



universität
wien

DIPLOMARBEIT

Titel der Diplomarbeit

Vom Greifen zum Begriff Sprache im Lichte der Spiegelneuronen

Verfasser

Matthias Rella, BSc

angestrebter akademischer Grad

Magister der Philosophie (Mag. phil.)

Wien, im März 2011

Studienkennzahl lt. Studienblatt: A 328

Studienrichtung lt. Studienblatt: Diplomstudium Allgem./Angew. Sprachwissenschaft (Stzw)

Betreuerin: Ao. Univ.-Prof. Dr. Chris Schaner-Wolles

Inhaltsverzeichnis

Einführung	1
1 Spiegelneuronen	3
1.1 Entdeckungsgeschichte	3
1.2 Funktionsweise	4
1.2.1 Handlungen mit der Hand	5
1.2.2 Handlungen mit dem Mund	6
1.2.3 Kodierung des Handlungsziels	8
1.2.4 Zusammenfassung	10
1.3 Parietale Spiegelneuronen	11
1.4 Nachweis beim Menschen	13
1.4.1 Neuroanatomische Homologien	13
1.4.2 Messverfahren und Technologien	16
1.4.3 Neurofunktionale Homologien	18
1.5 Sinn und Zweck der Spiegelneuronen	23
2 Spiegelneuronen und Sprache	27
2.1 Sprachareale mit Spiegelneuronen	27
2.1.1 Broca-Areal	27
2.1.2 Gyrus Supramarginalis	32
2.1.3 Gemeinsamkeiten	35
2.2 Spiegelneuronen in der Sprachverarbeitung	36
2.2.1 Artikulatorische Phonetik und Phonologie	36
2.2.2 Graphematische Phonologie	41
2.2.3 Semantik	44
2.2.4 Syntax	49
2.2.5 Zusammenfassung	53

3 Spiegelneuronen und Sprachentwicklung	55
3.1 Gesten	55
3.1.1 Entwicklung	56
3.1.2 Funktion	60
Perzeption	61
Produktion	62
Gestik bei nicht menschlichen Primaten	64
3.1.3 Integration von Gestik und Sprache	66
3.2 Erstspracherwerb	69
3.2.1 Kommunikatives Verhalten	70
3.2.2 Gestik und Sprache	71
3.2.3 Gebärdensprache	74
3.2.4 Die Rolle der Spiegelneuronen	75
3.3 Sprachevolution	77
3.3.1 Die „Mirror System Hypothesis“	77
3.3.2 Kommunikation durch Kooperation	79
Conclusio	81
Literaturverzeichnis	83
Anhang	95
Zusammenfassung	95
Abstract	96
Kurzbiographie	97

Danksagung

Mein erster Dank gilt Prof. Chris Schaner-Wolles, die mich einst in einem klärenden Gespräch auf Spiegelneuronen aufmerksam gemacht und dadurch den Keim für diese Arbeit gelegt hatte.

Aus tiefstem Herzen danke ich meinen Eltern, Edith und Walter Rella, dass sie mir mein Studium ermöglichten und mir immerzu ihre Unterstützung nicht nur in finanzieller Hinsicht angedeihen ließen, und hier insbesondere meinem Vater, der diese Arbeit wohlwollend gelesen und konstruktiv kommentiert hat.

Zu Dank verpflichtet bin ich auch Cornelia Braun, die mir ebenfalls wertvolle Hinweise auf formelle und stilistische Ungereimtheiten zuteil werden ließ.

Danke!

Einführung

Die Entdeckung der sogenannten „Spiegelneuronen“ haben Natur- und Geisteswissenschaften gleichermaßen fundamental erfasst. Sie warf nicht bloß neues Licht auf neurologische Verarbeitungsprozesse des Gehirns, sondern berührte auch kommunikationstheoretische und philosophische Kernfragen folgender Art:

„Weshalb kann ich mein Gegenüber verstehen oder: kann ich ihn überhaupt verstehen? Warum bleibt der Mensch nicht in seinem Körper und seiner Erfahrung gefangen, sondern trennt zwischen einem Du und einem Ich? Wie lassen sich die Handlungen anderer antizipieren? Und schließlich: Aus welchem Grund ist der Mensch ein soziales Wesen?“
(Zaboura, 2009:15)

Mit solchen Fragen beschäftigt sich die Arbeit jedoch nur am Rande. In ihrem Fokus liegt vielmehr die Relevanz der Spiegelneuronen für die menschliche Sprache und Sprachentwicklung, jedoch aus einer neurolinguistischen und weniger kommunikationswissenschaftlichen oder philosophischen Perspektive. Dazu greift sie den aktuellen Erkenntnisstand an der jüngsten Forschungsliteratur ab und fasst ihn übersichtlich zusammen.

Kapitel 1 liefert zunächst die faktische Basis der Arbeit. Angefangen bei der Entdeckungsgeschichte wird hier dargelegt, in welcher Pioniersarbeit Eigenschaft und Funktion der Spiegelneuronen am Gehirn des Makaken freigelegt wurden. Darauf aufbauend wird der Frage nachgegangen, ob und wie sie am menschlichen Cortex nachgewiesen werden können und mittels welcher technologischen Errungenschaften der neueren Zeit hier Einblick gewährt wird.

Das zweite Kapitel widmet sich Spiegelneuronen im Kontext der neuronalen Sprachverarbeitung. Dazu werden zuerst jene Gehirnnareale, die hierfür eine zentrale Rolle spielen, genauer betrachtet und von einer Seite beleuchtet, die ihre Bedeutung für Spiegelneuronen sichtbar macht. Dies führt sodann zu einer genaueren funktionalen Verortung dieser speziellen Nervenzellen auf verschiedenen Ebenen der Sprachverarbeitung.

Im dritten und letzten Teil wendet sich die Arbeit der Sprachentwicklung in der onto- und phylogenetischen Menschwerdung zu und geht der Frage nach, welche Funktion Spiegelneuronen hierbei erfüllen. Es wird für eine körperbasierte Genesis der Sprache argumentiert und dabei behandelt, inwieweit die Entwicklung manueller Handlungen einerseits den Erstspracherwerb beeinflussen und andererseits Grundlage für Sprachevolution gewesen sein könnte.

Zum Schluss wird bewertet, was Spiegelneuronen zum Bild der Sprache beitragen können und welche weiteren Fragen sie aus linguistischer Sicht aufwerfen.

Kapitel 1

Spiegelneuronen

Spiegelneuronen sind kortikale Nervenzellen, die aktiv sind, wenn eine Handlung mit Hand, Mund oder Fuß durchgeführt wird. Ihre Besonderheit liegt darin, dass sie dies nicht nur sind, wenn das Individuum die entsprechenden Bewegungen selbst tätigt, sondern auch dann, wenn es dieselbe Handlung an einem anderen wahrnimmt. Diese somato-sensorische Reizung der Spiegelneuronen ist die dieselbe, wie wenn das Individuum die Aktion selbst ausführte. Sie wird innerlich „gespiegelt“.

1.1 Entdeckungsgeschichte

Giacomo Rizzolatti und Kollegen der Universität Parma, Italien untersuchten Ende der 80er, Anfang der 90er Jahre des 20. Jahrhunderts am Gehirn von Makaken (*Macaca nemestrina*) den prämotorischen Cortex (Areal 6), welcher dem primären motorischen Cortex (Areal 4) vorgelagert ist. Dazu führten sie Tiefenelektroden in das Nervengewebe ein und zeichneten die Erregungspotentiale einzelner Neuronen und kleiner Neuronengruppen auf. Ihr eigentliches Ziel war, mehr über die funktionalen Eigenschaften dieses Areals in Erfahrung bringen, da es vorangegangenen Untersuchungen zufolge eine Rolle speziell bei Hand- und Mundbewegungen spielen sollte. Damit sollten Aufschlüsse in eine langjährige Debatte über die Beziehung zwischen Areal 4 und 6 eingebracht werden (siehe Gentilucci u. a., 1988a).

Eine Gruppe von Neuronen, die sich im inferioren Bereich von Areal 6 befindet, welcher als *F5* bezeichnet wird (siehe Abb. 1.4, S. 11), erregte das besondere Interesse in zweierlei Hinsicht. Die erste bemerkenswerte Eigenschaft war, dass sie ausschließlich auf bestimmte zielgerichtete Greifhandlungen als Ganzes reagierten:

„The most important property of F5 neurons was that their firing correlated with specific motor acts and not with individual movements

made by the animal. Movements in which the animal used the same muscles as in the effective motor act, but for other purposes, failed to activate the neurons.” (Gentilucci u. a., 1988b:493)

Dabei waren jeweils unterschiedliche Neuronen aktiv, wenn das Zielobjekt zum Mund geführt wurde, wenn der Griff nach dem Objekt Zeigefinger und Daumen, mehrere Finger und Daumen oder die ganze Hand erforderte. In jedem Fall ging die Aktivierung stets mit dem gesamten Bewegungsablauf einher. Die Regungen einzelner, beteiligter Muskeln genügte nicht.

Die zweite Besonderheit hing mit der Größe von Objekten zusammen. Bekam der Affe einen Gegenstand von bestimmter, greifbarer Ausdehnung zu sehen, feuerten eben genau jene F5-Neuronen, die auch beim Griff nach dem Objekt aktiv wären, und das, ohne dass sich der Affe bewegte.

„There was a relation between the type of prehension coded by the cell and the size of the stimulus effective in triggering the neurons. Precision grip neurons were activated only by small visual stimuli, whereas unspecific neurons fired in response to large and small stimuli.” (Gentilucci u. a., 1988b:501)

Im Zuge näherer Untersuchungen dieser bemerkenswerten Nervenzellen machte man schließlich – mehr oder weniger zufällig – die entscheidende Entdeckung:

„[...] we incidentally observed that some experimenter’s actions, such as picking up the food or placing it inside the testing box, activated a relatively large proportion of F5 neurons in the absence of any overt movement of the monkey.” (Pellegrino u. a., 1992:176)

Es gab folglich nicht nur Neuronen, die beim Erblicken und beim Ergreifen eines spezifischen Gegenstands feuerten, sondern auch solche Bewegungsneuronen, die beim Erblicken der eben selbigen, zielgerichteten Handlungen anderer Individuen aktiviert wurden. Erstere bezeichnete man später als „kanonische Neuronen” und zweitere als „Spiegelneuronen”.

1.2 Funktionsweise

Die Funktionsweise der Spiegelneuronen wurde am Makaken bereits unter verschiedenen Aspekten betrachtet. Wie sie im Detail funktionieren, auf welche Bewegungen und unter welchen Bedingungen sie reagieren, wird nun im folgenden näher beleuchtet.

1.2.1 Handlungen mit der Hand

Erstmals systematisch und eingehend untersucht wurden die Spiegelneuronen von Pellegrino u. a. (1992) und Gallese u. a. (1996), indem sie verschiedene Bewegungen im Angesicht eines Makaken durchführten. Dazu gehörten das Greifen nach einem Objekt, die Manipulation eines Objekts und verschiedene Gesten mit und ohne emotionalem Gehalt. Die Versuche wurden jeweils in unterschiedlichen Entfernungen und aus unterschiedlichen Blickwinkeln des Affen durchgeführt.

