

IWONA LEGUTKO-MARSZAŁEK

*Uniwersytet Gdański*

## **Kortikale und subkortikale Sprachareale im Lichte der neurokognitiven Sprachverarbeitungsmodelle**

### Cortical and subcortical language areas in context of neuro-cognitive language processing models

**ABSTRACT.** In this article it has been pointed out that these are not only cortical but also subcortical parts of brain which participate in language processing. Apart from that, typical language areas take part in different non-language cognitive processes. Hence the linguistic ability should not be understood as a single and separate cognitive skill which can be attributed to some particular language organ, whose function consists only in producing and analyzing linguistic signals. Language should rather be perceived as a complex phenomenon and language processing as the one consisting of many subprocesses which is indicated by neuro-cognitive models.

**KEYWORDS:** language processing, cortical language area, subcortical language area.

Die beiden symmetrisch aussehenden Hemisphären des menschlichen Gehirns unterscheiden sich in ihrer Funktionsweise. Bei etwa 95% der Rechtshänder und 70% der Linkshänder ist die linke Gehirnhälfte sprachdominant (Springer, Deutsch 1998). Neben solchen rein funktionellen Asymmetrien konnten auch anatomische Unterschiede zwischen den Hemisphären identifiziert werden. So ist beispielsweise das Broca-Areal im linken Frontalhirn größer als das entsprechende Areal der rechten Hemisphäre (Herrmann, Fiebach 2007: 108). Ähnliche Unterschiede betreffen die Wernicke-Region im Temporallappen. An den primären auditorischen

Kortex schließt sich hinten das so genannte Planum temporale an, das bei den meisten Menschen links größer ist als rechts. Diese Befunde lassen vermuten, dass anatomische Asymmetrien zwischen den Hemisphären zumindest teilweise der funktionellen Lateralisierung von kognitiven Funktionen zu Grunde liegen.

Obwohl die linke Hemisphäre als sprachdominant gilt, schließt das nicht aus, dass Sprache bilateral verarbeitet wird. Viele Studien zeigen, dass beide Gehirnhälften an der Sprachverarbeitung beteiligt sind (vgl. Just et al. 1996, Binder et al. 1997, St. George et al. 1999). Der Theorie, nach der die Broca- und Wernicke-Region für die wesentlichen Orte der Sprachfunktionen gehalten werden, liegen vor allem klinische Befunde der Aphasieforschung zugrunde. Experimentelle Arbeiten der letzten Jahre weisen auf eine Beteiligung weiterer Hirnregionen an den Sprachprozessen hin (z.B. Petersen et al. 1988, Damasio et al. 1996). Auch elektrische Stimulationsexperimente zeigen beispielsweise die Beteiligung verteilter frontaler Kortextbereiche am Sprachprozess (Ojemann 1994). Die nicht-sprachdominante Gehirnhälfte nahezu aller Rechtshänder ist auch am Sprachprozess beteiligt (Code 1997) und scheint z.B. eine wichtige Rolle bei der Analyse von Metaphern (Bottini et al. 1994) und Idiomen (Cieślicka, Heredia 2011) aber auch bei der semantischen Integration (Diskursanalyse) zu spielen (St. George et al. 1999). Auch die höheren Verarbeitungsansprüche von schwierigen Relativsätzen führen zu einer stärkeren Aktivität der rechtehemisphärischen Sprachverarbeitungsregionen (Just et al. 1996). Wie wir sehen, muss für die Sprachverarbeitung somit die ausschließlich lokalisationsbezogene Suche nach distinkten Regionen im Gehirn zugunsten der Annahme eines zusätzlichen, globalen Prozesses aufgegeben werden. Für die Realisierung solcher globalen Aktivitäten werden gegenwärtig oszillatorische Prozesse angenommen (Singer 1994), die zur synchronisierten Zusammenarbeit verteilter Hirnareale beitragen.

Ging man früher von einer Dominanz der linken Hemisphäre für Sprache aus, spricht man heute von einer komplementären Hemisphärenspezialisierung (Rickheit et al. 2010: 136). Es sind nicht mehr Dichotomien, die die Gehirnhälften charakterisieren, wie etwa die Verarbeitung verbaler versus nonverbaler Stimuli, sondern vielmehr unterschiedliche Prozesse, also die Art und Weise, wie die Hemisphären mit dem Stimulus umgehen. Man geht davon aus, dass beiden Hemisphären bei der Sprachverarbeitung eine essentielle Rolle zukommt, wobei aber jede von ihnen Spezialist für bestimmte Funktionen und Operationen ist und sie sich in sinnvoller Weise gegenseitig ergänzen (Hellige 2001). So achtet die linke Hemisphäre eher auf sprachliche Details (logisch-analytische Funktion), während die rechte

eher auf den globalen Hintergrund achtet (emotional-synthetische Denkweise).

