen, die diese Hypothese bestätigen. Die Kernspintomographie erlaubt es nicht nur, die geschilderten funktionalen Zusammenhänge darzustellen, sondern auch, neuroanatomisch relevante Faserbündel zu sehen, über die verschiedene Hirnareale eines Netzwerkes miteinander strukturell verbunden sind.

Abb. 11

Die Ergebnisse einer solchen strukturellen Konnektivitäts-Analyse bei vier Versuchspersonen (Vp) zeigt die Abbildung 11. Man sieht zwei unterschiedliche Verlaufsrichtungen von Faserbündeln: in Abb. 11a ein Faserbündel, das vom frontalen Operculum in den vorderen Anteil des Temporallappens führt, und in Abb. 11b ein Faserbündel, das vom Broca-Areal in den hinteren Teil des Temporallappens führt. Die Existenz dieser beiden unterschiedlichen strukturellen Verbindungen ergänzt den funktionellen Befund und liefert die neuronale Grundlage für die Hypothese von zwei verschiedenen syntaktischen Netzwerken, eins für die Verarbeitung lokaler Syntax und eins für die Verarbeitung hierarchischer Strukturen.

5. Der zeitliche Ablauf

Bisher wurde der Bezug von Funktionen auf bestimmte Areale und die sich dadurch abzeichnenden Netzwerke für syntaktische und semantische Prozesse in der linken Hemisphäre beschrieben. Die im oben vorgestellten Modell (Abb. 4) entscheidende Frage über den zeitlichen Ablauf der verschiedenen Prozesse ist bisher unbeantwortet geblieben. Dieses Modell geht davon aus, dass die syntaktische Strukturierung der Interpretation der semantischen und thematischen Relationen vorausgeht. Die Methode des ereignis-

korrelierten Hirnpotentials (EKP) erlaubt es Millisekunde für Millisekunde zu sehen, wie große Anzahlen von synchronen aktiven Neuronen sich verhalten (siehe Abb. 12).

Abb. 12

Um ein EKP zu erhalten, muss man über eine Reihe von Sätzen oder Wörtern identischer Struktur mitteln, nur so erhält man eine Hirnkurve, bei der zeitlich aufeinanderfolgende Komponenten, z. B. N400 und P600 auszumachen sind (Negativität ist in den Abbildungen jeweils nach oben abgetragen). Im folgenden Experiment wurde das gleiche Stimulusmaterial wie oben benutzt, um jetzt zu sehen, inwieweit man Aussagen über die Serialität der einzelnen Verarbeitungsprozesse machen kann.

Zunächst wird die Frage der semantischen Verletzungen überprüft. Wenn man vergleicht, was geschieht, wenn ein identisches Wort einmal in semantisch korrektem Zusammenhang auftaucht und einmal semantisch inkorrekt verwendet wird, ergibt sich das folgende Bild. Die in den Abbildungen dargestellte Aktivierung fängt jeweils am Anfang des kritischen Wortes an. Das kritische Wort ist jeweils das identische Wort in unterschiedlichem Kontext, der einmal semantisch korrekt und einmal inkorrekt ist. Die Hirnreaktion auf das semantisch falsche Wort, dargestellt durch die gepunktete Linie, ist sehr viel stärker als die auf den korrekten, dargestellt durch die durchgezogene Linie (Abb. 13). Es ergibt sich hier eine Negativierung um 400–500 Millisekunden, genannt N400 Komponente.

Bei der syntaktischen Verletzung, dargestellt durch die gepunktete Linie, zeigt sich Folgendes (Abb. 14): eine sehr frühe Aktivierung des Gehirns in Reaktion auf diesen lokalen syntaktischen Fehler, die schon ungefähr bei 150–160 Millisekunden auftaucht, und ihr Maximum links anterior (an Elek-

Abb. 13

trode F7) hat. Deshalb spricht man von der *Early-Left-Anterior-Negativity* (ELAN). Es gibt eine zweite Komponente bei der Verarbeitung solcher syntaktisch falscher Sätze, eine spätere Komponente, die um die 600 Millisekunden stattfindet und sich in einer zentro-parietalen Positivierung (an Elektrode Pz) darstellt und P600 genannt wird. Nun haben wir zwei Komponenten, die uns Syntaxverarbeitung zu signalisieren scheinen.

Abb. 14

Wie passen diese Ergebnisse mit unserem Modell zusammen? Aus den Experimenten, die von uns durchgeführt wurden (Friederici et al. 1993, 1996; Hahne/Friederici 1999, 2002), lässt sich schließen, dass in einer ersten Phase von um die 160 Millisekunden wirklich syntaktische Strukturierung als hochautomatischer Prozess abläuft. In einer zweiten Phase laufen dann semantische und thematische Prozesse ab und in einer dritten Phase um die 600 Millisekunden kommt es zur Integration bzw. zu einer Reanalyse, in dem Moment, in dem der Satz syntaktisch falsch ist (Friederici 2002).