Von den 532 untersuchten F5-Neuronen wurden 92 als Spiegelneuronen identifiziert, die Gallese u. a. (1996) nach ihrer Funktion in drei Gruppen unterteilten:

- Manche zeigten nur dann eine Reaktion, wenn die beobachtete Handlung eindeutig der selbst ausgeführten Handlung entsprach. Ein solches Spiegelneuron, das beim Greifen nach einem kleinen Objekt (zB. einer Erdnuss) feuerte, tat dies ebenso beim Beobachten derselben Greifbewegung.
- Die zweite Gruppe enthielt Neuronen, die sich weniger strikt verhielten und auf mehrere ähnliche Bewegungen reagierten. Dies konnten zB. zwei Greifbewegungen sein, die sich in der Art des Greifvorgangs unterschieden: die eine mit Finger und Daumen, die andere mit der ganzen Hand. Manche von diesen wurden nur beim Beobachten, andere auch beim Ausführen von mehreren, ähnlichen Handlungen aktiviert.
- Der Rest zeigte keine Korrelation zwischen beobachteter und selbst durchgeführter Bewegung. Das heißt, sie reagierten in beiden Fällen auf unterschiedliche Handlungen und waren streng genommen eigentlich keine Spiegelneuronen.

In allen Gruppen beeinflusste die Entfernung zwischen dem Tier und der präsentierten Handlung nur die Stärke der Aktivität, nicht aber ihre Qualität. Das heißt, wie schon von Gentilucci u. a. (1988b) beobachtet, bestimmte die Größe des Zielobjekts und welcher Körperteil an der Handlung beteiligt war, welche Neuronen aktiviert wurden.

Abb. 1.1 veranschaulicht einen Versuchsablauf mit Greifbewegung. Sowohl bei der Bewegung des Untersuchers als auch bei der Bewegung des Affen zeigt das gemessene F5-Neuron deutliche Aktivität. Sie begleitet jeweils fast die gesamte Bewegung und nicht einzelne Muskelregungen. Die Pause zwischen erster und zweiter Erregung bezeichnet die Phase, in der das Tablett mit dem Objekt zum Affen hingeführt wurde.

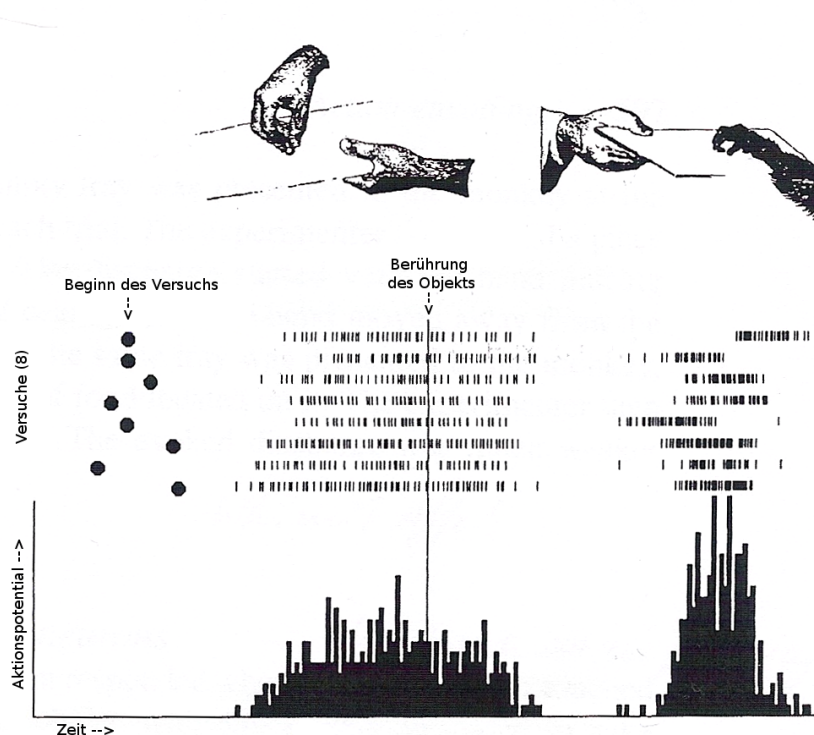


Abbildung 1.1: Versuchsablauf und Aktivität eines Spiegelneurons bei beobachteter und durchgeführter Greifbewegung (Bild nach Gallese u. a., 1996:596).

Kontrollexperimente wie Greifbewegungen der Hand ohne Objekt oder das Erfassen eines Objekts mit einem Werkzeug lösten keine oder nur schwache entsprechende Reaktionen der F5-Neuronen aus. Da sich weiters nicht ausschließen ließ, dass die Reaktion der Spiegelneuronen bei eigener Handlung darauf zurückzuführen war, dass der Affe seine Bewegungen selbst sieht, wurden einige Versuche in Dunkelheit durchgeführt. Aber auch hier verhielten sich die Spiegelneuronen wie Motorneuronen und feuerten bei aktiver Bewegung.

Um außerdem sicher zu gehen, dass beim Affen keine unbemerkte Muskelaktivität auftritt, während er eine Handlung beobachtet und Spiegelneurone reagieren, wurde die Aktivität der entsprechenden Muskelpartien mittels Elektromyographie (EMG) aufgezeichnet. Muskelregungen wurden aber nur gemessen, wenn der Makake sich auch tatsächlich selbst bewegte.

1.2.2 Handlungen mit dem Mund

Da die vorangegangenen Untersuchungen, die hauptsächlich auf Handbewegungen konzentriert waren, auch einige Nervenzellen zum Vorschein brachten, die bei Mundbewegungen reagierten, machten sich Ferrari u. a. (2003) auf die Suche nach wei-

teren solchen Spiegelneuronen. Dazu inspizierten sie jenen Teil des Areals F5, von dem man bereits wusste, dass er überwiegend Motorneuronen für Mundbewegungen enthält, denn: „*The demonstration of its existence would be of great interest given the importance of oro-facial actions recognition during social interactions.*” (Ferrari u. a., 2003:1703)

Der Versuchsaufbau war im Prinzip ähnlich zu jenem von Gallese u. a. (1996). An die Stelle von Handbewegungen traten hier aber Handlungen wie Kauen, Saugen, Beißen oder Erfassen eines Objekts mit dem Mund. Zusätzlich wurden auch intransitive Handlungen, die bei den Makaken kommunikative Funktion haben, in den Testkatalog aufgenommen. Hierzu gehören zB. Schmatzen oder Hervorschieben der Lippen.

Ursprünglich wollte man, um reproduzierbare Testbedingungen zu schaffen, dem Affen die Bewegungen via 3D-Videoprojektion vorführen und stieß dabei auf eine weitere wichtige Qualität der Spiegelneuronen: Sie feuern nur in natürlichen Situationen, was das Vorhaben freilich scheitern ließ und die Autoren wiederum zwang, sich selbst für die Bewegungen herzugeben.

Die Ergebnisse der Experimente sind vergleichbar mit denen der Handbewegungen. Auch hier stellte man Spiegelneuronen fest, deren kodierte Bewegung mit der Erregung bei Beobachtung eindeutig korrelierte, und solche, die auf mehrere beobachtete Handlungen reagierten.

Nur ein geringer Teil der an den intransitiven, kommunikativen Handlungen beteiligten Neuronen hingegen war auch bei der Beobachtung aktiv. Stattdessen reagierten überraschenderweise Nervenzellen, die eigentlich mit der Nahrungsaufnahme assoziiert waren. Folgende Beziehung schien aber zu bestehen:

„In general, there was a good correlation between the motor features of the effective observed (communicative) action and those of the effective executed (ingestive) action. For example, when a neuron discharged to the observation of lips protrusion, its motor response occurred during the monkey lips protrusion for getting juice and not during other ingestive actions [...]” (Ferrari u. a., 2003:1709)

Als Erklärung dafür, dass die Spiegelneuronen bei diesen intransitiven Handlungen überhaupt aktiviert wurden, wohingegen man ihre Aktivität ja bisher stets nur bei zielgerichteten Bewegungen feststellen konnte, vermuten die Autoren, „[...] *that during the observation of an intransitive action, the monkey reconstructs internally a goal-directed action.*” (Ferrari u. a., 2003:10) und verweisen auf die Studie von Umiltà u. a. (2001), die im nächsten Abschnitt vorgestellt wird.

1.2.3 Kodierung des Handlungsziels

Wie bereits Gentilucci u. a. (1988b) äußerten, sind F5-Neuronen nur an transitiven, auf Objekte ausgerichteten Aktionen beteiligt und nur wenn diese als Ganzes ausgeführt werden. Einzelne Phasen der Bewegung reizen die Nervenzellen nicht. Dies gilt auch für die Neuronen des beobachtenden Affen, wie Gallese u. a. (1996) zeigen konnten. Gentilucci u. a. (1988b) stellten bereits die Vermutung auf, dass F5-Neuronen komplexere Eigenschaften als Neuronen des primären motorischen Cortex hätten, da sie abstrakte Konzepte wie *Ziel* und *Zweck* kodierten:

„The definition of motor act includes the concept of aim. A motor act terminates when its aim has been achieved. In this sense inferior area 6 neurons, both those active during one motor act as well those active during two or more motor acts, are goal-related neurons.” (Gentilucci u. a., 1988b:504f)

Gallese u. a. (1996) formulieren nach den Versuchen mit den Bewegungsbeobachtungen die Hypothese weiter und führen aus, dass für die Neuronen auch die Qualität des Objekts nicht ausschlaggebend sei. Es könne sich um Futter oder um einen beliebigen Laborgegenstand gleicher Größe handeln, obwohl die Bedeutung für den Affen jeweils eine andere sein müsste. Dennoch unterschied sich in jedem Fall die Reaktion der Neuronen nicht.

Um diese Hypothese zu testen unternahmen Umiltà u. a. (2001) folgendes Experiment: Zuerst hatte der Affe eine Hand eines Menschen zu beobachten, die nach einem Gegenstand griff wie in Abb. 1.2 (1A) dargestellt. Im zweiten Versuchsaufbau (1B) ging es um dieselbe Bewegung jedoch mit dem Unterschied, dass die zweite Hälfte der Handlung und ihr Zielobjekt hinter einer Wand versteckt waren. Der Affe konnte daher nur sehen, wie die Hand dahinter verschwand.

Als Kontrollexperiment wurden dieselben Handbewegungen, zuerst offen, dann verdeckt durchgeführt, jedoch nur gemimt und ohne Gegenstand (2A und 2B).

Von den untersuchten Spiegelneuronen, die unter der Testbedingung 1A reagierten, war der Hypothese entsprechend ein Großteil auch unter der verdeckten Variante 1B aktiv. Analog verhielt es sich bei 2A und 2B. Hier waren die Nervenzellen in beiden Fällen nicht aktiviert.

„First, in the hidden condition, neurons responded to the presented action as if there were no screen and the whole action could be seen. Second, when the object was taken away (hidden miming condition),

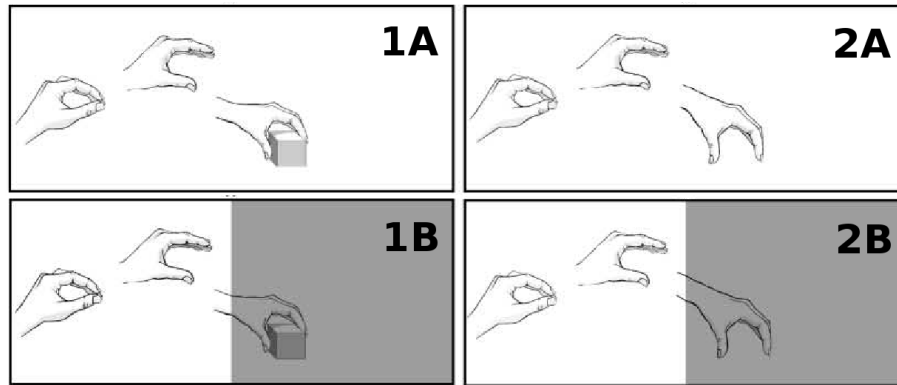


Abbildung 1.2: Vier Testbedingungen (Bild nach Umiltà u. a., 2001:158).

neurons failed to respond to the presented action, although what the monkey saw was identical in the two hidden conditions – the only difference being the monkey’s ‘knowledge’ of the presence of the object. For these neurons, ‘out of sight’ was therefore not ‘out of mind.’” (Umiltà u. a., 2001:156)

Überhaupt bedürfen Spiegelneuronen mitunter gar keines visuellen Reizes, wie folgende Untersuchung zeigt. Um die Reaktion der Spiegelneuronen auch vom Geräusch, das eine Handlung erzeugt, differenzieren zu können, verglichen Kohler u. a. (2002) ihre Aktivität, wenn der Affe eine Handlung nur sehen aber nicht hören, nur hören aber nicht sehen und sowohl sehen als auch hören konnte. Solche Handlungen waren beispielsweise das Zerreißen von Papier oder das Aufbrechen einer Erdnuss.