Abgesehen von den oben angeführten Beispielen, gehören zu den an der Sprachverarbeitung beteiligten Hirnarealen in erster Linie das Broca-Areal im Frontallappen, das Wernicke-Areal im Temporallappen sowie das Grenzgebiet zwischen Parietal-, Occipital- und Temporallappen, welches den Gyrus supramarginalis und den Gyrus angularis einschließt. Die Verwendung bildgebender Methoden, wie Positron Emission Tomography (PET) und functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) zur Untersuchung der Sprache konnte einige, auf klinischen Studien basierende Annahmen zur zerebralen Organisation der Sprache bestätigen. So konnte erwartungsgemäß gezeigt werden, dass das Hören und Lesen von Sprache primär-auditorische und primär-visuelle Regionen des Großhirns aktiviert. Andere etablierte Annahmen wurden wiederum nicht eindeutig gestützt. So zeigten einige bildgebende Studien, dass die Broca-Region für die Artikulation von Sprache weniger bedeutsam ist als ursprünglich angenommen. Natürlich sah man in entsprechenden Studien Hirnaktivität in benachbarten motorischen und prämotorischen Regionen. Für die Planung der Artikulation scheint jedoch eher ein tiefer gelegener Kortex in der vorderen Insel, und nicht das Broca-Areal, kritisch zu sein. Aktivierungsstudien zeigen beispielsweise für grammatikalisch komplexe Sätze mehr Aktivierung in der Nachbarschaft des Broca-Areals als bei einfachen Sätzen. Genauso zeigte eine Reihe von Studien die Hirnaktivität in der Region des Wernicke-Areals, wenn die Probanden semantische Aspekte der Sprachverarbeitung beachten müssen (vgl. Herrmann, Fiebach 2007: 20).

Generell nehmen die primären sensorischen Hirnregionen die Informationen aus den Wahrnehmungsorganen auf und die primären motorischen Areale des Kortex senden die Befehle an die Muskulatur aus. Höhere kortikale Sprachregionen des Gehirns benötigen diese Areale, um Informationen mit der Außenwelt auszutauschen. Über den primären auditorischen Kortex der linken und rechten Hemisphäre gelangen akustische Informationen ins Gehirn, d.h. diese Areale sind für das Hören zuständig. Entsprechend ist der primäre visuelle Kortex für das Sehen verantwortlich, da hier die visuelle Information aus den Augen im Gehirn ankommt. Der primäre motorische Kortex sendet dagegen die Nervenimpulse an die Muskeln des Körpers, u.a. auch an die Muskeln des Artikulationsapparates bzw. der Hand. Die Informationen von den primär sensorischen Arealen des Kortex werden mit einem höheren Verarbeitungsgrad in die Gehirnstrukturen geleitet. Die Assoziationsregionen können entweder genau wie primäre sensorische Areale ausschließlich Informationen aus einer Modalität verarbeiten (unimodal) oder Signale aus mehreren Sinnesmodalitäten integrieren

(heteromodal). Die Regionen des Gehirns, die insbesondere am Verstehen oder an der Produktion von Sprache beteiligt sind, sind ebenfalls in den Assoziationsarealen des Gehirns zu finden (Carter 2010: 146). Die Sprachzentren können nicht völlig unabhängig voneinander arbeiten, weil ein dicker Nervenfaserverband zwischen dem posterioren Temporallappen und dem Frontalkortex (Fasciculus arcuatus) diese beiden Areale verbindet. Störungen der Sprache können damit auf eine Schädigung eines Sprachareals, aber auch auf eine Durchtrennung der sie verbindenden Nervenfasern zurückgeführt werden.

In die Sprachverarbeitungsprozesse werden nicht nur die typischen Sprachareale, die im Kortex lokalisierbar sind, sondern auch die subkortikalen Gehirnteile, die für Sprache zwar nicht spezifisch jedoch unentbehrlich sind, involviert. Die Fähigkeit, Wörter im Langzeitgedächtnis abzuspeichern und unsere Aufmerksamkeit auf die Sprache zu lenken, erfordert die oberhalb des Gyrus parahippocampalis liegende Gehirnstruktur. Der Hippocampus ist eng mit dem Gyrus dentatus verbunden und wird mit diesem als Hippocampusformation zusammengefasst. Zwar gehört er zum Kortex, doch hat er nur ein bis drei Zellschichten statt der in den meisten Kortexregionen üblichen sechs (Carter 2010: 65). Seine wichtigsten Funktionen sind räumliches Bewusstsein sowie Bilden und Abrufen von Erinnerungen. Er trägt dazu bei, vorläufige Informationen für die bleibende Erinnerung zu selektieren und diese an Areale des Langzeitgedächtnisses weiterzuleiten.

Der Hirnstamm verbindet nicht nur den Kortex der Großhirnhemisphären mit dem Rückenmark, sondern besitzt auch Zellanhäufungen, so genannte Kerngebiete, in denen Nervenzellen bestimmte Aufgaben erfüllen. Die meisten von ihnen sind sehr elementare Funktionen, wie die Steuerung der Atmung oder des Schlaf-Wach-Rhythmus. Deswegen hat man lange Zeit geglaubt, dass höhere kognitive Funktionen im Kortex und lebenserhaltende Körperfunktionen in subkortikalen Arealen angesiedelt seien. Dabei wurden aber mehrere wichtige Tatsachen außer Acht gelassen. Alle ein- und ausgehenden Informationen werden nämlich über den Thalamus weitergeleitet. Auditive Informationen werden, noch bevor sie in den Thalamus gelangen, sogar in mehreren subkortikalen Kerngebieten vorverarbeitet. Sind diese Kerngebiete gestört, so ist gleichzeitig auch die Wahrnehmung der betreffenden Modalität gestört, was wiederum Auswirkungen auf die Sprache hat. Der Thalamus dient demnach als eine Art Vermittlungsstation zwischen verschiedenen kortikalen Arealen. Wenn beispielsweise die Aufmerksamkeit auf das Sehen gelenkt wird, werden bevorzugt Informationen vom Auge weitergeleitet. Dadurch kommt dem Thalamus eine wichtige Funktion bei der Auswahl zu bearbeitender Informationen zu. Areale des

