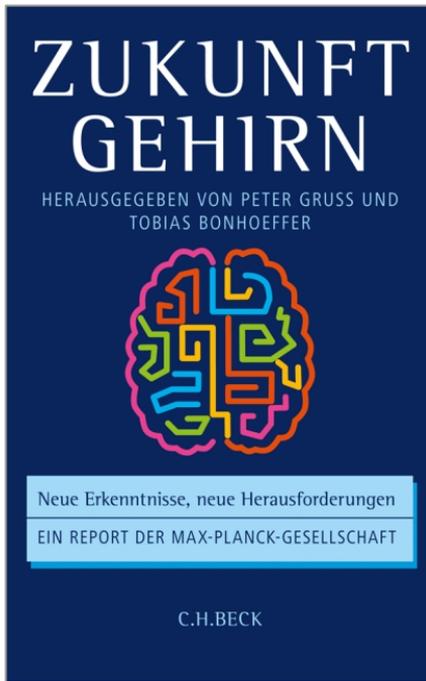


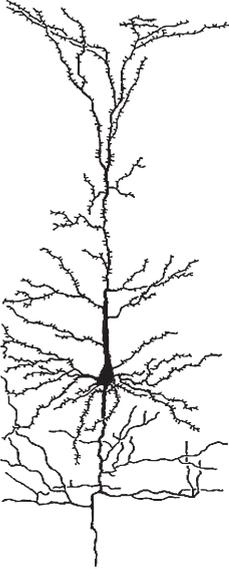
Unverkäufliche Leseprobe



**Tobias Bonhoeffer, Peter Gruss (Hrsg.)**  
**Zukunft Gehirn**  
Neue Erkenntnisse, neue Herausforderungen.  
Ein Report der Max-Planck-Gesellschaft

## Vorwort

Von Tobias Bonhoeffer und Peter Gruss



Pyramidenzelle der Großhirnrinde, gezeichnet von Santiago Ramón y Cajal

*«Der Garten der Neurologie hält für den Forscher die aufregendsten Wunder und unvergleichliche ästhetische Eindrücke bereit. In ihm fand mein ästhetisches Verlangen schließlich seine endgültige und restlose Befriedigung. Wie der Insektenforscher auf der Jagd nach den farbenfrohen Schmetterlingen, so verfolgte mein Interesse im Blumengarten der grauen Substanz die Zellen mit feinen und eleganten Formen, die geheimnisvollen Schmetterlinge der Seele, deren zarte Flügel eines Tages – wer weiß? – das Geheimnis des Geistes enthüllen könnten.»*

So beschrieb der Gründervater der modernen Neurowissenschaften, der spanische Neuroanatom Santiago Ramón y Cajal seine Faszination für die Gehirnforschung. Er verließ sich allein auf von ihm entwickelte Färbemethoden und ein paar Mikroskope. Heute, ungefähr 100 Jahre später, haben die technischen Mög-

lichkeiten mit den damaligen kaum noch etwas zu tun, dennoch ist die grundlegende Faszination der Gehirnforschung die gleiche geblieben. Das Gehirn ist zwar lediglich ein Organ des Körpers unter anderen, aber mit seinen 100 Milliarden Nervenzellen und seinen 100 Billionen Verbindungen ermöglicht es uns, die Umwelt zu erfahren und zu verändern, zu kommunizieren, Information zu speichern, ein ganzes Leben zu erinnern sowie Leid, Freude, Mitgefühl und andere Emotionen zu empfinden. Einige dieser Nervenzellen in ihrer ganzen Schönheit (siehe zum Beispiel Abbildung oben) im Mikroskop vor Augen zu haben und sich dabei vorzustellen, dass ihre präzise Verschaltung derart komplexe Ver-

haltensmuster bewirkt – das war es, was Ramón y Cajal seinerzeit faszinierte. Heute sehen wir nicht nur einige wenige Nervenzellen in Mikroskopschnitten, sondern wir können an Tausenden von ihnen in lebendem Gewebe beobachten, wie sie sich in Form und Funktion unter dem Einfluss der Umwelt ändern. Wir haben im wahrsten Sinne des Wortes Einblicke in das Gehirn, die uns noch vor wenigen Jahren als etwas zu blühende Fantasie ausgelegt worden wären.