Tatsächlich konnten die Autoren eine Menge von Spiegelneuronen ausmachen, die auch bei rein auditivem Input feuerten, besonders wenn das Geräusch charakteristisch für eine Handlung war. Bei Kontrollexperimenten mit Geräuschen, die mit keiner transitiven Bewegung verbunden sind, zB. Rauschen oder Schreien, war dies nicht der Fall.

Bemerkenswert ist in dieser Hinsicht, dass die Aktion „Erdnuss aufbrechen“ in der rein visuellen, geräuschlosen Präsentation von den Neuronen nicht „erkannt“ wurde. Die Bewegung dieser Handlung dürfte so unscheinbar sein, dass sie nur dann erfolgreich kodiert wird, wenn der auditive Kanal zur Verfügung steht.

Der endgültige Beweis, dass F5-Neuronen von der konkreten Bewegung einer zielgerichteten Handlung dissoziiert sind, wurde von Umiltà u. a. (2008) erbracht. Hier lernte der Affe zuvor, ein Objekt mit einer Zange aufzunehmen, und man wollte in erster Linie herausfinden, ob beim Griff mit der Zange dieselben Neuronen aktiviert werden wie beim Griff mit der Hand. Um außerdem unterscheiden zu können, ob das Ziel oder die Bewegung kodiert wird, verwendete man zwei Arten von Zangen:

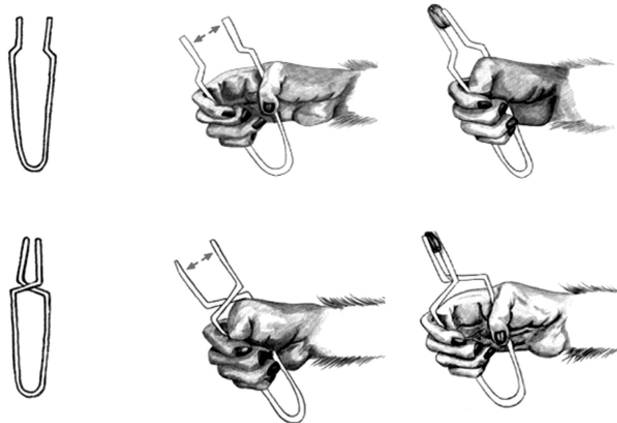


Abbildung 1.3: Normal und umgekehrt zu gebrauchende Zangen (Bildquelle: Umiltà u. a., 2008:2209)

Erstere war normal zu gebrauchen, d.h. sie öffnete und schloss sich mit dem Öffnen und Schließen der Hand, zweite hingegen erforderte die umgekehrten Aktionen, d.h. sie öffnete sich, indem man die Hand schloss, und schloss sich, indem man die Hand öffnete (siehe Abb. 1.3).

Tatsächlich fanden Umiltà u. a. (2008) eine beträchtliche Anzahl Neuronen, die bei beiden Zangenarten aktiv waren. Dies zeigte einerseits die generelle Fähigkeit der Neuronen davon zu abstrahieren, ob die Handlung mit der Hand oder Zange durchgeführt wird, „as if the tool were the hand of the monkey and its tips were the monkey’s fingers” (Umiltà u. a., 2008:2211), und andererseits, dass es nicht auf die Bewegung selbst ankam, sondern auf das Ziel der Bewegung. Ein Teil der untersuchten Neuronen konnte auch auf visuellem Wege gereizt werden, bestand also aus Spiegelneuronen.

1.2.4 Zusammenfassung

Neuronen im Areal F5, seien sie Spiegelneuronen oder nicht, besitzen allesamt folgende bemerkenswerten Eigenschaften:

- Sie kodieren stets eine Handlung als Ganzes, nie bloß Teile.
- Die Handlung muss ein Zielobjekt involvieren.
- Die Größe des Objekts bestimmt die Qualität, die Entfernung zum Beobachter die Quantität ihrer Aktivität.

- Sie sind kontextsensitiv und reagieren zB. nur in natürlicher Umgebung in vollem Maße.
- Die Wahrnehmung kann in verschiedenen Modalitäten erfolgen.

Sie sind weniger mit der Bewegung selbst assoziiert als mit dem Ziel der Bewegung. Dafür spricht, dass die Handlung auf verschiedene Weisen und in verschiedenen Modalitäten erfolgen kann. Solange sie zielgerichtet ist, feuern diese Neuronen. Spiegelneuronen hingegen zeichnen noch zusätzlich folgende Charakteristika aus:

- Sie reagieren, wenn die Handlung selbst durchgeführt wird und wenn sie an einem anderen Individuum wahrgenommen wird.
- Die Kongruenz der Aktivität bei selbst durchgeführter gegenüber wahrgenommener Handlung kann unterschiedlich strikt sein. Manche Neuronen korrespondieren sowohl aktiv als auch passiv mit genau einer Handlung, manche aber mit mehreren Handlungen und dies in einem oder auch in beiden Modi.

1.3 Parietale Spiegelneuronen

Ungefähr ein Jahrzehnt nach Entdeckung der Spiegelneuronen im Areal F5, welches sich im frontalen, inferioren prämotorischen Cortex befindet, fand man auch im inferioren Parietallappen Nervenzellen mit denselben Eigenschaften.

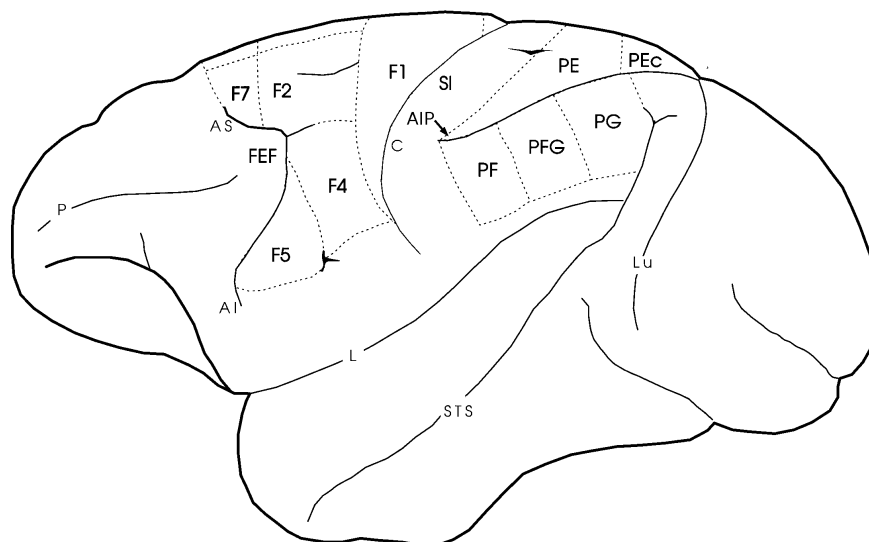


Abbildung 1.4: Schematische Darstellung des linksseitigen Makaken-Gehirns (Bild nach Rizzolatti und Craighero, 2004:C-1)

Den Studien von Rozzi u. a. (2008) und Fogassi und Luppino (2005) zufolge gibt es dort ebenfalls Spiegelneuronen, die wie jene im Areal F5 auf sowohl beobachtete als auch selbst ausgeführte, zielgerichtete Hand- und Mundbewegungen reagieren und zwar relativ unabhängig von der Entfernung der Handlung zum Affen. Außerdem konnte man die Neuronen, die sich hauptsächlich im Areal PFG (siehe Abb. 1.4) befinden, ebenfalls hinsichtlich ihrer Kongruenz zwischen der Aktivität bei Bewegungsbeobachtung und der bei Bewegungsdurchführung unterscheiden. Das heißt, wie manche der F5-Neuronen, reagierte ein Teil von ihnen nur auf genau eine bestimmte Bewegung sowohl beim Beobachten als auch beim Durchführen, während andere nicht so strikt gekoppelt waren.

Dieser Bereich, ob seiner zentralen Lage an der Schnittstelle von Parietal-, Temporal- und Occipitallappen, ist mit visuellen, somato-sensorischen und prämotorischen Arealen (F5) verbunden und seine wesentliche Funktion dürfte in der Bewegungssteuerung liegen.

„It is largely agreed that these parietal areas control arm, hand or eye movements, by integrating somatosensory and visual information with motor signals provided by the different sectors of premotor cortex to which these areas are connected. [...] recent studies have suggested that some of them [...] might be involved in planning coordinated eye and hand movements.” (Fogassi und Luppino, 2005:626)

Im Unterschied zu F5-Neuronen kodierte laut Fogassi u. a. (2005) die Mehrheit der parietalen Spiegelneuronen auch eine bestimmte Folge von zwei Handlungen, zB. wenn nach einer Greifbewegung die Hand zum Mund geführt, nicht aber wenn der ergriffene Gegenstand wieder abgelegt wurde, und nicht wenn die Bewegung zum Mund isoliert erfolgte. Diese funktionale Eigenschaft erklären sich die Autoren durch die Notwendigkeit, mehrere Bewegungen zusammenhängend und flüssig ausführen zu können.

Ein weiterer Bereich, welcher im vorderen Teil der intraparietalen Furche liegt (*sulcus intraparietalis anterior*, in Abb. 1.4 „AIP“), enthält hingegen eine Art von kanonischen Neuronen, die beim visuellen Eindruck eines Objekts und beim Griff danach reagieren, „*thus accomplishing the visuomotor transformation necessary for object grasping*“ (Rozzi u. a., 2008:1584). AIP wurde bereits in früheren Untersuchungen verantwortlich gezeichnet, Formeigenschaften von Objekten zu kodieren.

1.4 Nachweis beim Menschen

Die wichtigste Frage, die die Entdeckung der Spiegelneuronen beim Affen provoziert, ist die nach der Relevanz für den Menschen. Wie bereits angeschnitten und später noch genauer ausgeführt, könnten Spiegelneuronen für das Erkennen und Verstehen von Handlungen anderer, für das Imitieren und Lernen, für Empathie und Kommunikation an sich die neuronale Grundlage sein. Solche Tragweite eines Phänomens lässt weitreichende anthropologische und philosophische Implikationen zu und macht die eigentliche Brisanz der Spiegelneuronen aus.

Dieses Kapitel beschäftigt sich daher mit Studien, die die Existenz von Spiegelneuronen beim Menschen nachzuweisen versuchen. Dies erfolgt einerseits „offline“, indem man Ähnlichkeiten in der Struktur und Zellarchitektonik zwischen dem Makaken- und dem Menschenhirn sucht, und andererseits „online“, indem man mittels bildgebender Verfahren die menschliche Gehirnaktivität sichtbar macht.