frontalen Kortex können aber auch den Thalamus beeinflussen und dadurch auf die Steuerung der Aufmerksamkeit wirken. Während der Sprachverarbeitung scheint der Thalamus gemeinsam mit kortikalen Regionen die Interaktion zwischen frontalen und temporo-parietalen Gebieten zu kontrollieren (Wahl et al. 2008). Er ist maßgeblich am Wortabruf und der Objektbenennung beteiligt (Johnson, Ojemann 2000), was sich auch daran zeigt, dass es bei einer thalamischen Läsion zu spezifischen Störungen der Wortverarbeitung kommt (Wallesch 2006). Der Thalamus ist darüber hinaus auch an der Analyse akustisch präsentierter Sätze mit semantischen und syntaktischen Fehlern beteiligt (Wahl et al. 2008).

Die Artikulation von sprachlichen Äußerungen schließt wiederum die subkortikal gelegenen Strukturen der Basalganglien und des Kleinhirns ein, in denen die Planung und Kontrolle willkürlicher motorischer Bewegungen abläuft. Läsionen in diesen Gebieten können zum Verlust des Sprechens, Schreibens oder der Gebärdensprache führen (Herrmann, Fiebach 2007: 95). Jeder durchgeführten Bewegung geht eine exakte Planung voraus, die in den Basalganglien (Nuclei basales) stattfindet. Bevor ein Nervenimpuls vom motorischen Kortex tatsächlich an den entsprechenden Muskel geschickt wird, läuft er erst durch eine Schleife zu den Basalganglien, zum Thalamus und zurück zum Kortex. Nur wenn die Bewegung erfolgreich geplant wurde, wird sie schließlich auch ausgeführt. Dabei gibt es eine weitere Kontrollinstanz, nämlich das Kleinhirn. Jede erfolgte Bewegung wird daraufhin kontrolliert, ob die zurückkommenden sensorischen Impulse auch eine korrekte Bewegungsausführung anzeigen. Sowohl sensorische Neurone in der Haut als auch in den Muskeln projizieren über das Rückenmark und den Hirnstamm zum Kleinhirn, wo motorische und sensorische Impulse verglichen werden (Herrmann/ Fiebach 2007: 96). Alle drei Phasen der Bewegungsdurchführung, die Planung, die eigentliche Ausführung und die Überprüfung, müssen auch im Fall der Sprechmotorik bzw. Schreibmotorik durchlaufen werden. Die für die Sprachverarbeitung wichtigen Kerne sind der Nucleus caudatus und das Putamen, die Teile eines Netzwerks zwischen dem Thalamus, der Broca-Region und dem Temporalappen bilden (Booth et al. 2007). Zwar wird ihre Rolle bei der Sprachverarbeitung noch diskutiert, es finden sich jedoch Hinweise, dass sie an der lexikalischen Auswahl und dem Abruf beteiligt sind (Desmond et al. 1998). Auch bei grammatikalischen Prozessen scheinen die Basalganglien eine wichtige Rolle zu spielen (Ullman 2006, Friederici 2002). Der Nucleus caudatus unterstützt beispielsweise das Erkennen von syntaktischen Fehlern (Moro et al. 2001) und das Verstehen von Syntax (Kotz 2009). Darüber hinaus sind die Basalganglien bei der Zusammensetzung von Lauteinheiten (Phonemen) zu Wörtern involviert (Ullman 2006). Das Putamen ist mögli-

cherweise bei der Auswahl oder der Initiation kortikaler Aktivierungsmuster für die phonologische Verarbeitung verantwortlich, die in frontalen und temporalen Regionen stattfindet (Booth et al. 2007). Das Erkennen von phonologischen Fehlern ist mit der Aktivierung des Nucleus caudatus verbunden, während eine schnelle phonologische Verarbeitung mit der Aktivierung des Putamens einhergeht (Tettamanti et al. 2005). Die Basalganglien sind entsprechend ihrer normalen Funktion bei der Bewegungsplanung meist bei expressiven Störungen betroffen.

Das Kleinhirn scheint eine bedeutende Rolle bei der kognitiven Kontrolle der Sprache zu spielen. Es hat reziproke Verbindungen zum Broca-Areal und dem linken Temporallappen und ist an der Organisation von Silben zu größeren Einheiten und der zeitlichen Organisation interner Abläufe der Sprachplanung beteiligt (Ackermann 2008). Darüber hinaus ist das Kleinhirn für die artikulatorische Kontrolle verantwortlich und an phonologischen Arbeitsgedächtnisprozessen beteiligt (Desmond et al. 1998). Es ist auch beim Lesen involviert (Booth et al. 2007). Grundlegend scheint aber seine Beteiligung an der Fehlererkennung während der Durchführung einer sprachlichen Aufgabe zu sein (Booth et al. 2007), was möglicherweise auch eine Bedeutung für die syntaktische Reanalyse beim Erkennen von so genannten Garden-path-Sätzen hat. Das Kleinhirn ist außerdem an nicht-motorischen kognitiven Funktionen wie an der Konditionierung beteiligt, besonders wenn es um kritische zeitliche Abläufe geht, scheint es als interne Uhr zu fungieren. Diese Funktion ist auch für Sprachwahrnehmung und Sprachproduktion von grundlegender Bedeutung.