6. Prosodische Verarbeitungsprozesse

6.1 Der Ort der Verarbeitung

Neben diesen linguistisch klassischen Teilen der Informationsverarbeitung steuert aber, wie im obigen Modell (Abb. 4) angedeutet, bei der akustischen Verarbeitung die Prosodie eine wichtige Information bei. Bei Experimenten, die Aussagen über diesen Punkt erlauben sollen, geht es daher auch darum, die Wirkung dieses einzelnen Aspektes zu isolieren. Wie lässt sich das im Hinblick auf die prosodischen Eigenschaften leisten? In einer normalen Äußerung sind natürlich Syntax, Semantik und prosodische Information miteinander verwoben. Jeder beliebige korrekte Satz kann dafür als Beispiel dienen (7).

(7) *Die erfahrene Ärztin fährt zu dem kranken Kind.*

Die semantische Information kann aus solch einem Satz dadurch systematisch entfernt werden, dass alle Inhaltswörter durch Pseudowörter ersetzt werden (8).

(8) *Die gewöldichte Girle tunichtet dem psalteren Kofelen.*

Man kann aber auch die Information so weit reduzieren, dass überhaupt keine segmentale Information mehr in dem Sprachinput da ist, sondern nur noch die prosodische Information (Tonhöhenverlauf) vorhanden ist.² Man kann instrumentalphonetisch nachweisen, dass in diese reduzierte Form zwar alle segmentale Information weggefiltert ist, die prosodische Struktur aber erhalten geblieben ist.

Was macht das Gehirn, wenn es nur diese prosodische Struktur verarbeitet? Wie man in Abbildung 15 sieht, zeigen sich hier in der rechten Hemisphäre signifikante Aktivierungen. Im einzelnen geht es wiederum um den Tempo-

Abb. 15

² In dieser gedruckten Fassung lässt sich das dazugehörige Beispiel logischerweise nicht reproduzieren.

rallappen mit seinen anterioren und posterioren Anteilen, und um das frontale Operculum (Meyer et al. 2002, 2003). Es sind also die Areale in der rechten Hemisphäre, die homolog sind zu denen, die in der linken Gehirnhälfte die syntaktische und semantische Verarbeitung leisten, die für die prosodische Verarbeitung zuständig sind.

6.2 Interaktion zwischen den Hemisphären

Aus diesen – und vielen weiteren – Experimenten kann man den Schluss ziehen, dass die Areale in der rechten Hemisphäre, die homolog zu denen sind, die Syntax und Semantik in der linken Hemisphäre verarbeiten, die prosodische Verarbeitung leisten. Wie lässt sich dann aber modellieren, dass wir beim Zuhören diese Informationen zusammenkommen?

Dazu muss die Frage beantwortet werden, ob es eine Kommunikation zwischen den Hemisphären gibt. Neuroanatomisch werden die beiden Hemisphären durch ein Faserbündel, dem sogenannten Balken oder Corpus Callosum verbunden. Ob dieses Faserbündel relevant für die Interaktion von sprachlichen Verarbeitungsprozessen der RH und der LH ist, haben wir in einem Experiment mit Patienten mit Läsionen in Corpus Callosum untersucht (Friederici et al. 2007).

Zunächst einmal haben wir Versuchspersonen ohne Läsionen im Corpus Callosum mit Sätzen wie (9), (10) und (11) konfrontiert. In (9) ist ganz klar, dass nach dem Verb *arbeiten* die Grenze einer Intonationsphrase liegt.

(9) *Peter verspricht Anna zu arbeiten und das Büro zu putzen.*

In Satz (10) liegt eine Intonationsphrasengrenze hinter *verspricht*, und obwohl der Satz bis zu dem Wort *Anna* in geschriebener Form identisch ist, hat man trotzdem schon vorher Information darüber, welches Verb nach *Anna* zu erwarten ist, ob es eher ein transitives oder ein intransitives ist.