1.4.1 Neuroanatomische Homologien

Die Versuche mit Makaken würden nicht stattfinden, könnte man aus den Erkenntnissen keine Schlüsse auf das menschliche Gehirn ziehen. Invasive Einzelzellableitungen, bei denen Elektroden in das Nervengewebe eingeführt werden und die Aktivität einzelner Neuronen festgestellt werden kann, sind an Menschen und Menschenaffen nur zu medizinischen Zwecken erlaubt. Von allen anderen Spezies, für die diese ethische Schranke nicht gilt, ist die Art der Makaken den Menschen am nächsten (Sereni und Tootell, 2005:135). Sie gehört zu einem Entwicklungszweig, der sich vor 25 Mio. Jahren von den gemeinsamen Vorfahren des Menschen abspaltete¹. Daher sind einige cerebrale Strukturen zwischen Makaken und Menschen homolog, weshalb das Gehirn dieser Tiere von der Neurowissenschaft als Modell für das menschliche Gehirn herangezogen wird.

Dies ist nicht unproblematisch. Passingham (2009) weist auf wesentliche Unterschiede zwischen den beiden Gehirnen hin, die trotz ihrer „nahen“ Verwandtschaft bestehen. Besonders der Umstand, dass das menschliche Gehirn um das ca. 4.8-fache größer ist, hat zur Folge, dass sich der Cortex viel feiner ausdifferenziert hat. Außerdem liegen hier die Neuronen dichter zusammen als beim Affen. Weiters haben sich in manchen Regionen Zelltypen entwickelt, die beim Makaken phylogenetisch gesehen noch nicht existieren. Für Passingham (2009) ist es daher unerlässlich, die Ergebnisse aus Einzelzellableitungen beim Affen auch mittels bildgebender Verfah-

¹Quelle: <http://encyclopedia.thefreedictionary.com/catarrhini> (Zugriff: 17. 11. 2010)

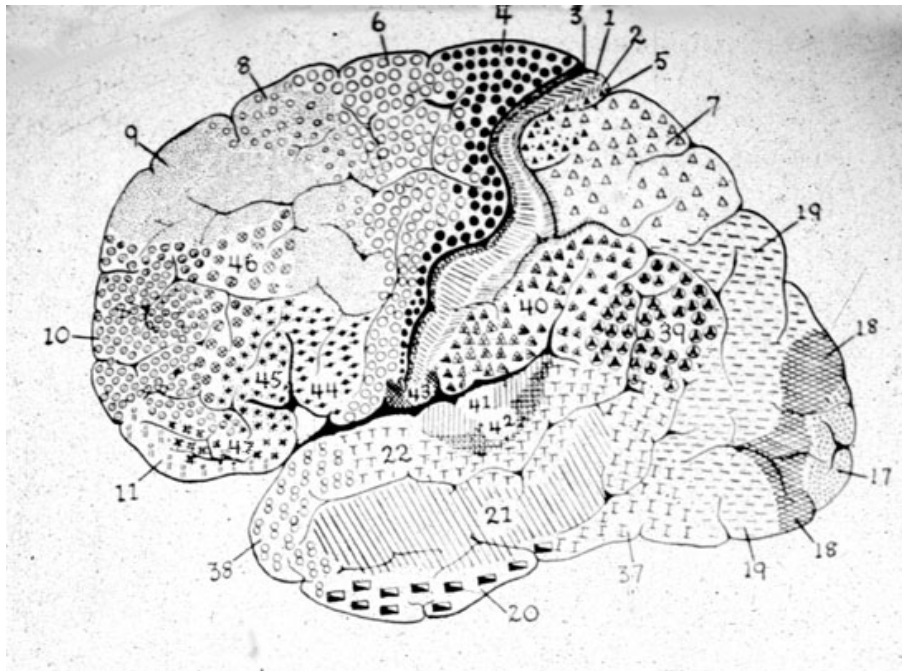


Abbildung 1.5: Cytoarchitektonische Karte des menschlichen Gehirns nach Brodmann. Die Areale werden als „Brodmann-Areale“ (BA) bezeichnet. (Bildquelle: <http://www.gmanif.com>, Zugriff: 17.11.2010)

ren am Menschen und möglichst auch am Tier zu überprüfen.

Arbib und Bota (2003) führen die drei wichtigsten neurophysiologischen Eigenschaften an, die zwischen verschiedenen Arten verglichen werden, um sagen zu können, ob zwei Gehirnregionen homolog sind. Homologie ist umso eher anzunehmen, je ähnlicher ihre

- **Lage**, relativ gesehen zu markanten Gehirnstrukturen, die in beiden Arten eindeutig identifiziert werden können (zB. die beiden großen Furchen *sulcus lateralis* und *sulcus centralis*), und relativ gesehen zur Gehirngröße,
- **Cytoarchitektonik**, dh. Art, Größe und Dichte ihrer Nervenzellen, und
- **Vernetzung** mit anderen Gehirnbereichen.

Kann man nun aufgrund dieser Kriterien Areale des menschlichen Gehirns finden, die homolog zu jenen Bereichen beim Makaken sind, in denen man Spiegelneuronen entdeckt hat, wäre dies ein Indiz dafür, dass auch beim Menschen solche Nervenzellen existieren. Aufgrund unterschiedlicher Messmethoden und individueller Ausprägungen der untersuchten Gehirne sind die Ergebnisse der Studien zur cerebralen Homologie zwischen Mensch und Affe teilweise nicht eindeutig. Arbib und Bota

(2003) haben aber für jene Bereiche, die den größten Schwankungen unterlagen, den kleinsten gemeinsamen Nenner herausgezogen. Dem Areal F5 beim Makaken entsprechen demnach beim Menschen die Brodmann-Areale 44 und teilweise 45 (siehe Abb. 1.5):

„[...] the minimal extent of Brodmann’s area 44 as considered by us for macaque appears to at least overlap F5c [einen Teil von F5, Anm.] and therefore may contain the mirror neurons. It is also possible that the macaque homologue of area 44, as considered in this paper includes the F5 canonical neurons, since these two populations of neurons are not totally segregated.” (Arbib und Bota, 2003:12)

Die Suche nach anatomischen Homologien zu den parietalen Bereichen mit Spiegelneuronen (vor allem PFG) gestaltet sich ebenfalls nicht unproblematisch, wie Iacoboni (2006) darlegt. Laut Brodmann, der nicht nur am menschlichen Cortex eine bis heute gültige Einteilung vornahm, sondern auch homologe Bereiche am Makaken einzeichnete, sind Homologien nicht so eindeutig wie in anderen Teilen des Gehirns. Das Areal 7, welches PFG enthält, verortete Brodmann beim Menschen oberhalb der intraparietalen Furche, beim Affen hingegen unterhalb. Einer solchen Einteilung widersprechen aber spätere cytoarchitektonische Landkarten, die mehr Ähnlichkeiten im Parietallappen zu sehen meinen: „[...] *similarities between the superior and inferior parietal lobules in the two species, with the superior parietal lobule corresponding to area PE and the inferior parietal lobule corresponding to area PF rostrally and PG caudally*” (Iacoboni, 2006:2692).

Die Homologie des Areals PFG befindet sich demnach erwartungsgemäß im vorderen Teil (*rostral*) des unteren Parietallappen (*lobus parietalis inferior*) des Menschen. Diese Stelle trägt bei Brodmann die Nummer 40, eine Zahl, die er beim Affen gar nicht verzeichnete. Iacoboni (2006) vermutet daher, dass Brodmann bei der Unterteilung dieses Bereichs des Gehirns irrte und dem Areal 7 beim Makaken eigentlich die Areale 40 (und 39, für PG) beim Menschen entsprechen, und nicht das superior gelegene Areal 7. Diese Annahme würde auch erklären, warum die funktionalen Eigenschaften dieser Areale, die man mittels bildgebender Verfahren am Menschen gewonnen hat (siehe Kapitel 1.4.3) ähnlich zu denen des Makaken-Areals 7, also von PF, PFG und PG (siehe Abb. 1.4) sind.

Komplementär zu anatomischen Homologien liefern funktionale Messverfahren Indizien für kortikale Ähnlichkeiten zwischen Spezies, indem die Aktivität der Gehirne bei gleichen Aufgaben verglichen wird. Funktional homolog heißt, dass Experimente, wie sie am Affen durchgeführt wurden, beim Menschen jene Bereiche

aktivieren, die als anatomisch homolog zum Makakengehirn eingestuft wurden. Dazu kommen mehrere verschiedene Verfahren zum Einsatz, die zu Beginn mit Vor- und Nachteilen kurz erläutert werden. Danach werden jeweils zu den essentiellen frontalen und parietalen Bereichen Untersuchungen zu Spiegelneuronen beim Menschen beschrieben.

1.4.2 Messverfahren und Technologien

Zu den am häufigsten eingesetzten Methoden, um die Funktionsweise des Gehirns zu untersuchen, gehören folgende:

- EEG: Elektroenzephalographie
- MEG: Magnetoenzephalographie
- PET: Positronemissionstomographie
- FMRT: Funktionelle Magnetresonanztomographie
- TMS: Transkranielle Magnetstimulation

EEG und MEG zählen zu jenen Verfahren, die elektrophysiologische Eigenschaften der Neuronenaktivität ausnutzen. Wenn eine große Anzahl Nervenzellen aktiv ist, misst erstere direkt an der Schädeloberfläche, wie sich die Stromspannung verändert. MEG zeichnet hingegen die Magnetfelder, die dabei entstehen, durch Induktion auf. Dies hat den Vorteil, dass die Signale nicht wie beim EEG durch Gewebe (Knochen, Haare) verfälscht werden.

Um eine Funktion mit einem Gehirnbereich in Zusammenhang bringen zu können, müssen „ereigniskorrelierte Potentiale“ (EKP) gefunden werden, d.h. Spannungspotentiale, die von Neuronenaktivität bei Eintritt eines bestimmten (wahrgenommenen) Ereignisses herrühren. Die beiden Verfahren liefern ein sehr genaues zeitliches Abbild der Gehirnaktivität, besitzen aber eine schlechte räumliche Auflösung. Es ist daher sinnvoll, sie mit einer der beiden folgenden Technologien zu kombinieren.

PET und FMRT messen den regionalen Blutfluss des Gehirns und liefern Messwerte zu dreidimensionalen Raumkoordinaten („Voxel“, volumetric pixel). Wo die Neuronen aktiv sind, fließt mehr Blut. Bei PET wird der Versuchsperson ein schwach strahlendes Isotop injiziert, welches beim Zerfall ein Positron emittiert. Bei der Kollision mit einem Elektron entsteht Gammastrahlung, die von außen gemessen werden kann und Aufschluss über den Entstehungsort, also den ungefähren Ort der Neuronenaktivität (mit einer Abweichung von 1-2 mm), gibt.

Bei der FMRT wird ebenfalls elektromagnetische Strahlung detektiert und als Auslöser dient keine radioaktive Substanz sondern der Kernspin, der für jedes Atom unterschiedlich ist. Der Atomspin wird zuerst mittels eines starken Magnetimpulses ausgerichtet, woraufhin er wieder in seine ursprüngliche Ausrichtung zurückschwingt. Die Dauer dieses Vorgangs ist für ein Atom charakteristisch und kann anhand der elektromagnetischen Strahlung, die dabei frei wird, gemessen werden. So lässt sich nicht nur feststellen, wo die Strahlung ihren Ursprung hat, sondern auch welches Atom sich dort befindet.

Auf diese Weise kann man sauerstoffreiches (Oxyhämoglobin) von sauerstoffarmem Blut (Desoxyhämoglobin) unterscheiden und die Neuronenaktivität messen. Denn dieser „*blood oxygenation level dependent*“ (BOLD) Effekt tritt in der Nähe von aktiven Neuronen auf, da diese mehr Sauerstoff verbrauchen als Neuronen im Ruhezustand. Mit der FMRT kann man aber auch anatomische Strukturen abbilden, indem man zB. die Position der Atome der grauen und der weißen Substanz feststellt und so ein dreidimensionales Abbild des Gehirns erhält, das man virtuell in jede beliebige Richtung zerschneiden kann.