Das Gehirn ist ein Körperteil, das in Anbetracht dessen, was es leistet, erstaunlich wenig wahrgenommen wird. Vielen Menschen ist überhaupt nicht bewusst, wie ungeheuer komplexe Aufgaben es anscheinend mühelos löst. Betrachten wir so etwas vermeintlich Banales wie einen Spaziergang zu zweit im Park. Das Gehirn hält dabei ohne jede Schwierigkeit unseren Körper im Gleichgewicht und sorgt dafür, dass er sich fortbewegt. Dabei hilft das visuelle System (aber auch das Gedächtnis), sich auf den Wegen zurecht zu finden und Hindernissen auszuweichen. Gleichzeitig können wir problemlos die Sprache unseres Begleiters hören und verstehen, währenddessen eigene Erinnerungen aus dem Gedächtnis aufrufen und angemessen auf die uns gestellten Fragen antworten. Schon jede einzelne dieser Aufgaben stellt selbst für höchstentwickelte Computer eine ungemaine Herausforderung dar. Jeder, der sich mit einem Spracherkennungssystem herumgeschlagen hat, weiß, wie fehleranfällig solche Systeme sind. Und in den meisten Fällen verstehen sie Sprache nicht einmal wirklich, sondern erkennen lediglich vorgegebene Wörter und Phrasen. Das Gehirn hingegen löst alle diese Aufgaben – Bewegung, visuelles Erkennen, Erinnerung, Hören, Sprachverständnis und Sprachproduktion – mühelos gleichzeitig und ist doch nur ein relativ kleines Organ von etwas mehr als einem Kilogramm Gewicht und mit einem Energieverbrauch von wenigen Watt. Wie ist das möglich? Was sind seine Tricks? Und warum ist das Gehirn in vielerlei Hinsicht so viel besser als ein Computer? Mit solchen Fragen beschäftigt sich die Hirnforschung. Einmal um daraus für technische Systeme zu lernen, manchmal, um die Ursachen von Krankheiten besser zu verstehen, aber sehr oft aus schierer Neugier, um eines der größten Rätsel der Natur vielleicht nicht ganz zu ergründen, aber doch besser zu verstehen.

Die letzten Jahre haben der Hirnforschung einen enormen Erkenntnisgewinn gebracht. Wer hätte noch vor einigen Jahren geglaubt, dass wir inzwischen mit neurowissenschaftlichen Methoden die Grundlagen von Entscheidungsfindung, Spracherwerb und sogar Empathie untersuchen

können. Zu einem nicht geringen Teil ist diese Erkenntnis durch technischen Fortschritt bedingt. Die Kernspinresonanztomographie ermöglicht es uns, die Gehirnaktivität im Menschen zu kartieren und damit zu verstehen, welche Gehirnbereiche aktiviert werden, wenn wir Entscheidungen treffen, eine Sprache lernen oder Mitleid empfinden. Aber nicht nur das, es gibt inzwischen genetische Methoden, die Nervenzellen von Mäusen in Hunderten von verschiedenen Farben aufleuchten zu lassen (siehe z. B. Kap. 3, Abb. 5) und ihre Veränderung im lebenden Tier – anatomisch wie funktionell – unter dem Einfluss der Umwelt zu untersuchen. Man kann dem Gehirn buchstäblich bei der Arbeit zusehen. Darüber hinaus beginnen wir zu verstehen, welche Moleküle für die Funktion des Gehirns, aber auch für seine richtige Entwicklung unabdingbar sind, mit der Folge, dass neurologische und auch psychiatrische Erkrankungen plötzlich viel verständlicher werden. Auch wenn es bis zu ihrer Heilung in vielen Fällen noch ein steiniger Weg ist, wissen wir zumindest, in welcher Richtung wir arbeiten müssen, um Krankheiten wie Parkinson oder Alzheimer, aber auch Depression oder Schizophrenie zu besiegen. Es wird auch überlegt, wie sich die Leistungsfähigkeit des Gehirns in bestimmten Bereichen verbessern lässt. Und schließlich und letztlich beginnt unser immer genaueres Verständnis von Gehirnprozessen auch gesellschaftliche und philosophische Implikationen zu haben, wie sie sich etwa in der Frage artikulieren, ob und wie es unser Rechtssystem beeinflussen würde, wenn wir bessere «Lügendetektoren» bauten, oder wie moderne neurowissenschaftliche Erkenntnis das alte Problem des freien Willens neu beleuchtet.