(10) *Peter verspricht, Anna zu entlasten und das Büro zu putzen.*

Wie schon erwähnt, kann man zusätzliche Erkenntnis dadurch gewinnen, dass man das System auf einen falschen Verarbeitungsweg bringt. Das funktioniert dadurch, dass man in Satz (9) eine Intonationsphrasengrenze hinter das Verb *verspricht* setzt, dann aber ein Verb einfügt, das aufgrund dieser Intonationsphrasengrenze nicht zu erwarten ist (11). Wie reagiert das Gehirn an dieser Stelle? Nutzt es die prosodische Information zur Voraussage, welches die syntaktische Struktur und welches das zu erwartende Verb in der zweiten Hälfte des Satzes sein soll. Für den normalen Sprecher hören sich Beispiele wie (11), wenn vor *Anna* eine Intonationsphrasengrenze signalisiert wird³, merkwürdig an.

(11) *Peter verspricht, Anna zu arbeiten und das Büro zu putzen.*

³ Auch dieser auditive Effekt lässt sich hier nicht reproduzieren; die Strukturierung wird durch die „falsche“ Kommasetzung angedeutet.

Auch wenn das kein grober Fehler ist, so reagiert aber das Gehirn massiv darauf (vergleiche Abb. 16). An der Stelle, an der das zweite Verb im Satz kommt, reagiert das Gehirn mit einem „Mismatch Effekt“. D.h. das Gehirn hat offensichtlich eine Voraussage gemacht auf einen ganz bestimmten Verbtyp, jedoch wird im Input ein anderer Verbtyp bzw. eine andere Verbklasse geliefert. Das zeigt zunächst einmal, dass prosodische Information die syntaktische Verarbeitung beeinflussen kann und dass syntaktische und prosodische Informationen während des Sprachverstehens interagieren.

6.3 Vermittlung zwischen den Hemisphären

Für die Verbindung zwischen den Hemisphären sollte das Corpus Callosum verantwortlich sein, jenes geordnete Faserbündel, das die beiden Hemisphären miteinander verbindet. Zur Überprüfung dieser Hypothesen haben wir Patienten untersucht, die Läsionen in diesem Faserbündel hatten, d. h. bei denen die linke und die rechte Hemisphäre nicht mehr einwandfrei miteinander kommunizieren konnten. Aus einer Patientendatenbank von 1.600 Patienten ließen sich einige wenige Patienten ermitteln, die eine solche präzise lokalisierte Läsion (auf dem vorderen oder dem hinteren Anteil des Corpus Callosum) hatten (Abb. 16), die es uns erlaubte, entsprechende Untersuchungen durchzuführen.

Abb. 16

Wenn die rechte Hemisphäre zwar normalerweise die linke beeinflusst, sie aber aufgrund der Läsion nicht beeinflussen kann, würde man voraussagen, dass man bei diesen Patienten den bei den normalen Probanden auftretenden Effekt nicht sehen sollte. Die Ergebnisse unserer entsprechenden Experimente sind in Abbildung 17b und 17c dargestellt.

Zum Vergleich sind die Daten für die Probanden ohne Läsionen (Kontrollpersonen) mit angegeben (Abb. 17a). Diese normalen Probanden zeigen den Mismatch Effekt (N400), wenn sie mit einer Äußerungen mit inkorrektter Prosodie wie (11) konfrontiert werden, in höherem Ausmaß als die Patientengruppen. Allerdings zeigt sich dieser Effekt (N400) auch bei den Patienten, bei denen die Läsionen im vorderen Anteil des Corpus Callosum (anterior CC) liegen, wenn auch in etwas geringerem Ausmaß (Abb. 17b). Dagegen lässt sich bei Patienten mit Läsionen im hinteren Anteil des Corpus Callosum (posterior CC) kein solcher Effekt nachweisen (Abb. 17c). Das bedeutet, dass die in der rechten Hemisphäre verarbeitete prosodische Information die syntaktische Verarbeitung in diesem Fall nicht in die Irre geführt hat, also keine falsche Annahme über das folgende Verb provoziert hat.

Abb. 17

Bevor wir allerdings endgültig zu dem Schluss kommen, dass dies in der Tat der Fall ist, muss demonstriert werden, dass diese Patienten im Prinzip einen N400-Effekt zeigen können, und zwar dann, wenn er nicht von der prosodischen Bedingung abhängig ist. Hierzu wurden wiederum die semantisch inkorrekten Sätze genommen, von denen wir aus den früheren Experimenten wissen, dass sie eine N400-Komponente produzieren. In diesem Fall zeigen nicht nur die Probanden ohne Läsionen und die mit Läsionen im anterioren Anteil des Corpus Callosum diesen Effekt, sondern auch die mit Läsionen im posterioren Anteil des Corpus Callosum. In diesem Fall zeigt also auch die letzte Gruppe keinerlei Auffälligkeit. Das bedeutet, dass die Patienten mit posterioren Läsionen diesen Effekt nur dann nicht zeigen, wenn er abhängig ist von der prosodischen Information.