Während die PET mehrere Wiederholungen einer Aktivität benötigt, um sie messen zu können, kann die FMRT einzelne Ereignisse aufzeichnen und erreicht daher eine bessere zeitliche Auflösung. Da die FMRT keiner radioaktiven Mittel bedarf, unterliegt sie auch keinen so strikten medizinischen und gesundheitlichen Auflagen wie die PET. Die Lärmbelastung ist bei der FMRT hingegen sehr viel höher und es dürfen keine metallischen Gegenstände in der Nähe des Geräts verwendet werden. Für beide Verfahren gilt, dass sich die Personen völlig regungslos verhalten müssen, was mit zusätzlichen Einschränkungen in der Gestaltung der Versuche verbunden ist (siehe Scott und Wise, 2003). Die Präsentation der Stimuli innerhalb der Röhre erfolgt meist über ein Spiegelsystem.

Eine speziell in der Spiegelneuronenforschung oft eingesetzte Methode ist die transkranielle Magnetstimulation (**TMS**). Wie zu Zeiten, als die Neurologie auf Läsionen angewiesen war, um Aussagen über die Funktion von Gehirnbereichen treffen zu können, lassen sich damit beliebige Regionen „ausschalten“. Dazu wird eine Magnetspule über dem Schädel positioniert, deren Magnetfeld in der Gehirnrinde die Spannungspotentiale der Neuronen verändert. Dadurch ist es möglich, Nervenzellen so stark zu hemmen, dass diese nicht mehr feuern können. Im Unterschied zur klassischen Aphasieologie kann man mittels TMS die Potentiale auch verstärken und Neuronen zum Feuern „antreiben“. Auf diese beiden Arten lassen sich bestimmte, davon betroffene Funktionen räumlich und insbesondere zeitlich sehr genau bestimmten kortikalen Bereichen zuordnen, da die elektromagnetische Induktion sofort

auf den Cortex wirkt.

Wie die Stimulation der Neuronen mit diesem Verfahren genau funktioniert, ist nicht bekannt (siehe Hallett, 2000). Aufgrunddessen und weil Nebenwirkungen, von Kopfschmerzen bis zu epileptischen Anfällen und dauerhaften neuronalen Veränderungen, auftreten können, unterliegt die Anwendung von TMS strengen Auflagen (siehe Wassermann, 1998).

1.4.3 Neurofunktionale Homologien

Als erste auf die Suche nach Indizien für Spiegelneuronen beim Menschen begaben sich die Entdecker selbst. Auf Basis der Annahme, dass potentielle Spiegelneuronen im prämotorischen Cortex mit Neuronen im motorischen Cortex in Verbindung stehen, ließen Fadiga u. a. (1995) ihre Probanden Greifhandlungen beobachten, während sie mit TMS eine Region im motorischen Cortex stimulierten, die für Regungen von Finger- und Armmuskeln verantwortlich war. Die Aktivität dieser Muskeln zeichneten sie während des Experiments per EMG auf. Das Beobachten der Handlungen in Verbindung mit TMS, die in diesem Fall die neuronalen Spannungspotentiale verstärkte, führte tatsächlich zu Reaktionen der gemessenen Muskeln, was die Hypothese, „[...] *that, if the observation of a movement activates the premotor cortex also in man, this activation should induce an enhancement of motor evoked potentials elicited by the magnetic stimulation of the motor cortex*“ (Fadiga u. a., 1995:2608), bestätigte.

Dieser Effekt, dass nämlich die Erregbarkeit des motorischen Cortex durch aktive (Spiegel-)Neuronen des prämotorischen Cortex erhöht wird, wurde wenig später auch in einer MEG-Studie von Hari u. a. (1998) ausgenutzt. Elektromagnetische Schwingungen von ca. 20 Hz, die dem präzentralen motorischen Areal entstammen, nehmen ab, wenn die Versuchsperson eine Handlung an einem Objekt vornimmt, sich die Handlung bloß vorstellt und – wie Hari u. a. (1998) feststellen konnten – die Handlung nur beobachtet.

Die Abnahme einer Schwingung bedeutet bei MEG nicht unbedingt, dass Neuronen inaktiv sind. Die Schwingung kann auch auf inhibitorischer (hemmender) Aktivität basieren und ihre Abnahme die Aufhebung oder Schwächung dieser Hemmung signalisieren. Im Ruhezustand der Person sind die Motorneuronen, die den Rhythmus von 20 Hz verursachen, somit für das Nichtbewegen verantwortlich. Feuern sie nicht, signalisiert dies folglich Handlungsbereitschaft.

Das Ergebnis von Hari u. a. (1998) ist daher ebenfalls ein indirektes Indiz für Neuronen, die bei der bloßen Beobachtung einer Handlung reagieren und in weiterer

Folge den motorischen Cortex messbar beeinflussen. Allerdings sagt es nichts über den Ort dieser Nervenzellen aus, geschweige denn, ob sie sich in den Brodmann-Arealen 44 und 45 befinden. Die Aktivität dieser Bereiche lässt sich mittels MEG nur schwer messen, da ihnen keine spezifischen Rhythmen zugeordnet werden können.

Aus diesem Grund existieren eine Reihe von Untersuchungen mit PET und FMRT, die dort einen erhöhten Blutfluss sowohl bei Durchführung als auch bei Beobachtung einer Bewegung feststellen wollen. Das Problem, das im Design für Experimente mit diesen Technologien berücksichtigt werden muss, ist, dass sich Probanden in den Geräten nur eingeschränkt und nicht wie in natura ihre Gliedmaßen bewegen können. Zum einen muss der Kopf völlig ruhig gehalten werden, was durch eine entsprechend strenge Fixierung bewerkstelligt werden kann, zum anderen ist der Raum in der engen Röhre auch sehr begrenzt. Insbesondere zielgerichtete Greifhandlungen auf Objekte lassen sich aufgrunddessen schwer durchführen. Experimente hingegen, in denen Personen solche Bewegungen nur beobachten müssen, haben dieses Problem freilich nicht und sind daher in der Literatur häufiger zu finden.

In der ersten Untersuchung dieser Art, ein PET-Experiment von Rizzolatti u. a. (1996), fand dieses Problem keine besondere Beachtung. Hier ließ man die Probanden Bewegungen aus dem Scanner heraus durchführen und beobachten. Aber genau dies könnte der Grund für das hypothesenwidrige Ergebnis gewesen sein, das keine Schlüsse auf Spiegelneuronen zuließ: Prämotorische Areale der Versuchsperson wurden zwar beim Beobachten einer Greifbewegung des Untersuchers aktiviert, jedoch nicht, wenn die Person die Bewegung selbst ausführte. „[...] *it may be that the behavioral protocols used in human activation experiments were not sufficiently demanding to induce an activation*” (Rizzolatti u. a., 1996:250).

Ob dieser Einschränkungen konzentrierten sich die weiteren Studien auf die Aktivität bei bloßer Handlungsbeobachtung. Die „Spiegeleigenschaft“ ist schließlich nicht der einzig interessante Aspekt an F5-Neuronen. Dass sie nur auf zielgerichtete Handlungen reagieren, ist von ebenso großer Bedeutung und lässt sich auch ohne Handlungsausführung untersuchen.

So stellten Decety u. a. (1997) und Grèzes u. a. (1998), zwei designgleiche PET-Studien, ebenfalls fest, dass das BA 45 der linken Hemisphäre aktiviert wurde, wenn die Probanden bedeutungsvolle, zielgerichtete Handbewegungen per Video präsentiert bekamen. Bedeutungslose Bewegungen, die der Amerikanischen Gebärdensprache (den Versuchspersonen nicht bekannt) entnommen waren, riefen hingegen keine Aktivität in diesem Areal hervor. Grèzes u. a. (1998) fanden auch Neuronenaktivität im parietalen BA 40, welches anatomisch homolog zu PFG beim Makaken sein dürfte, und zwar bei beiden Arten von Handlungen und in beiden

Gehirnhälften.

Doch um den eigentlichen Spiegelneuronen auf die Spur zu kommen, war es unerlässlich, Lösungen für das Bewegungsproblem zu finden. Bei Grèzes u. a. (2003) führten die Versuchspersonen Greifhandlungen auf einem „Manipulandum“ durch. Dieses hatte die Form eines Zylinders, der am besten mit der ganzen Hand zu ergreifen war, während auf den kleinen Würfel, der am oberen Ende des Zylinders angebracht war, idealerweise ein Präzisionsgriff mit Finger und Daumen auszuführen war. Mit diesem Manipulandum in der Hand bekamen die Probanden drei Typen von Videos mit folgenden Inhalten zu sehen:

- großes oder kleines Objekt
- pantomimische Greifbewegung auf ein großes oder kleines Objekt
- tatsächliche Greifbewegung auf ein großes oder kleines Objekt

Die Videos wurden unter zwei Bedingungen gezeigt. Einmal sollte der Inhalt nur betrachtet werden, ein anderes Mal sollte auf das Manipulandum eine Greifbewegung durchgeführt werden, die für das gezeigte Objekt erforderlich wäre, bzw. die die gezeigte Handlung imitiert.

„The aim of the present experiment was to functionally identify mirror and canonical circuits in humans and to tentatively localize the human homologue of F5. The human brain regions homologous to the monkey canonical and mirror circuits should be active for viewing an object alone (canonical neurones) and for viewing hands grasping objects (mirror neurones), as well as for executing the appropriate grasp (canonical and mirror neurones).” (Grèzes u. a., 2003:929)

Obwohl der Einsatz des Manipulandums die Bewegungen ihrem natürlichen Kontext entreißen musste, erzielten die Autoren der Studie Ergebnisse, die für die Existenz der gesuchten Nervenzellen sprechen. Kanonische Neuronen dürften sich demnach einerseits dort befinden, wo sich das BA 6 und das BA 44 treffen, und andererseits im vorderen Teil (AIP) der intraparietalen Furche (IPS). Dies deckt sich mit den Befunden aus Untersuchungen am Makaken. „*Thus, the anterior part of the IPS [intraparietal sulcus, Anm.] may be the human homologue of monkey area AIP.*” (Grèzes u. a., 2003:933) Andere Teile der besagten Furche reagierten auch bei Handlungsbeobachtung und Handlungsausführung, was Spiegelneuronen in diesem Bereich, so wie auch im vorderen Teil des *gyrus parietalis inferior* (BA 40) indiziert. Außerdem

gab es überlappende Aktivität im BA 45 und – wie bei reiner Objektpräsentation – an der Schnittstelle von BA 6 und 44.

„On the basis of our results, we suggest that, in the human brain, the ventral limb of the precentral sulcus [BA 6/44, Anm.] may form part of the area designated F5 in the macaque monkey. We found activation in this region during both the observation and the execution contexts.”
(Grèzes u. a., 2003:935)

Von den Einzelableitungen am Affengehirn ist bekannt, dass von Neuronen, die auf Beobachtung oder Ausführung einer Handlung reagieren, nur ein kleiner Teil (ca. 20%) „sowohl als auch“ feuert und als Spiegelneuronen bezeichnet werden darf (siehe Kapitel 1.2). FMRT liefert zwar hochauflösende Abbildungen der Aktivität, ist jedoch mit ca. 2 mm Größe eines Voxels für einzelne Nervenzellen noch zu grob. Das Problem der Studien mit bildgebenden Verfahren, die die Aktivität bei Handlungsbeobachtung und bei Handlungsausführung separat messen und danach Überlappungen feststellen, ist, dass diese Überlappungen nicht unbedingt von Spiegelneuronen stammen müssen, sondern ebenso aus nahe beieinander liegenden Nervenzellen resultieren können, von denen manche nur bei Ausführung, manche nur bei Beobachtung feuern. An den Abbildungen lässt sich dies unmöglich unterscheiden.