Ein großer Teil der Faszination für Gehirnforschung rührt sicher daher, dass ihre Erkenntnisse uns alle betreffen. Unser Selbstverständnis ist in hohem Maße durch das Verständnis von Gehirnfunktionen geprägt, und nicht selten hört man die Befürchtung, ein völliges Verständnis des menschlichen Gehirns könnte Gefühle wie Liebe, Neid, Missgunst, Mitleid, kurz die menschliche «Seele» entzaubern. Als Naturwissenschaftler glauben wir beide, dass alle kognitiven, psychischen und, wenn man dies so nennen will, auch «seelischen» Vorgänge auf biologischen und physikalisch-chemischen Abläufen beruhen. Nur, die Einsicht, dass diese Prozesse naturwissenschaftliche Grundlagen haben, nimmt ihnen nicht die Faszination oder ihren mystischen Zauber. Ganz im Gegenteil, die Erkenntnis, dass die Natur in der Lage ist, ein Gebilde entstehen zu lassen, das zu derart komplexen Leistungen fähig ist wie das Gehirn, ist ein ums andere Mal überwältigend.

Das vorliegende Buch ist ein Lesebuch über das Gehirn. Jedes Kapitel ist so angelegt, dass es für sich steht. Die Kapitel greifen einzelne besonders relevante oder auch besonders faszinierende Aspekte der Gehirnforschung auf und versuchen so dem Leser, gewissermaßen häppchenweise, moderne Hirnforschung nahezubringen. Die dargestellten Themen veranschaulichen, worauf sich unser modernes Verständnis des Gehirns begründet. Es entwickelt sich nach einem im Verlaufe der Evolution entstandenen genetischen Programm, das vorgegeben ist und bereits eine «innere Welt» enthält. Diese wird im ständigen und lebenslangen Dialog mit der Umwelt in vielfacher Weise im Sinne einer optimalen Informationsverarbeitung angepasst. Nervenzellen gehen nur dann dauerhafte Verbindungen ein, wenn diese durch elektrische Aktivität (also Nutzung) bestätigt werden. Beim Lernen und Erinnern können in manchen Hirnregionen lebenslänglich neuronale Verbindungen verändert werden. Auch unsere Sinneswahrnehmungen nutzen ein «internes Weltmodell», das ständig justiert wird, um etwa Helligkeit, Lautstärke oder Gerüche zu interpretieren. Auch wenn «Neuronen sich entscheiden», wenn Sprachvermögen entwickelt wird oder wenn Gefühle wie Empathie entstehen, formt und moduliert die Außenwelt Strukturen und Funktionen des Gehirns.

Mit den immer tieferen Einblicken moderner Hirnforschung in die faszinierende Komplexität selbst einfachster Gehirne – wie z.B. der hier beschriebenen Wüstenameisen – wird deutlich, wie im Verlaufe der Evolution immer leistungsfähigere Module entstanden sind. Sicher, mit der Erforschung der Funktionen unserer weitgehend mit sich selbst beschäftigten Hirnrinde, unserer Wahrnehmungen oder auch unserer Gefühle stehen wir erst am Anfang. Dennoch rückt in den Bereich des Erklärbaren oder zumindest Vorstellbaren, wie höhere kognitive Leistungen entstehen. Wie an der Frage nach dem freien Willen des Menschen demonstriert wird, können neuronale Prozesse unsere Entscheidungen und Handlungen begründen, selbst wenn nicht alle Variablen in unser Bewusstsein vordringen.

Das Lesebuch spannt den Bogen weiter von der Rolle der Stammzellen als Teil der lebenslangen Anpassungsfähigkeit des Gehirns über die grundlegenden Mechanismen des noch wenig erforschten Schlafes bis hin zur Diskussion moderner Bildgebung (Neuroimaging) für strafrechtliche Zwecke. Alle diese Entwicklungen betreffen unmittelbar unser Selbstverständnis und werden uns in Zukunft nicht nur im neurowissenschaftlichen, sondern auch im gesellschaftlichen Diskurs beschäftigen.