In Anbetracht der Erforschung von sprachlichen Prozessen muss man klarstellen, dass die Sprachverarbeitung ein hochkomplexes Phänomen ist, dass man nicht isoliert von anderen Hirnfunktionen, wie Wahrnehmung, Gedächtnis oder auch Motorik, untersuchen und verstehen kann. War man bis vor wenigen Jahren noch der Meinung, dass eng umschriebene Gehirnregionen sprachliche Aufgaben durchführen, zeigen Untersuchungen mit modernen neurophysiologischen Methoden, dass diese vereinfachte Sichtweise nicht haltbar ist. Es stellte sich heraus, dass ein Netzwerk weit verteilter Gehirnregionen an der Sprachverarbeitung beteiligt ist, wobei sich die Rolle der strukturellen und funktionellen Verbindungen zwischen den Hirnregionen als weit bedeutender herausstellte, als vermutet. Diese Tatsache stellt wiederum hohe Anforderungen an die Entwicklung neurokognitiver Modelle der Sprachverarbeitung. Gegenwärtig gibt es kein einheitliches, allumfassendes neurokognitives Sprachmodell, sondern nur Modelle, die sich auf einzelne Aspekte der Sprachverarbeitung konzentrieren.

Das erste Modell, das vorwiegend von der sequentiellen Zusammenarbeit mehrerer Gehirnregionen ausging, war das Wernicke-Geschwind-

Modell (Geschwind 1965). Neu an diesem Modell war vor allem die Einbeziehung zusätzlicher wichtiger sprachrelevanter Gehirnregionen. So hob Geschwind unter anderem die Bedeutung des Gyrus angularis und des Gyrus supramarginalis im Parietallappen als eine supramodale Region hervor, die wesentlich zur Verknüpfung visueller, auditorischer und taktiler Informationen beiträgt, was bei der multisensorischen Integration in der Sprachverarbeitung eine wesentliche Rolle spielt (vgl. Carter 2010: 66).

Ergebnisse moderner bildgebender Methoden haben bestätigt, dass bei der Sprachverarbeitung neben den klassischen Sprachzentren eine Vielzahl sowohl kortikaler als auch subkortikaler Regionen und das Kleinhirn beteiligt sind (Binder et al. 1997, Friederici 2002, Stowe et al. 2005, Pulvermüller, Fadiga 2010). Fest steht, dass die Broca-Region nicht nur bei der Sprachproduktion, sondern auch bei der Sprachrezeption involviert ist und die sensorischen und semantischen Prozesse, die eher temporo-parietal ablaufen, koordiniert (Binder et al. 1997, Stowe et al. 2005). Wichtig ist auch, dass die Broca- bzw. Wernicke-Region mit Sicherheit keine homogenen Areale sind, sondern dass eine funktionelle Parzellierung nachgewiesen wurde. So stellte sich heraus, dass ein Teil der Broca-Region (Pars opercularis) eher bei artikulatorischen und phonologischen Aufgaben, ein anderer Teil (Pars triangularis) sowohl bei phonologischen und lexikalischen als auch bei grammatikalischen Sprachprozessen aktiv ist (z.B. Friederici et al. 2006). Außerdem zeigt die Broca-Region auch eine ausgeprägte Aktivierung während der Musikverarbeitung (Maess et al. 2001, Sammler et al. 2009) und bei Gedächtnisprozessen (Arbeitsgedächtnis). So wird vermutet, dass die Broca-Region zeitlich-sequentielle Abläufe kontrolliert. Wahrscheinlich dient sie der Analyse hierarchisch organisierter motorischer und sprachlicher Sequenzen, die vielen kognitiven Operationen zugrunde liegen. Je größer die kognitive Anforderung ist, desto höher ist die Aktivierung im Broca-Zentrum. Beachtlich ist, dass dieses Gehirnareal wahrscheinlich ein wesentlicher Hauptknotenpunkt eines verteilten Netzwerksystems ist und eine die mentale Aktivität regulierende oder auch integrierende Funktion hat.

Die Wernicke-Region ist zwar für die auditorische Laut- und Klangbildverarbeitung wesentlich, aber es sind eher die angrenzenden temporo-parietalen Regionen (Gyrus angularis, Gyrus temporalis medius und inferior), die an einer detaillierten semantisch-linguistischen Analyse beteiligt sind. So sind ausgedehnte Bereiche des superioren, mittleren und inferioren Temporallappens sowie inferioren Parietallappens für das Sprachverstehen und die Bedeutungskonstitution wichtig (z.B. Binder et al. 1997, Stowe et al. 2005). Der Gyrus supramarginalis, der für die Sprachrezeption wichtig ist, ist aber auch bei der Verarbeitung von Tonsequenzen aktiv und vermutlich eher in Arbeitsgedächtnisprozesse für akustische Stimuli involviert (Binder

et al. 1997). Daher ist dieser Bereich ebenfalls als nicht sprachspezifisch einzustufen. Der Gyrus angularis wiederum ist beim Lesen nicht nur für die Wortformerkennung zuständig, sondern soll als eine supramodale Region betrachtet werden, die sich für semantische Assoziationen im Allgemeinen verantwortlich zeigt (Price 2000).