Aus diesem Grund hat sich Mitte des letzten Jahrzehnts ein neues Gestaltungsparadigma für bildgebende Experimente in der Spiegelneuronenforschung durchgesetzt, das sich den Effekt zunutze macht, dass die wiederholte Reizung durch denselben Eingangsimpuls die Erregbarkeit einer Nervenzelle senkt. Lapidar gesprochen gewöhnen sich Neuronen an einen Reiz. Die Aktivität von Spiegelneuronen müsste demzufolge abnehmen, wenn sie wiederholt durch Handlungsausführung **oder** durch Handlungsbeobachtung gereizt werden (unter der Annahme, dass sie ihren Eingangsimpuls **nicht direkt** von motorischen oder sensorischen Arealen erhalten, sonst wäre der Reiz ja jeweils ein anderer). Kortikale Bereiche, in denen eine solche transmodale Aktivitätsabnahme auftritt, müssten somit Spiegelneuronen enthalten.

Kilner u. a. (2009) weisen genau diesen Effekt nach. Sie verwenden eine MRT-taugliche Vorrichtung, an der ein Knauf und ein Ring angebracht sind, die jeweils eine eigene Art der Handbewegung erfordern, um ergriffen zu werden (siehe Abb. 1.4.3). Über eine Projektion sehen die Probanden einerseits Videos des Manipulandums, an dem diese Handlungen ausgeführt werden, und andererseits einen Pfeil, der die anzugreifende Komponente des Manipulandums anzeigt, wenn es an ihnen

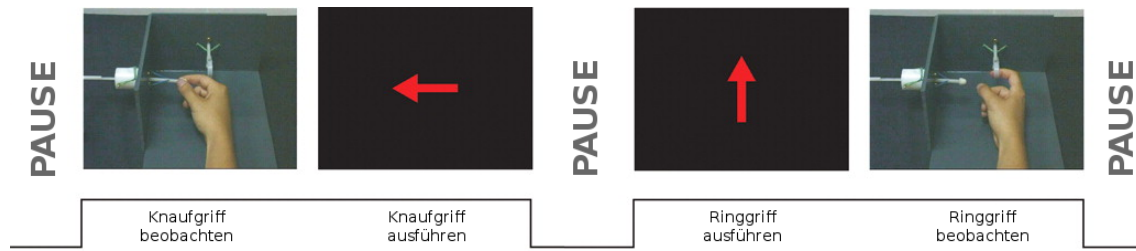


Abbildung 1.6: Beispielhafte Sequenz von Handlungsbeobachtung und -ausführung (Bild nach Kilner u. a., 2009:10154).

ist, eine Bewegung zu tätigen. Die Autoren beschränken sich in ihrer Untersuchung auf den *gyrus frontalis inferior*, wo sich die BA 44 und 45 befinden.

Von Interesse ist nun zu untersuchen, wie sich die Aktivität bei den acht möglichen Kombinationen von zwei aufeinanderfolgenden Präsentationen verhält. Die unabhängigen Hauptvariablen sind:

- Modalität der ersten Präsentation: Ausführung vs. Beobachtung
- Modalität der zweiten Präsentation: gleich vs. verschieden zur ersten
- Griff (Knauf oder Ring)² bei beiden gleich vs. verschieden

Die Autoren stellen fest, dass die Aktivität von potentiellen Spiegelneuronen bei gleicher Griffart aber unterschiedlicher Modalität der beiden Präsentationen abnimmt und bestätigen damit ihre Hypothese:

„Areas of the cortex that contain mirror neurons should show adaptation both when an action is executed and subsequently observed and when an action is observed and subsequently executed.” (Kilner u. a., 2009:10153)

Sie fanden auch heraus, dass sich der Ort der Aktivitätsabnahme jeweils darin unterschied, ob es sich um zwei aufeinanderfolgende Ausführungen, um zwei aufeinanderfolgende Beobachtungen oder um unterschiedliche Modalitäten (Ausführung vor Beobachtung oder Beobachtung vor Ausführung) handelte. Damit ist ein Indiz geliefert, dass in der jeweiligen Konstellation unterschiedliche Neuronen feuern und insbesondere in der dritten die gesuchten Spiegelneuronen.

Chong u. a. (2008) führten ein ähnliches Experiment im unteren Parietallappen durch, allerdings verwendeten sie pantomimische Gesten, die nur ein gedachtes

²Welche Neuronen beim Griff nach dem Knauf oder dem Ring feuern, ist hier nicht relevant. Wichtig ist nur, dass sich die aktivierten Areale der beiden Greifarten möglichst wenig überlappen.

Objekt zum Ziel haben. Ihre Ergebnisse zeigten aber ebenfalls eine transmodale Aktivitätsabnahme im BA 40.

Mit diesen Untersuchungen ist schlussendlich gezeigt worden, dass es mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit Spiegelneuronen in Teilen der BA 44, 45, 6 und 40 gibt. Für andere Orte im menschlichen Gehirn ist die Existenz von Spiegelneuronen erst kürzlich eindeutig nachgewiesen worden. Mukamel u. a. (2010) maßen mittels Elektroden zur Einzelzelleableitung, die zu klinischen Zwecken im Cortex von Epilepsiepatienten eingeführt worden waren, die Aktivität von 1177 Nervenzellen des mittleren Frontallappens, der Amygdala, der Hippocampi und einiger anderer Bereiche und führten nebenbei ein klassisches Spiegelneuronenexperiment mit Aufgaben zur Bewegung und Bewegungsbeobachtung durch. Tatsächlich fanden sie eine signifikante Menge an Spiegelneuronen verteilt in allen gemessenen Bereichen (die bis dahin in der Spiegelneuronenforschung eigentlich keine große Rolle gespielt haben). „[...] *these findings suggest the existence of multiple systems in the human brain endowed with neural mirroring mechanisms [...]*.” (Mukamel u. a., 2010:755). Sie konnten auf diese Weise auch feststellen, dass manche dieser Neuronen bei Handlungsbeobachtung inhibitorische Wirkung aufweisen und daher das neuronale Substrat für die Fähigkeit bilden könnten, zwischen eigener und fremder Handlung unterscheiden zu können.

1.5 Sinn und Zweck der Spiegelneuronen

Motorische Theorien, die geistige Phänomene auf (innere) motorische Akte (hier: neurologische „Mechanismen“ des motorischen Cortex) zu reduzieren suchen, haben in der Geisteswissenschaft lange Tradition, wie Hickok (2009) aufzeigt. Durch die Entdeckung der Spiegelneuronen gewannen diese ein neues neuronales Fundament.

Prominent ist die Hypothese des Handlungsverstehens: Dadurch dass diese Nervenzellen die Handlung eines anderen direkt auf die eigenen neuronalen Repräsentationen abbilden („direct matching hypothesis“) könne durch sie der Beobachter die fremde Handlung „verstehen“, führen Rizzolatti u. a. (2001) aus: „*According to this view, an action is understood when its observation causes the motor system of the observer to ‘resonate’.*” (Rizzolatti u. a., 2001:661). Sie führen auch die Studie von Umiltà u. a. (2001) als Indiz für diese Hypothese an, laut der Spiegelneuronen auch aktiv waren, wenn das Objekt während des Greifvorgangs nicht mehr sichtbar ist (siehe Kapitel 1.2.3): „[...] *despite the fact that the monkey did not see the action, it knew its meaning; its neurons signalled ‘the experimenter is grasping’ or ‘the*

experimenter is holding’.” (Rizzolatti u. a., 2001:667).

Carr u. a. (2003) untersuchten auch die Aktivität beim menschlichen Gehirn, wenn emotionale Gesichtsausdrücke wahrgenommen werden, und vermuten daher außerdem, dass diese Neuronen auch am empathischen Verstehen und Einfühlungsvermögen Anteil haben: *„we understand the feelings of others via a mechanism of action representation shaping emotional content”* (Carr u. a., 2003:5502).

Aber nicht nur für das Nachvollziehen von Handlungen und Gefühlen sondern auch von Absichten könnten Spiegelneuronen die Grundlage bilden, da sie insbesondere auf das Ziel einer Handlung reagieren. Spiegelneuronen könnten sogar am Angelpunkt von Selbst- und Fremdbewusstsein, der Intersubjektivität, stehen:

„From the very beginning our bodily self-awareness is built upon the motor potentialities that enable to interact with other bodies and to tune our motor goals and intentions with respect to the motor goals and intentions of others and vice versa.” (Gallese und Sinigaglia, 2010:754)

Hickok (2009) kritisiert den reduktionistischen Ansatz der motorischen Theorien, die seiner Ansicht nach nicht alle geistigen Phänomene erklären können. ZB. könne an einer Handlung viel mehr als der bloße Akt verstanden werden: *„For example, the motor act of pouring liquid from a bottle into a glass could be understood as pouring, filling, emptying, tipping, rotating, inverting, spilling [...] and so on.”* (Hickok, 2009:1240).

Der primäre Sinn und Zweck der Spiegelneuronen liegt für ihn in „sensory-motor pairings”, in einer „pure Pavlovian association”: im Verbinden von sensorischen und motorischen Reizen. Die Entdeckung von Spiegelneuronen in einigen anderen Gehirnregionen als den prominenten, prämotorischen Arealen im inferioren Frontal- und Parietallappen, zB. durch Mukamel u. a. (2010) unterstützt seine Hypothese, *„that ‘mirror’ responses are nothing more than the facilitation of the motor system via learned associations.”* (Hickok, 2009:1233). Die Assoziation, die ein Spiegelneuron zwischen einer selbst durchgeführten und einer beobachteten Handlung herstellt, bestehe einfach in deren Ausrichtung auf ein Ziel. Gibt es in beiden Modalitäten dasselbe oder ein ähnliches Zielobjekt, ist das Neuron auch in beiden Fällen aktiv. Die Kopplung mit motorischen Arealen sei daher keine den Spiegelneuronen inhärente Eigenschaft sondern nur beiläufiges Nebenprodukt, in das man daher nicht die Herstellungsprozesse von Verständnis, Empathie und Ich-Bewusstsein verankern könne.

Gewiss sind sie zwar auf irgendeiner Art und Weise an diesen Prozessen beteiligt und mögen eine notwendige Bedingung darstellen: *„motor knowledge can influence*

or augment action ‘understanding’ to some degree” (Hickok, 2009:1240). Eine hinreichende Erklärung dafür liefern sie aufgrund des bisherigen Erkenntnisstands aber nicht.

Ähnlich sieht Zaboura (2009) den Sinn und Zweck der Spiegelneuronen primär in der Bildung einer basalen Resonanz, auf der höhere geistige Prozesse aufbauen. Die Handlungen anderer werden nicht einfach kopiert, sondern mit dem eigenen motorischen Repertoire in Verbindung gebracht. *„Es geht also nicht um eine reine Duplikation oder Reproduktion, sondern um Repräsentation.“* (Zaboura, 2009:91).

In Hinsicht dessen sollten die Geistes- und Naturwissenschaften daher nicht gegenseitig die Domäne der jeweils anderen beanspruchen, sondern vielmehr ihre unterschiedlichen Vorstellungen von zentralen, nicht trivialen Begriffen wie „Verstehen“, „Bewusstsein“ und „Bedeutung“ im Lichte der Spiegelneuronen neu schärfen. Denn:

„Die physiologisch argumentierenden Vertreter der Spiegelneuronendebatte verfolgen [...] einen Bottom-up-Mechanismus, wohingegen Vertreter primär geistiger Theorien top-down arbeiten. Es bleibt zu hoffen, dass beide sich in der Mitte treffen [...]“ (Zaboura, 2009:137)

Wie die Beteiligung der Spiegelneuronen an bestimmten höheren, kognitiven Vorgängen aussieht, widmet sich die weitere Arbeit. Da die BA 45, 44 (Broca-Areal) und 40 (*Gyrus supramarginalis*) wichtige Zentren der Sprachverarbeitung sind, gilt es nun auszuloten, welche Bedeutung die dortigen Spiegelneuronen für die menschliche Sprach- und Sprechfähigkeit haben.