Wir wollen mit diesem Buch zeigen, dass die Gehirnforschung einer der aufregendsten Wissenschaftszweige unserer Zeit ist, unabhängig davon, ob wir nun die Navigation von Ameisen im heißen Wüstensand oder die Implikationen der Gehirnforschung für unser Rechtssystem betrachten. Wir wünschen Ihnen, lieber Leser, eine spannende Lektüre und würden uns freuen, wenn Sie nach dieser unsere Faszination für die Erforschung des Gehirns teilen.

## 5 **Den Bär schubst der Tiger** *Wie Sprache im Gehirn entsteht*

Von Angela D. Friederici

Der Mensch unterscheidet sich von anderen Spezies vor allem durch seine Sprachfähigkeit. Zwar können andere Spezies auf mannigfaltige Weise miteinander kommunizieren, jedoch vermögen sie nicht, Sprache zu erwerben und zu verwenden.

Um diese Aussage zu belegen, muss zunächst definiert werden, was mit Sprache gemeint ist. Sprache ist ein komplexes System, das aus einer Reihe von verschiedenen Komponenten besteht, ohne deren Zusammenspiel die Produktion und das Verstehen von Sätzen und Nebensätzen nicht möglich sind. Zu diesen Komponenten gehören zum einen die Sprachlaute (Phonologie) und die Wörter (Lexikon) einer Sprache, zum anderen aber – als wichtigste Komponente einer Sprache – die Grammatik (Syntax). Alle Sprachen der Welt verfügen über diese Komponenten, auch wenn sie jeweils unterschiedlich realisiert sind. Vor allem variieren die Wörter von Sprache zu Sprache. Darüber hinaus unterscheiden sich die verschiedenen Sprachen der Welt auch bezüglich ihrer Grammatik, was uns das Lernen einer Fremdsprache im Erwachsenenalter oft schwer macht.

Es ist faszinierend zu sehen, dass jedes Kind, in welche Sprachumgebung auch immer geboren, in der Lage ist, diese Sprache mühelos zu erlernen. Darüber hinaus ist interessant zu sehen, dass die Entwicklungsverläufe des Spracherwerbs in allen Sprachen der Welt gleich ablaufen: von der Schreiphase über die Lallphase zur ersten Wortproduktion und von da aus über die Phase der Zwei-Wort-Sätze hin zu komplexeren Satzstrukturen und Nebensatzkonstruktionen. Dies gilt erstaunlicherweise auch für Kinder, die taub bzw. gehörlos geboren wurden, solange sie eine Gebärdensprache als «muttersprachlichen» Input bekommen. Gehörlose Kinder durchlaufen die gleichen Entwicklungsphasen wie hörende Kinder und fangen bereits in der Lallphase an, ihre Hände als Ausdrucksmittel zu verwenden.

Diese Beobachtungen legen nahe, dass kindlicher Spracherwerb einem

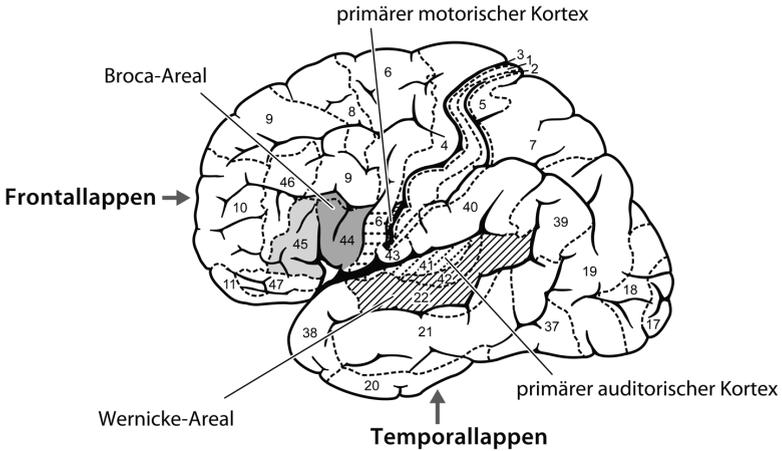
biologischen Programm folgt, welches, sofern das Kind Sprachinput bekommt, automatisch abläuft. Ist Sprachinput nicht gegeben, wie zum Beispiel bei dem berühmten Fall Kaspar Hauser, entwickelt sich die volle Sprachfähigkeit nicht.<sup>1</sup> Ähnlich wie bei der Entwicklung des visuellen Systems ist die Ausdifferenzierung des Sprachsystems auf Input angewiesen und richtet sich auf die jeweilige Sprache aus, die es als Input bekommt.