Die Beteiligung der rechten Hemisphäre an der Sprachverarbeitung ist mittlerweile unbestritten, vor allem in Bezug auf die prosodische Sprachanalyse, Kontextanalyse, Verarbeitung figurativer Sprache und Metaphern sowie auf die Inferenzbildung (z.B. St. George et al. 1999, Coulson, van Petten 2002, Schmidt, Seger 2009, Friederici, Alter 2004).

Angesichts der Unvollständigkeit des Wernicke-Geschwind-Modells wurden in den letzten Jahren immer detailliertere neurobiologische Sprachmodelle entwickelt. In Übereinstimmung mit der Embodied-Cognition-Theorie wurde gezeigt, dass das konzeptuelle Wissen über Objekte in verteilten Netzwerken im Gehirn repräsentiert ist und in Abhängigkeit von der Aufgabenanforderung bei der Begriffsverarbeitung unterschiedliche Netzwerke aktiviert werden (vgl. Rickheit et al. 2010: 162). Auch Damasio et al. (2004) demonstrierten in vielen Untersuchungen, dass beim Benennen von Tieren, Personen oder künstlichen Objekten im Temporallappen unterschiedliche Bereiche aktiv wurden. Allerdings betonen sie, dass nicht diese Wortkategorien bzw. Objekte lokal gespeichert sind, sondern lediglich die neuronalen Muster, die bei der Perzeption und Verarbeitung derselben aktiviert werden (Konvergenzzonen). Bei Bedarf werden diese neuronalen Muster dann reaktiviert.

Andere aktuelle neurokognitive Modelle stellen den zeitlichen Aspekt der Sprachprozesse in den Vordergrund und kombinieren diese Ergebnisse mit Befunden zur Lokalisation von Gehirnaktivität. Beispielsweise basiert das Modell zur akustischen Sprachverarbeitung von Friederici (2002) auf der zeitlichen Auftrennung von syntaktischen und semantischen Prozessen. PET- und fMRI-Ergebnisse bilden den Hintergrund für die Lokalisation der Gehirnaktivität und die Ergebnisse aus ERP-Untersuchungen liegen den seriellen, zeitlichen Abläufen zugrunde (Rickheit et al. 2010: 164). Im Sprachmodell von Friederici (2002) ist eine Zeitachse sichtbar, welche die Abfolge der verschiedenen Phasen der Satzverarbeitung darstellt. Durch Berücksichtigung der Ergebnisse einer Vielzahl von bildgebenden Studien zur Sprachverarbeitung sowie Läsionsstudien können hier jedoch zusätzlich Angaben zur kortikalen Repräsentation der verschiedenen Verarbeitungsstufen gemacht werden. So ist unbestritten, dass die frühe akustische Verarbeitung von Sprache im primären Hörkortex und die Identifikation von Phonemen im sekundär-auditorischen Kortex stattfindet. Die Erkennung der akustischen Wortform wird superior-posterioren Regionen des linken

Temporallappens zugeschrieben und findet 100 bis 150ms nach Hören des Wortes statt. Als nächste Verarbeitungsschritte folgen die Identifikation der Wortkategorie im superior-anterioren Temporallappen (150-200ms), die Aktivierung des Lexikoneintrags im mittel-posterioren Temporallappen und die Verwendung dieser Information zum Aufbau eines mentalen Abbildes der Struktur des Satzes im Temporallappen (300-500ms). Höhere semantische Funktionen scheinen wiederum auf andere Regionen des Temporallappens zurückzugreifen. Allerdings verlässt sich die Sprachfunktion des Gehirns nicht ausschließlich auf Regionen der Großhirnrinde.

Um ein umfassendes Sprachmodell zu entwickeln, genügt es leider nicht, die Lokalisation und den zeitlichen Verlauf der Gehirnaktivität zu berücksichtigen. Das kann man vor allem erkennen, wenn man Sprachstörungen untersucht, die durch eine plötzliche Hirnschädigung nach abgeschlossenem Spracherwerb auftreten. Beim Auftreten von Aphasien ist eine große Symptomvielfalt zu beobachten, die eine Herausforderung für das Aufstellen neurobiologischer Modelle der Sprache darstellt. Beispielsweise tritt bei einer Läsion der Broca-Region nur bei 85% der Personen eine Sprachstörung mit typischen Symptomen auf (Rickheit et al. 2010: 164). Man kann hier erkennen, dass die direkte Zuordnung von Funktion und Struktur nicht zulässig ist, da jedes Gehirnareal auf dem Funktionieren eines Netzwerks und ihm zugrunde liegender Gehirnstrukturen beruht. Die Ergebnisse der Untersuchung von Sprachstörungen bilden so einen wichtigen Prüfstein für linguistische Theorien und Modelle in Bezug auf ihre neurobiologische Realität. Wichtig für ein biologisch fundiertes Sprachmodell ist also auch die Berücksichtigung von Untersuchungen der strukturellen und funktionellen Vernetzung verteilter Gehirnregionen. Ein wesentliches Problem für die Heterogenität der bisherigen Befunde war die bislang ungenügende Kenntnis der zugrunde liegenden neuroanatomischen Verhältnisse.