Kapitel 2

Spiegelneuronen und Sprache

Dieser Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, ob und welchen Beitrag Spiegelneuronen für die Sprachverarbeitung leisten. Da sie mit großer Wahrscheinlichkeit beim Menschen in für das Sprachvermögen zentralen Arealen existieren, liegt ein spannender Zusammenhang nahe, der das Bild der neuronalen Sprachverarbeitung in ein neues Licht rücken könnte.

Zunächst sollen aber Funktionen und Eigenschaften der beiden kortikalen Sprachregionen, des Broca-Areals und des Gyrus supramarginalis, in allgemeinen und sprachlichen Aspekten beschrieben sowie ihre Gemeinsamkeiten herausgestellt werden. Danach folgt in Form einer Zusammenschau der aktuellen Forschung die Behandlung des eigentlich Themas, nämlich was Spiegelneuronen dieser beiden Areale für die Sprachverarbeitung leisten. Der letzte Teil des Kapitels betrachtet generelle Zusammenhänge von Sprache, Gestik und Mimik und stellt am Schluss die beschriebenen Erkenntnisse in einen weiteren theoretischen Rahmen.

2.1 Sprachareale mit Spiegelneuronen

Hier wird nun ein Überblick über aktuelle Einsichten in das Broca-Areal und den Gyrus supramarginalis gegeben. Hierbei werden sie nicht auf ihre sprachliche Relevanz beschränkt, sondern es wird versucht, sie im weiteren Kontext der menschlichen Wahrnehmung und außenweltlichen Interaktion zu sehen.

2.1.1 Broca-Areal

Das Broca-Areal erstreckt sich über die BA 44 und 45 (siehe Abb. 1.5, S. 14), und wurde erstmals von dessen Namensgeber Paul Broca 1861 mit der Sprachfähigkeit des Menschen in Verbindung gebracht. Nach dem Tod eines Patienten, der nur

noch eine einzige Silbe artikulieren hatte können, stellte Broca an dessen linker Gehirnhälfte in jenem Areal eine Läsion fest und formulierte daraufhin die Hypothese, dass einzelnen Gehirnregionen einzelne Funktionen zugeordnet werden können. Aufgrund seiner Entdeckung nahm er an, dass speziell Sprache in der linken Hemisphäre, genauer in der *pars triangularis* und der *pars opercularis*, verarbeitet wird (Ahlsén, 2006).

Die genaue Funktion dieses Areals wird bis heute diskutiert. Um sie untersuchen zu können, war man lange Zeit auf die Symptome von Patienten mit Sprachstörungen und die damit verbundenen Läsionen angewiesen, die man erst post mortem untersuchen konnte. Das Krankheitsbild der Broca-Aphasie umfasst eine große Bandbreite von Symptomen und kann in verschiedenen Stärkegraden ausgeprägt sein. Ob der Ungenauigkeit der frühen Untersuchungsmethoden blieb aber die genaue Korrelation zu zerstörten Gehirnbereichen im Unklaren. Erst mit der Entwicklung bildgebender Verfahren wurde es in den letzten 30 Jahren möglich, hier zu mehr Einsicht zu gelangen. Mit diesen Methoden durchleuchteten unter anderen Dronkers u. a. (2007) erneut das konservierte Gehirn jenes Patienten von Paul Broca und erkannten, dass die Schädigungen in Wahrheit weit über die BA 44 und 45 hinausgingen. Was heute als Broca-Aphasie diagnostiziert wird, dem liegt folglich nicht ausschließlich eine Läsion des Broca-Areals zugrunde. Daher interessiert hier nun nicht, welche Funktionen bei einer Broca-Aphasie, sondern welche bei einer Broca-Läsion gestört sind.

Hillis u. a. (2004) und Davis u. a. (2008) nahmen sich dieser Frage an und untersuchten die Sprachfähigkeit und Sprechleistung von Menschen mit einer Verletzung des Broca-Areals jeweils vor und nach ihre Genesung.

Hillis u. a. (2004) weisen an einem Korpus von Läsionsdaten und Symptomen von 80 Personen nach, dass eine Schädigung des Broca-Areals Sprechapraxie zur Folge hat. Diese Störung ist keine Aphasie im eigentlichen Sinne, da sie nicht die Sprachfähigkeit an sich beeinträchtigt, sondern nur die Motorik der Sprachproduktion. Sprechapraktiker haben Probleme, die Bewegungen der Sprechorgane zu koordinieren.

Davis u. a. (2008) untersuchten den Zusammenhang zwischen Broca-Läsion und sprachlichen Defiziten auch auf syntaktischer und semantischer Ebene und betrachteten neben der Sprachproduktion auch das Sprachverständnis. Ihre Hypothese: „*language functions, such as understanding and producing syntactically or semantically complex sentences are dependent on Broca's area*“ (Davis u. a., 2008:52).

Die BA 44 und 45 ihres Patienten waren aufgrund eines Gerinsels nur schlecht durchblutet und die dortigen Nervenzellen noch nicht zerstört. Wird die Durchblutung in so einem Fall innerhalb weniger Stunden wiederhergestellt, können die beein-

trächtigten Areale ihre Funktion wieder aufnehmen und die aufgetretenen Symptome eindeutig der unterdurchbluteten Region zugeschrieben werden. Für den Fall von Davis u. a. (2008) ist daher auszuschließen, dass die Wiederherstellung der Sprachfunktionen durch eine Reorganisation des Gehirns erfolgte.

Die Person wurde also auf ihre multimodalen Defizite in Syntax und Semantik getestet. Dazu zählte zB. das Beantworten von unterschiedlich komplexen Entscheidungsfragen. Vor der Behandlung wurden solche mit eindeutigem Satzbau und klarer semantischer Rollenverteilung (zB. „Do dogs fly?“) stets richtig beantwortet, während bei komplexeren Fragen, deren Bedeutung vor allem durch die Syntax der Konstituenten und durch ihre Funktionswörter ausgedrückt wurde (zB. „Is a dog larger than an elephant?“), grobe Probleme auftraten. Beeinträchtigt waren außerdem die Schriftsprache („*He was unable to form letters for written spelling to dictation*“ (Davis u. a., 2008:55)) und die Fähigkeit, komplexe Sätze zu bilden, um zB. die in einem Bild dargestellten Geschehnisse zu beschreiben. Die Aphasie äußerte sich also in Agrammatismus, der außerdem die Ursache für die Störung der Spontansprache und der Flüssigkeit der Sprachproduktion sein dürfte. All diese Störungen verschwanden nach der Behandlung, dh. nach der Lösung des Gerinsels, augenblicklich.

„These results provided evidence that deficits in these language functions can be due to hypoperfusion of Broca’s area in at least some patients and that reperfusion can restore these functions in the same individuals. These functions might have relied on Broca’s area or on areas functionally connected to Broca’s area that were compromised when Broca’s area was dysfunctional.” (Davis u. a., 2008:56)

Wie kann man die betroffenen Funktionen zusammenfassen? Davis u. a. (2008) vermuten, „*that Broca’s area was essential for maintenance of the serial order of phonemes, graphemes, and other linguistic and motor elements*“ (Davis u. a., 2008:56). Die von Hagoort (2005) geäußerte Hypothese der „Unification“ bietet dafür einen passenden theoretischen Rahmen. Unification bezeichnet einen vereinigenden, integrierenden Vorgang, der auf mehreren sprachlichen Ebenen stattfindet und das Broca-Areal als sein neuronales funktionales Korrelat betrachtet.

Gestörte Unification zB. auf syntaktischer Ebene äußert sich in Agrammatismus, wie er bereits beschrieben wurde. Sie wird in den BA 44 und 45 geleistet. Semantische Unification ist laut Hagoort (2005) notwendig, um aus einer Menge möglicher Bedeutungen, die zB. ein Wort haben kann, eine bestimmte auswählen zu können, was sich bei Broca-Patienten in semantischen Paraphasien (Versprechern auf Bedeutungsebene, zB. „Mosquito“ statt „Biene“) äußert. Semantik wird in den

BA 47 und 45 verarbeitet. Die Sprechapraxie, die häufig im Zusammenhang mit einer Broca-Läsion auftritt, lässt sich auf Defizite in der phonologischen Unification zurückführen, die nach der Analyse von Hagoort (2005) im BA 44 und dem inferioren Teil des BA 6 stattfindet. Hier ist die Fähigkeit gestört, die Bewegungsprogramme verschiedener Laute in einen flüssigen Ablauf zusammenzufassen und zu vereinen.

Die Hypothese geht von einem lexikalischen Ansatz an die neuronale Verarbeitung von Syntax heran. Grammatische Regeln sind nicht eigens gespeichert, sondern die Lexeme selbst enthalten die Information über ihre grammatikalischen Eigenschaften (zB. Wortklasse). Einzig der Prozess der Unification fügt die Wörter in ein Ganzes zusammen. Snijders u. a. (2009) aus der Gruppe um Hagoort testeten diese Hypothese mittels FMRT, indem sie diese beiden wesentlichen Schritte der Sprachverarbeitung – Abrufen des Lexems mit seinen syntaktischen Eigenschaften und Unification – auf neuronaler Ebene zu unterscheiden versuchten. Dazu verwendeten sie

- einerseits Sätze, die ein Wort enthielten, das sowohl als Nomen als auch als Verb verstanden werden konnte, solange nur der Anfang des Satzes bekannt war (Ambiguität), und Sätze, die kein ambiges Wort enthielten (Kontrollstimuli): ZB. ndrl. „vluchten“ in „Beide vluchten ...“ ist ein Nomen, wenn der Satz auf „... werden geannuleerd“ („Beide Flüge werden gestrichen“), aber ein Verb, wenn er auf „... het behekste“ („Beide fliehen vor der Hexe“) endet.
- andererseits syntaktisch unzusammenhängende und zufällig angeordnete Wortreihen, die ein ambiges oder kein ambiges Wort beinhalteten.

Bei der Auswahl der ambigen Wörter wurde darauf geachtet, dass beide Alternativen dieselbe Frequenz hatten, d.h. gleich wahrscheinlich im Alltag anzutreffen waren. Ambiguität (erste Variable) sollte nun dazu führen, dass Bereiche des Gehirns, die für den Zugriff auf das mentale Lexikon verantwortlich sind, stärker aktiviert sind, da hier zwei Lexeme abgerufen werden müssen. Syntaktischer Zusammenhang (zweite Variable) sollte Bereiche aktivieren, die die Unification bewerkstelligen. Dadurch sollte gezeigt werden, dass Unification ein vom Abruf grammatikalischer Kategorien unterschiedlicher Prozess ist und nicht vordergründig mit Grammatik zu tun hat. Der Abruf hingegen soll im Lexikon stattfinden.

In weiterer Folge sollte sich auch herausstellen, dass der Aufwand an Unification bei Sätzen zusätzlich steigt, wenn Ambiguität vorhanden ist, da die Auswahl aus den beiden Alternativen die Zusammenführung der Wörter zu einem ganzen Satz erschwert.

Die Ergebnisse von Snijders u. a. (2009) bestätigen die Hypothese. Ambiguität, sei es im Satz, sei es in der Wortfolge, ruft primär eine Aktivierung im posterioren Teil des mittleren Gyrus im linken Temporallappen hervor, inferior zum Wernicke-Areal gelegen. Nur wenn die Wörter syntaktisch zusammenhängen und einen Satz bilden, wird zusätzlich das Broca-Areal aktiviert. Diese Aktivität fällt noch höher aus, wenn der Satz ein ambiges Wort enthält, da hier aus zwei möglichen Formen integriert werden muss.