Sofern Sprache also einem biologisch vorgegebenen Programm folgt, liegt die Frage nach den biologischen Grundlagen nahe. In den vergangenen Jahren haben eine Reihe von Studien versucht, den genetischen Grundlagen der Sprache auf die Spur zu kommen. Diese Studien liefern erste Hinweise darauf, dass genetische Variationen deutliche Effekte auf die Gehirnentwicklung haben, insbesondere auch auf Hirnregionen, von denen wir wissen, dass sie für die Sprachverarbeitung relevant sind.<sup>2</sup>

### **Neuronale Grundlagen der Sprache beim Erwachsenen**

Dass die Sprachfähigkeit vom Intaktsein des Gehirns abhängt, wissen wir seit den ersten Berichten von Patienten mit Sprachstörungen, bei denen Hirnschädigungen durch Schlaganfall nachgewiesen wurden.<sup>3</sup> Seit gut zehn Jahren erlaubt uns die Technik der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT), die Hirnaktivierung als Antwort auf einen bestimmten Input und den dadurch ausgelösten Verarbeitungsprozess zu messen. Auf diese Weise kann ermittelt werden, welche Hirnregionen für die Verarbeitung von phonetischer, semantisch-lexikalischer, syntaktischer und prosodischer Information zuständig sind und ob dies für alle Sprachen der Welt gleich ist.

Untersuchungen zur Sprachverarbeitung mithilfe der fMRT wurden für so unterschiedliche Sprachen wie das Englische, Japanische, Deutsche, Italienische, Hebräische, Niederländische, Französische und Thailändische durchgeführt.<sup>4</sup> Obwohl bei diesen Untersuchungen unterschiedliches Sprachmaterial zur Anwendung kam und verschiedene Aufgabenstellungen verwendet wurden, konnten für die einzelnen Sprachen jeweils gleichartige zerebrale Aktivierungsmuster beobachtet werden. Generell werden semantische und syntaktische Aspekte der Sprachverarbeitung von neuronalen Netzwerken verarbeitet, die jeweils links frontale und temporale Hirnregionen involvieren. Die Verarbeitung syntaktischer Information wird vom sogenannten Broca-Areal und dem anterioren so-



*Abbildung 1:* Klassische Sprachzentren in der linken Hemisphäre. Nummern markieren zytoarchitektonisch unterschiedliche Areale nach Brodmann (1909). Brodmann-Areale (BA) 44 und 45 bilden das Broca-Areal, das im inferioren Teil des Frontallappens (im inferioren frontalen Gyrus, IFG) gelegen ist. BA 42 und 22 gelten als das Wernicke-Areal, das im oberen Anteil des Temporallappens (im superioren temporalen Gyrus, STG) gelegen ist.

wie posterioren Anteil des superioren Gyrus temporalis (STG) unterstützt. Semantische Prozesse basieren auf einem Netzwerk, welches sowohl den mittleren und den superioren Temporallappen als auch den inferioren Frontalgyrus, speziell die Brodmann-Areale (BA) 45 und 47, einbindet (siehe Abb. 1). Es konnte gezeigt werden, dass die BA 45 und 47 sowohl die Verarbeitung semantischer Relationen im Satz unterstützen als auch die Integration von Weltwissen vermitteln, welches im Langzeitgedächtnis repräsentiert ist.<sup>5</sup>