Von den Erkenntnissen der neuen Methoden und Techniken profitiert das Modell der Sprachverarbeitung von Hickok und Poeppel (2007), das auf einer räumlichen Auftrennung der phonologischen und semantischen Analyse basiert. Die Autoren postulieren, dass sich das Sprachsystem, ausgehend vom oberen Temporallappen, der bei der frühen Sprachwahrnehmung beteiligt ist, in zwei Routen aufteilt:

- eine dorsale Route, die vorwiegend in der linken Hemisphäre vertreten ist, sorgt für die Übertragung akustischer Sprachsignale zu den für die Artikulation notwendigen frontalen Sprachregionen,
- eine ventrale Route, die größtenteils bilateral organisiert und für die Bedeutungskonstitution verantwortlich ist.

Während der propositionalen Sprachverarbeitung interagieren diese beiden Systeme vermutlich und werden nicht isoliert angesprochen. Die Existenz dieses Modells wurde durch die Studie von Saur et al. (2008) experimentell überzeugend nachgewiesen. Mit der kombinierten Anwendung der fMRI und der DTI-Methode (Diffusions-Tensor-Imaging) während sprachlicher Aufgaben konnten die Autoren die beiden anatomischen Routen identifizieren. Beim sublexikalischen Wiederholen von akustisch präsentierten Wörtern und Pseudowörtern wurde die dorsale Route aktiviert, die den oberen Temporallappen und den hinteren inferioren Parietallappen mit dem prämotorischen Kortex im Frontallappen verbindet. Die verbindenden Fasersysteme sind der Fasciculus arcuatus und der Fasciculus longitudinalis superior (z.B. Price 2000, Saur et al. 2008). Im Gegensatz dazu wurde eine ventrale Route aktiviert, wenn die Versuchspersonen die Bedeutung von Sätzen verstehen sollten. Diese ventrale Route verbindet den mittleren Temporallappen und links frontale Gebiete (Brodmann-Areale 45, 47) über ein Fasersystem namens Capsula extrema.

Eine etwas andere Sichtweise der neurokognitiven Grundlagen der Sprache stellt die Aktivierung von Netzwerken in eine zeitbasierte funktionelle Konnektivität in den Vordergrund. Eines der bekanntesten neurobiologischen Sprachmodelle, das nicht die Lokalisation einzelner Regionen, sondern Netzwerkaktivierungen behandelt, stammt von Pulvermüller (1999) und Mitarbeitern. Diese Netzwerke entstehen durch das Lernen, das auf dem Prinzip beruht, dass verteilte, gleichzeitig aktivierte Neuronen ihre Verbindungen miteinander verstärken und zu einer funktionellen Einheit (cell assembly) werden. Wenn ein Teil des Netzwerkes durch eine kognitive Aufgabe (z.B. Wortverarbeitung) aktiviert wird, wird das gesamte Netzwerk automatisch mitaktiviert. Je nachdem, worauf sich ein Wort bezieht, sind unterschiedliche Netzwerke betroffen (z.B. aktiviert die Verarbeitung farbbezogener Wörter neben den Strukturen, die bei der allgemeinen Wortverarbeitung aktiv sind, zusätzlich Strukturen im inferioren Temporallappen, die für die Verarbeitung von Farbinformationen verantwortlich sind (Pulvermüller, Fadiga 2010)). In diesem Zusammenhang ist es wichtig, dass die semantische Wortverarbeitung eng mit motorischen und perzeptuellen Gehirnfunktionen verknüpft ist (Pulvermüller 1999, 2005).

Neben den hier angeführten Beispielen für neurokognitive Sprachmodelle existiert auch eine Reihe anderer Modelle, die unterschiedliche Aspekte der Sprachverarbeitung in den Mittelpunkt stellen. Beispielsweise stellt die Untersuchung paralleler Prozesse während der Sprachverarbeitung via Frequenzkodierung im EEG eine wichtige Ergänzung der aktuellen Sprachmodelle dar (Weiss, Müller 2003, Weiss 2009). Darüber hinaus existieren auch Modelle, die stärker evolutionsbiologische und neurophysiolo-

gische Aspekte der Sprachverarbeitung berücksichtigen (Müller 2003). Aus neurobiologischer Sicht sind für den Sprachverarbeitungsprozess kürzere Verarbeitungszeiten zu fordern, als etwa anhand von EEG-Korrelaten vermutet werden (z.B. anhand der N400 oder der P600-Komponenten) – schon aufgrund der massiven Parallelverarbeitung und auch wegen der im sprachlichen Verhalten zu beobachtenden Verarbeitungsgeschwindigkeiten. Beispielsweise lassen sich beim Lesen von Wörtern bereits nach 80 bis 130ms (Skrandies 2004) und selbst beim Hören von Wörtern bereits nach 120ms nach Artikulationsbeginn (Müller, Kutas 1996) im EEG Veränderungen nachweisen, die auf unterschiedliche Prozesse der Wortkategorisierung hinweisen. Zu beachten ist, dass die Artikulationsdauer gesprochener Wörter ja zumeist viel länger dauert als 120ms. Die Verarbeitung von sprachlicher Einheiten, insbesondere von Wörtern im Satz (Kontext) und in bekannten Situationen (Situiertheit), geschieht somit u.U. schneller als ein Sprecher für die Artikulation des jeweiligen Wortes benötigt. Dies ist umso plausibler, wenn man bedenkt, dass normale Hörer wahrgenommene Sätze mit einer Verzögerung von ca. 220ms bereits nachsprechen können (Müller 2003).