7. Schluss

Aufgrund der dargestellten Ergebnisse lässt sich die Relation zwischen Sprache und Gehirn wie folgt spezifizieren. Sprachverarbeitung basiert zunächst auf unabhängigen neuronalen Netzwerken, die in der linken Hemisphäre lokalisiert und in differenzierter Weise für die semantische und syntaktische Verarbeitung zuständig sind. Innerhalb der Syntaxverarbeitung lassen sich zwei Subnetzwerke spezifizieren, eines, welches die Verarbeitung der lokalen Phrasenstruktur unterstützt und eines welches für die Verarbeitung hierarchischer Strukturen relevant ist. Während der auditorischen Sprachverarbeitung leistet die rechte Hemisphäre, zeitgleich zu den Prozessen der linken Hemisphäre, die prosodische Verarbeitung. Das Corpus Callosum, welches die beiden Hemisphären miteinander verbindet, sichert die Interaktion von syntaktischer und prosodischer Information im normalen Sprachverstehensprozess.

Literatur

- Bahlmann, J./Schubotz, R./Friederici, A.D. (eingereicht): The role of Broca's area in hierarchical processing: fMRI evidence from a context-free grammar.
- Brodman, K. (1909): Vergleichende Lokalisationslehre der Großhirnrinde. Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig.
- Broca, P. (1865): On the location of the faculty of articulate language in the left hemisphere of the brain. In: *Bulletin of the Society of Anthropology*, 6, S. 377–393.
- Wernicke C. (1876): Das Urwindungssystem des menschlichen Gehirns. In: *European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience*, 6, S. 298–326
- Friederici, A. D. (2002): Towards a neural basis of auditory sentence processing. In: *Trends in Cognitive Sciences*, 6, S. 78–84.
- Friederici, A. D./Hahne, A./Mecklinger, A. (1996): The temporal structure of syntactic parsing: Early and late event-related brain potential effects elicited by syntactic anomalies. In: *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 22, S. 1219–1248.
- Friederici, A. D./Pfeifer, E./Hahne, A. (1993): Event-related brain potentials during natural speech processing: Effects of semantic, morphological and syntactic violations. In: *Cognitive Brain Research*, 1, S. 183–192.
- Friederici, A. D./Rüschmeyer, S.-A./Hahne, A./Fiebach, C. J. (2003): The role of left inferior frontal and superior temporal cortex in sentence comprehension: Localizing syntactic and semantic processes. *Cerebral Cortex*, 13, S. 170–177.
- Friederici, A. D. (2004): The neural basis of syntactic processes. In: Gazzaniga, M. S. (ed.): *The Cognitive Neurosciences III* Cambridge, MA: MIT Press. S. 789–801.
- Friederici, A. D./Bahlmann, J./Heim, S./Schubotz, R. I./Anwander, A. (2006a): The brain differentiates human and non-human grammars: Functional localization and structural connectivity. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 103, S. 2458–2463.
- Friederici, A. D./Fiebach, C. J./Schlesewsky, M./Bornkessel, I./von Cramon, D. Y. (2006b): Processing linguistic complexity and grammaticality in the left frontal cortex. In: *Cerebral Cortex*, 16, S. 1709–1714.
- Friederici, A. D./von Cramon, D. Y./Kotz, S. A. (2007): Role of the corpus callosum in speech comprehension: Interfacing Syntax and Prosody. In: *Neuron*, 53, S. 135–145.

- Hahne, A./Friederici, A. D. (1999): Electrophysiological evidence for two steps in syntactic analysis: Early automatic and late controlled processes. In: *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11, S. 194–205.
- Hahne, A./Friederici, A. D. (2002): Differential task effects on semantic and syntactic processes as revealed by ERPs. In: *Cognitive Brain Research*, 13, S. 339–356.
- Meyer, M./Alter, K./Friederici, A. D./Lohmann, G./von Cramon, D. Y. (2002): fMRI reveals brain regions mediating slow prosodic modulations in spoken sentences. In: *Human Brain Mapping*, 17, S. 73–88.
- Meyer, M./Steinhauer, K./Alter, K./Friederici, A. D./von Cramon, D. Y. (2004): Brain activity varies with modulation of dynamic pitch variance in sentence melody. In: *Brain and Language*, 89, S. 277–289.
- Petrides, M./Pandya, D. N. (1994): Comparative architectonic analysis of the human and the macaque frontal cortex. In: Boller, F./Grafman, J. (eds.) (1994): *Handbook of Neuropsychology*. Vol. 9. Elsevier, Amsterdam. S. 17–58.
- Sanides, F. (1962): *Die Architektur des menschlichen Stirnhirns*. Berlin: Springer.