### Syntax im erwachsenen Gehirn

Das Broca-Areal, so wird angenommen, ist entscheidend für die Verarbeitung von Syntaxoperationen, die erforderlich sind, um syntaktisch komplexe Sätze zu verstehen,<sup>6</sup> bzw. generell zuständig für Syntaxoperationen in allen natürlichen Sprachen.<sup>7</sup>

Was heißt nun «komplex», und wie kann man überprüfen, ob das Broca-Areal zuständig ist für die Verarbeitung von syntaktisch komplexen Sätzen? Das Deutsche erlaubt es mit seinen syntaktischen Möglichkeiten recht gut, diesen Punkt zu überprüfen, indem man die syn-

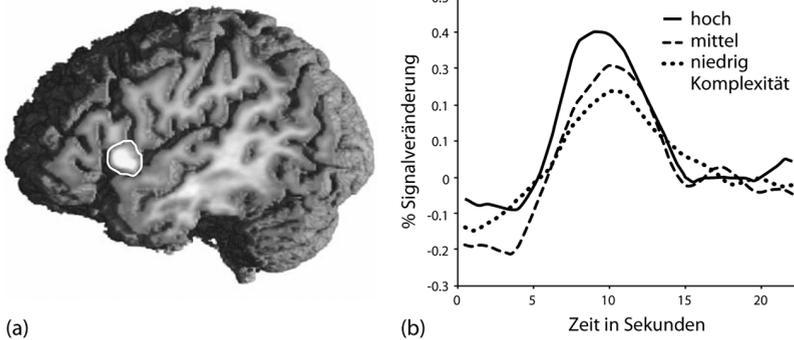


Abbildung 2: Broca-Areal und syntaktische Komplexität. Aktivierung im Broca-Areal für niedrig-, mittel- und hochkomplexe Sätze. (a) Aktivierungsort: Broca-Areal; (b) Aktivierungsstärke über die Zeit als Funktion der syntaktischen Komplexität der Sätze. Vergleiche Sätze (1) bis (3) im Text.

taktische Komplexität der Sätze systematisch erhöht. Man kann den Versuchspersonen kanonische Sätze präsentieren, also Sätze mit einer einfachen Ordnung der Nominalphrasen: Subjekt – indirektes Objekt – direktes Objekt (niedrige Komplexität, siehe Satz (1)). Man kann die Konstruktion aber etwas schwieriger gestalten, indem man das indirekte Objekt in die erste Position des Satzes bringt: indirektes Objekt – Subjekt – direktes Objekt (mittlere Komplexität, siehe Satz (2)), und noch schwieriger dadurch, dass man nicht nur das indirekte, sondern auch das direkte Objekt vor das Subjekt setzt: indirektes Objekt – direktes Objekt – Subjekt (hohe Komplexität, siehe Satz (3)):

- (1) *Heute hat der Vater dem Jungen den Lutscher geschenkt.*
- (2) *Heute hat dem Jungen der Vater den Lutscher geschenkt.*
- (3) *Heute hat dem Jungen den Lutscher der Vater geschenkt.*

In einer Beurteilungsaufgabe wird zwar der Satz (1) als «besser» gewertet als die anderen Optionen, aber alle drei Varianten werden vom deutschen Muttersprachler als grammatisch korrekt beurteilt. Während des Sprachverstehensprozesses erzeugen die verschiedenen Sätze im Broca-Areal unterschiedlich starke Aktivierungen (siehe Abb. 2).

Die Aktivierung ist für den Satz (1) am geringsten und für den Satz (3), in dem Objekte nach vorne gebracht wurden, am höchsten. Die Ergebnisse dieses Experiments zeigen, dass das Broca-Areal systematisch als

Funktion von syntaktischer Komplexität variiert, und belegen mithin seine Bedeutung für die Verarbeitung syntaktischer Information.<sup>8</sup>

Die Verarbeitung syntaktisch komplexer Sätze aktiviert zusätzlich immer auch den posterioren Anteil des STG/STS,<sup>9</sup> nicht aber, wenn die Sätze keine semantische Information tragen oder Sequenzen nur nach syntaktischen Hierarchieregeln gebildet sind. Dies legt die Vermutung nahe, dass der posteriore Anteil des STG/STS bei der Integration von semantischer und syntaktischer Integration eine Rolle spielt bzw. ins Spiel kommt, wenn die Festlegung der semantischen und thematischen Relationen im Satz (wer tut wem was) schwierig ist.<sup>10</sup>

### **Satzmelodie und Syntax**

Bei der Verarbeitung von gesprochenen Sätzen ist darüber hinaus die Satzmelodie, die sogenannte suprasegmentale prosodische Information, relevant, denn sie spiegelt zum Teil die zugrunde liegende syntaktische Struktur.