Wie aus diesem Artikel ersichtlich ist, haben wir bei der Sprachverarbeitung immer mit einem Zusammenspiel von verschiedenen Subprozessen zu tun, die in einer enormen Anzahl von neuronalen Verbindungen ablaufen. Der heutige Stand der technischen Entwicklung reicht noch nicht aus, um die komplexen Vorgänge im Gehirn isoliert zu beobachten und eindeutig zu identifizieren. Wichtig in diesem Zusammenhang ist, dass sprachrelevante Regionen auch an der Verarbeitung von nichtsprachlichen Stimuli beteiligt sind. Entscheidend für eine effiziente kognitive Sprachverarbeitung scheint auch die Aktivierung von verschiedenen Hirnstrukturen zu sein, die nicht ausschließlich für Sprache vorbehalten sind. Die Sprachfähigkeit soll demnach nicht als eine separierbare, distinkte Einzelleistung innerhalb der Kognition gesehen und auf ein spezielles Sprachorgan im Gehirn, dessen Aufgabe lediglich darin besteht, Sprachsignale zu analysieren oder hervorzu- bringen, zurückgeführt werden.

#### LITERATURVERZEICHNIS

- Ackermann, H., 2008. Cerebral contributions to speech production and speech perception: psycholinguistic and neurobiological perspectives. In: *Trends in Neurosciences* 31, 265-272.
- Binder, J.R., Frost, J.A., Hammeke, T.A., Cox, R.W., Rao, S.M., Prieto, T., 1997. Human brain language areas identified by functional magnetic resonance imaging. *Journal of Neuroscience* 17, 353-362.

- Booth, J.R., Wood, L., Lu, D., Houk, J.C., Bitan, T., 2007. The role of the basal ganglia and cerebellum in language processing. In: *Brain Research* 1133, 136-144.
- Bottini, G., Corcoran, R., Sterzi, R., Paulesu, E., Schenone, P., Scarpa, P., Frackowiak, R.S., Frith, C.D., 1994. The role of the right hemisphere in the interpretation of figurative aspects of language. A PET-activation study. *Brain* 117, 1241-1253.
- Carter, R., 2010. *Das Gehirn*. München: Dorling Kindersley Verlag.
- Cieślicka, A.B., Heredia, R.R., 2011. Hemispheric asymmetries in processing L1 and L2 idioms: Effects of salience and context. In: *Brain and Language* 116, 136-150.
- Code, C., 1997. Can the right hemisphere speak? In: *Brain and Language* 57, 38-59.
- Coulson, S., van Petten, C., 2002. Conceptual integration and metaphor: an event-related potential study. In: *Memory and Cognition* 30, 958-968.
- Damasio, H., Grabowski, T.J., Tranel, D., Hichwa, R.D., Damasio, A.R. 1996. A neural basis for lexical retrieval. In: *Nature* 380, 499-505.
- Damasio, H., Tranel, D., Grabowski, T., Adolphs, R., Damasio, A.R., 2004. Neural systems behind word and concept retrieval. In: *Cognition* 92, 179-229.
- Desmond, J.E., Gabrieli, J.D., Glover, G.H., 1998. Dissociation of frontal and cerebellar activity in a cognitive task: evidence for distinction between selection and search. In: *Neuroimage* 7, 368-376.
- Friederici, A.D., 2002. Towards a neural basis of auditory sentence processing. In: *Trends in Cognitive Sciences* 6, 78-84.
- Friederici, A.D., Alter, K., 2004. Lateralization of auditory language functions: a dynamic dual pathway model. In: *Brain and Language* 89, 267-276.
- Friederici, A.D., Bahlmann, J., Heim, S., Schubotz, R.I., Anwander, A., 2006. The brain differentiates human and non-human grammars: functional localization and structural connectivity. In: *Proc Natl Acad Sci USA* 103, 2458-2463.
- Geschwind, N., 1965. Disconnexion syndromes in animals and man. In: *Brain* 88, 113-120.
- Hellige, J.B., 2001. *Hemispheric asymmetry; What's right and what's left*. Harvard: University Press.
- Herrmann, Ch., Fiebach, Ch., 2007. *Gehirn und Sprache*. Frankfurt am Main: Fischer.
- Hickok, G., Poeppel, D., 2007. The cortical organization of speech processing. In: *Nature Reviews Neuroscience* 8, 393-402.
- Johnson, M.D., Ojemann, G.A., 2000. The role of the human thalamus in language and memory: evidence from electrophysiological studies. In: *Brain and Cognition* 42, 218-230.
- Just, M.A., Carpenter, P.A., Keller, T.A., Eddy, W.F., 1996. Brain activation modulated by sentence comprehension. In: *Science* 274, 114-116.
- Kotz, S.A., 2009. A critical review of ERP and fMRI evidence on L2 syntactic processing. In: *Brain and Language* 109, 68-74.
- Maess, B., Koelsch, S., Gunter, T.C., Friederici, A.D., 2001. Musical syntax is processed in Broca's area: an MEG study. In: *Nature Neuroscience* 4, 540-545.
- Moro, A., Tettamanti, M., Perani, D., Donati, C., Cappa, S.F., Fazio, F., 2001. Syntax and the brain: disentangling grammar by selective anomalies. In: *Neuroimage* 13, 110-118.
- Müller, H.M., 2003. Neurobiologische Grundlagen der Sprache. In: Rickheit, G., Herrmann, T., Deutsch W. (Hrsg.) *Psycholinguistik: Ein internationales Handbuch*. Berlin: Mouton de Gruyter.
- Müller, H.M., Kutas, M., 1996. What's in a name? Electrophysiological differences between spoken nouns, proper names, and one's own name. In: *NeuroReport* 8, 221-225.