In den folgenden Beispielen ist die Prosodie des Satzes durch das Komma angegeben:

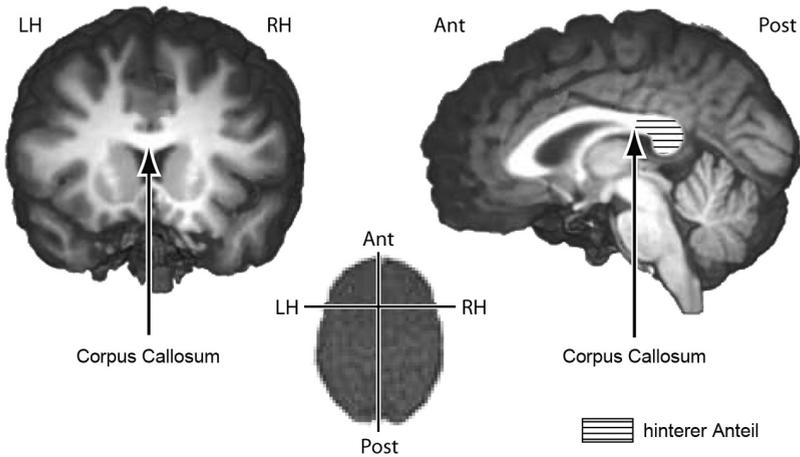
(4) *«Der Mann sagt, die Frau kann nicht Auto fahren.»*

(5) *«Der Mann, sagt die Frau, kann nicht Auto fahren.»*

Satz (4) und Satz (5) bedeuten etwas Unterschiedliches. In Satz (4) kann die Frau nicht Auto fahren, in Satz (5) ist es der Mann, der nicht Auto fahren kann. Die Prosodie gibt in den beiden Sätzen jeweils an, wer etwas sagt, und ist somit für das Verstehen des Satzes ausschlaggebend.

Das Gehirn reagiert auf die prosodische Veränderung an der Phrasengrenze (im Schriftsprachlichen markiert durch das Komma) mit einer spezifischen Hirnreaktion im ereigniskorrelierten Hirnpotenzial, das mittels der Elektroenzephalographie (EEG) erstmals gemessen werden konnte.<sup>11</sup> Für den normal gesprochenen Satz, der neben der Satzmelodie auch syntaktische und semantische Information enthält, sind beim Verstehen die linke und die rechte Hemisphäre involviert.<sup>12</sup> Die Verarbeitung der Satzmelodie alleine wird vornehmlich von der rechten Hemisphäre geleistet.<sup>13</sup>

Es konnte gezeigt werden, dass während des normalen Sprachverstehens linke Hemisphäre und rechte Hemisphäre bei der Verarbeitung von syntaktischer und prosodischer Information zeitnah miteinander inter-



*Abbildung 3:* Das Corpus Callosum. Links: Coronaler Schnitt zeigt die Verbindung zwischen linker Hemisphäre (LH) und rechter Hemisphäre (RH). Rechts: Sagittaler Schnitt zeigt die Lage des Corpus Callosum von anterior (Ant) nach posterior (Post). Unten Mitte: Angabe der Schnittführung; coronaler Schnitt quer von LH nach RH, sagittaler Schnitt längs von vorne (anterior) nach hinten (posterior).

agieren. Diese Interaktion wird durch eine Hirnstruktur sichergestellt, die die beiden Hemisphären miteinander verbindet, den sogenannten Balken (Corpus Callosum). Es ist der hintere Anteil des Balkens, der die Temporallappen der linken und rechten Hemisphäre miteinander verbindet und das Zusammenspiel von Syntax und Prosodie während der akustischen Sprachverarbeitung sicherstellt.<sup>14</sup>