- Ojemann, G.A., 1994. Cortical simulation and recording in language. In: Kertesz, A. (Ed.) *Localization and neuroimaging in neuropsychology*. San Diego: Academic Press, 35-55.
- Petersen, S.P., Fox, P.T., Posner, M.I., Mintun, M., Raichle, M.E., 1988. Positron emission tomographic studies of the cortical anatomy of single-word processing. In: *Nature* 331, 585-589.
- Price, C.J., 2000. The anatomy of language: contributions from functional neuroimaging. In: *Journal of Anatomy* 197, 335-359.
- Pulvermüller, F., 1999. Words in the brain's language. In: *Behavioral and Brain Sciences* 22, 253.
- Pulvermüller, F., 2005. Brain mechanism linking language and action. In: *Nature Reviews Neuroscience* 6, 576-582.
- Pulvermüller, F., Fadiga, L. 2010. Active perception: sensorimotor circuits as a cortical basis for language. In: *Nature Reviews Neuroscience* 11, 351-360.
- Rickheit, G., Weiss, S., Eikmeyer, H.J. 2010. *Kognitive Linguistik. Theorien, Modelle, Methoden*. Tübingen: Narr Francke.
- Sammler, D., Koelsch, S., Ball, T., Brandt, A., Elger, C.E., Friederici, A.D., 2009. Overlap of musical and linguistic syntax processing: intracranial ERP evidence. In: *Ann N Y Acad Sci* 1169, 494-498.
- Saur, D., Kreher, B.W., Schnell, S., Kümmerer, D., Kellmeyer, P., Vry, M.S., Umarova, R., Musso, M., Glauche, V., Abel, S., Huber, W., Rijntjes, M., Hennig, J., Weiler, C., 2008. Ventral und dorsal pathways for language. In: *Proc Natl Acad Sci USA* 105, 18035-18040.
- Schmidt, G.L., Seger, C.A., 2009. Neural correlates of metaphor processing: the roles of figurativeness, familiarity and difficulty. In: *Brain and Cognition* 71, 375-386.
- Singer, W., 1994. Coherence as a organizing principle of cortical functions. In: *International Review of Neurobiology* 37, 153-183.
- Skrandies, W., 2004. Die Bedeutung von Wörtern und elektrische Hirnaktivität des Menschen. In: Müller H.M., Rickheit G. (Hrsg.) *Neurokognition der Sprache*. Tübingen: Staufenburg, 91-106.
- Springer, S.P., Deutsch, G., 1998. *Linkes – rechtes Gehirn*. Heidelberg: Spektrum.
- St. George, M., Kutas, M., Martinez, A., Sereno, M.I., 1999. Semantic integration in reading: Engagement of the right hemisphere during discourse processing. In: *Brain* 122, 1317-1325.
- Stowe, L.A., Haverkort, M., Zwarts, F., 2005. Rethinking the neurobiological basis of language. *Lingua* 115, 997-1042.
- Tettamanti, M., Moro, A., Messa, C., Moresco, R.M., Rizzo, G., Carpinelli, A., Matarrese, M., Fazio, F., Perani, D., 2005. Basal ganglia and language: phonology modulates dopaminergic release. In: *NeuroReport* 16, 397-401.
- Ullman, M.T., 2006. Is Broca's area part of basal ganglia thalamocortical circuit? In: *Cortex* 42, 480-485.
- Wahl, M., Marzinzik, F., Friederici, A.D., Hahne, A., Kupsch, A., Schneider, G.H., Saday, D., Curio, G., Klostermann, F., 2008. The human thalamus processes syntactic and semantic language violations. In: *Neuron* 59, 695-707.
- Wallesch, C.W., 2006. Sprache. In: Karnath, H.-O., Trier, P. (Hrsg.) *Neuropsychologie*. Berlin: Springer.
- Weiss, S., 2009. *Gehirnoszillationen und neuronale Kommunikation während der Verarbeitung von Sprache*. Kum. Habilitationsschrift, Universität Bielefeld.
- Weiss, S., Müller, H.M., 2003. The contribution of EEG coherence to the investigation of language. *Brain and Language* 85, 325-343.