Normales Sprachverstehen setzt eine zeitliche Feinabstimmung der Hirnaktivitäten in verschiedenen Arealen der linken und rechten Hemisphäre voraus. Ist eine der Hirnregionen durch eine Erkrankung geschädigt oder führt eine Hirnerkrankung zu einer zeitlichen Verzögerung einzelner Prozesse, so kann normales Sprachverstehen oder auch das Produzieren kohärenter Äußerungen nicht mehr stattfinden. Häufig wird uns das Wunder der menschlichen Sprachfähigkeit erst bewusst, wenn Sprache und Sprechen nach einem Schlaganfall oder anderen Erkrankungen nicht mehr normal funktionieren.

**Form oder Funktion: Was bestimmt die Hirnaktivierung?**

Wenn wir nach den biologischen Grundlagen der menschlichen Sprachfähigkeit fragen, steht eine Frage häufig im Vordergrund. Gilt die funktionelle Bestimmung von bestimmten Hirnarealen im Sprachverarbeitungsprozess eigentlich über die verschiedenen Sprachen hinweg? Ist ein bestimmtes Hirnareal immer für die gleiche Funktion zuständig, auch wenn diese in unterschiedlichen Sprachen unterschiedlich realisiert ist? Das Englische markiert die grammatikalische Funktion (Subjekt, Objekt) zum Beispiel durch die Wortfolge, wohingegen das Deutsche sie durch den Kasus (Nominativ, Akkusativ) markieren kann (siehe Sätze (1) bis (3)). Daten belegen, dass die Sprecher beider Sprachen zur Analyse dieser syntaktischen Funktion das gleiche grundlegende neuronale Netzwerk in der linken Hemisphäre benutzen. Ein extremeres Beispiel betrifft das Thai, das lexikalisch-semantische Unterschiede durch die Tonhöhe (hoch–niedrig im Gegensatz zu niedrig–hoch) markiert. Dieser Fall ist insofern von besonderer Bedeutung, als prosodische Information auf der Satzebene (Tonhöhenverlauf) vorwiegend in der rechten Hemisphäre aktiviert, wohingegen lexikalische-semantische Information in der linken Hemisphäre verarbeitet wird.<sup>15</sup> Falls die Kodierung der Information (Tonhöhe) über die Aktivierung bestimmter Gehirnbereiche entscheidet, liegt es nahe, deutliche Unterschiede zwischen Thai und anderen Sprachen zu erwarten. Werden die zerebralen Aktivierungsmuster hingegen durch die linguistische Funktion (in diesem Fall lexikalisch-semantische Funktion) bestimmt, würde man erwarten, dass diesbezüglich keine Unterschiede zwischen den Sprachen bestehen, unabhängig davon, in welcher Form sie kodiert wird. Brain-Imaging-Studien, die mit Thai-Muttersprachlern durchgeführt wurden,<sup>16</sup> zeigen, dass Tonhöhenunterschiede dann in der linken Hemisphäre verarbeitet werden, wenn sie lexikalisch-semantische Information enkodieren. Demnach ist offenbar nicht die Form der Information (Tonhöhe) ausschlaggebend dafür, in welcher Hemisphäre Areale aktiviert werden, sondern darüber entscheidet die linguistische Funktion (hier semantisch-lexikalisch).

Weitere Belege für die biologisch bedingte, funktionelle Vorbestimmtheit neuronaler Strukturen für die Sprachverarbeitung liefern Studien, die sich mit Gebärdensprachen beschäftigen. Sie liefern insofern wertvolle Erkenntnisse bezüglich der menschlichen Sprache, als es sich bei der Gebärdensprache um eine natürliche Sprache handelt, die über eine Phonologie, ein Lexikon und eine Syntax verfügt, aber von audito-

rischer Information völlig unabhängig ist. Trotz der eindeutig unterschiedlichen Input-Modalitäten, die zur Enkodierung von gesprochenen Sprachen und Gebärdensprachen benutzt werden, erfolgt die Verarbeitung der zentralen sprachlichen Funktionen in beiden Fällen in den gleichen Gehirnarealen.<sup>17</sup> Sprachliche Funktionen sind also generell in bestimmten Gehirnarealen verankert.

[...]