Dieser Mehraufwand dürfte auf die Ambiguität per se zurückzuführen sein und weniger darauf, dass sie die Grammatik betraf, denn das Broca-Areal wirkt auf mehreren Ebenen der Sprachverarbeitungen mit. Dies konnten Sahin u. a. (2009) mittels Tiefenelektrodenableitungen an drei Epilepsiepatienten zeigen. Deren Pathologie erforderte die direkte Messung der Neuronenaktivität gerade in den BA 44 und 45. Nebenher unterzogen sie sich folgendem linguistischen Experiment:

Die Aufgabe war, ein gegebenes Wort entweder nur still zu lesen oder es innerlich zu flektieren, sodass es in die Lücke eines zuvor präsentierten Satzes passte, in welchem das Objektnomen oder das Prädikat fehlte. ZB. sahen sie den Satz „*Yesterday they _____*“, anschließend das Verb „*to go*“ und mussten in Gedanken „*went*“ formen. Die Items wurden danach unterschieden, ob ihre abgewandelte Form phonologisch gleich (zB. engl. Infinitiv vs. Präsens) oder verschieden (Infinitiv vs. Präteritum) zu ihrer Grundform war. Die Aktivität der Neuronen wurde also unter folgenden Bedingungen gemessen:

- stilles Lesen des Zielworts ohne Flektieren
- kovertes Flektieren des Zielworts (keine Änderung der phonologischen Form)
- overtes Flektieren des Zielworts (Änderung der phonologischen Form)

Tatsächlich konnten Sahin u. a. (2009) drei Zeitkomponenten ausmachen, in denen bei allen drei Patienten Neuronenaktivität gemessen wurden: Ca. 200 ms, 320 ms und 400 ms nach Präsentation des Reizwortes traten lokale Potentiale im Broca-Areal auf, die noch dazu mit den drei Kategorien von Testitems korrelierten.

Die Aktivität um 200 ms wird von den Autoren mit dem Zugriff auf das Lexikon in Verbindung gebracht, da Wörter mit niedriger Frequenz hier stärkere elektrophysiologische Potentiale bewirkten als Wörter, die häufiger in der Alltagssprache gebraucht wurden. Außerdem hatte die phonologische Komplexität der Wörter auf die Aktivität keinen Einfluss, was ebenfalls dafür spricht, dass hier ein kognitiver

Prozess (lexikalischer Abruf) stattfindet. Da ein solcher Prozess für alle drei Gruppen von Testitems erforderlich ist, trat das Neuronenfeuer zu dieser Zeitkomponente auch in allen drei Gruppen auf.

Die Flektion des Reizwortes sehen Sahin u. a. (2009) in der Aktivität um 320 ms nach Reizdarbietung repräsentiert, da sie zu diesem Zeitpunkt unter der zweiten und dritten Testbedingung (kovert und overt Flektion) deutlich stärker als unter der ersten, dem stillen Lesen, auftrat. Innerhalb der beiden Flektionsaufgaben ergaben sich jedoch keine signifikanten Aktivitätsunterschiede, sodass sich hier der Prozess des Flektierens an sich abbilden dürfte. Dafür spricht auch, dass die gemessenen Potentiale sich nicht unterschieden, wenn das abzuwandelnde Zielwort ein Verb oder ein Nomen war. *„These parallels suggest that words from different lexical classes feed a common process for inflection.”* (Sahin u. a., 2009:448).

Zuletzt stellen die Autoren für die Zeitkomponente 400 die Korrelation mit der overten Flektion, bei der sich die phonologische Form ändert, fest und bringen daher die hier auftretende Aktivität mit phonologischen Verarbeitungsprozessen in Verbindung. Sie unterschied sich nämlich signifikant von den neuronalen Reaktionen, die unter den anderen beiden Testbedingungen zu diesem Zeitpunkt gemessen wurden, und stand in direktem Verhältnis zur Länge und phonologischen Komplexität der flektierten Form des Zielworts.

Diese Ergebnisse legen einen Sprachverarbeitungsprozess offen, der in drei räumlich und zeitlich definierbaren Schritten erfolgt und bestätigen damit einerseits, dass das Broca-Areal auf mehreren Ebenen der Sprachverarbeitung mitspielt. Hagoort und Levelt (2009) schließen daraus folgendes:

„The results of Sahin et al. indicate that the role of Broca’s area is not so limited, but should be characterized in more general terms. It is likely involved in unification operations at the word and sentence level [...]” (Hagoort und Levelt, 2009:373)

2.1.2 Gyrus Supramarginalis

Posterior zum Gyrus Supramarginalis (BA 40), welcher an den Occipitallappen grenzt (siehe Abb. 1.5, S. 14). Die beiden zusammen werden in der Neurolinguistik als „Schreib-Lese-Zentrum“ bezeichnet (Grötzbach, 2006:16), da Verletzungen in ihrem Bereich Formen von Alexie und/oder Agraphie (Lese-/Schreibstörung) zur Folge haben.

Der Gyrus Supramarginalis (GSM) liegt auch gesamtanatomisch gesehen an einer zentralen Schnittstelle, denn an seiner Stelle treffen Parietal-, Temporal- und

Occipitallappen zusammen, was ihm eine wichtige Rolle im Integrieren und Zusammenführen verschiedener Wahrnehmungskanäle verleiht: „*The SMG [GSM, Anm.] is a cortical association area in which visual, somatosensory and auditory information, as well as vestibular perceptions of a higher order, overlap.*” (Fukutake und Hattori, 2000:247). Beim Affen hat das dazu homologe Areal die Funktion, visuelle und motorische Information abzustimmen und zB. die Hand für den Griff nach einem Gegenstand entsprechend seiner Größe zu formen und zum Objekt hinzuführen (siehe 1.3). Dazu gehört auch, den eigenen Körper oder Körperteile mit der Außenwelt, die über verschiedene Sinnesreize abgebildet wird, zu koordinieren, oder technisch gesehen „Weltkoordinaten“ in Koordinaten der eigenen Perspektive zu transformieren. Läsionen in diesem Bereich können neben Bewegungsstörungen (Apraxie) auch zu „*disorientation of the body or objects in space, e.g. feeling upside down*” (Fukutake und Hattori, 2000:247) führen.

So berichten Fukutake und Hattori (2000) von einer Patientin, bei der durch ein Blutgerinsel genau dieser Gyrus in der rechten Hemisphäre verletzt war. In der Folge konnte die Frau keine bewegten oder gestreiften Objekte betrachten, zB. keine Verkehrsmittel benutzen, ohne dass ihr dabei schlecht wurde. Ihr fehlte die Koordination ihrer selbst gegenüber einer bewegten Außenwelt.

Nach linguistischen Gesichtspunkten wurde der GSM unter anderen von Scarone u. a. (2009) untersucht. Mehrere Patienten, denen im Parietallappen aufgrund eines Tumors Teile des Cortex entfernt werden mussten, wurden vor und nach ihrer Operation auf ihre Schreibfähigkeit getestet. Jene Patienten, bei denen der Eingriff nur am GSM erfolgte, litten nach der Operation an einer Form von Agraphie, die sich insbesondere beim Schreiben nach Diktat äußerte. Das heißt, sie waren nur beschränkt fähig, etwas Gehörtes in Schrift umzuwandeln (Phonem-Graphem-Konversion), perseverierten dabei einzelne Wörter (d.h. sie setzten wiederholt zum selben Wort an ehe sie zum nächsten weitergingen) und produzierten graphematische Paraphasien.

„Patients with this disturbance are impaired in carrying out the sequence of movements necessary for writing, which normally leads to a total loss of the capacity to form a recognizable written language.” (Scarone u. a., 2009:235)

Das Abschreiben hingegen meisterten sie fehlerfrei, was eben darauf hindeutet, dass die Störung nicht in der Bewegungssteuerung per se liegt, sondern darin, die richtigen Schreibbewegungsabläufe für eine bestimmte phonologische Form *abzurufen* oder zu planen, dh. in einem Schritt, der beim Abschreiben wohl nicht erforder-

lich sein dürfte. Auch das mündliche Buchstabieren war nicht beeinträchtigt, was eine tiefer liegende Störung des Lexikons ausschließt.

„On the basis of these results [...], we propose that the dominant SMG [= GSM, Anm.] could be implied in the access to phonological information and/or the motor patterns related to this information, necessary in writing tasks that imply the use of the phonological store.”
(Scarone u. a., 2009:237)

Mit „phonological store” nehmen Scarone u. a. (2009) einen Arbeitsspeicher („working memory”) an, der phonologische Formen für die Verarbeitung bereithält. Unter dem Aspekt, dass der GSM den Zugriff auf einen solchen Puffer regelt, sind die obigen Symptome bei einer Störung dieses Zugriffs nachvollziehbar, insbesondere die Perseverationen.

Oft sind bei einer Läsion des GSM aber nicht nur Bewegungen des Schreibens, sondern auch andere Handlungen mit Händen und Armen gestört. Dies bezeichnet man als ideomotorische Apraxie (Wheaton und Hallett, 2007). Betroffene Personen können komplexe Bewegungsabläufe nicht koordinieren, zB. pantomimisch das Haarekämmen darstellen. Sie bringen dabei den Ablauf der Bewegungen zeitlich oder räumlich durcheinander oder verwenden die eigene Hand als Gegenstand (zB. fahren sich mit den Fingern durch die Haare anstatt einen imaginären Kamm zu halten).

Mutha u. a. (2010) führen dies auf eine Störung der Transformation der Koordinaten eines Objekts in der Welt in Koordinaten des eigenen Körpers zurück. Eine solche Umwandlung muss schon vor der Ausführung der Bewegung stattfinden, ist also Teil der Bewegungsplanung und -programmierung. In ihrer Studie untersuchten sie die Bewegungsabläufe von Apraktikern, die nach drei Gegenständen greifen sollten, die in jeweils unterschiedlichem Maße die Ellbogen- und Schultermuskelpartien beanspruchten. Hierbei stellten die Autoren fest, dass nicht einfach die Bewegung des Hingreifens an sich fehlerhaft war, sondern nur ihr Anfang, dh. die Probanden planten die Bewegung falsch und starteten daher in die falsche Richtung. Sobald aber die Hand „unterwegs” war und sie ihre eigene Bewegung propriozeptiv fühlen bzw. sehen konnten, konnten sie den Körperteil sukzessiv an das Ziel heranzuführen.

Dies könnte der Grund sein, warum Apraktiker manchmal gleich die Hand als den Gegenstand verwenden, der pantomimisch dargestellt werden soll, da sie es sich auf diese Weise ersparen, den Körperteil in die körperrelative Position zu bringen, die die Pantomime, beispielsweise des Haarekämmens, erfordert. Stattdessen schaffen sie sich die Möglichkeit, Ort und Stelle ihrer Hand über den Tastsinn zu fühlen und so ein sicheres Gefühl für die Bewegung zu erlangen.

Dasselbe Defizit könnte auch der oben beschriebenen Agraphie zugrundeliegen. Dort ging das Abschreiben den Patienten leicht von der Hand, weil sie keine Bewegungen planen, sondern nur einem visuellen Reiz, dem vorgelegten Schriftzug, angleichen mussten. Die Phonem-Graphem-Konversion hingegen erfordert die Planung der Schreibbewegungen auf Basis des phonologischen Inputs und ihre gleichzeitige Projektion auf das Papier, sozusagen also eine Transformation der eigenen für die Buchstaben erforderlichen Bewegungskordinaten in „Papierkoordinaten“. Personen mit einer solchen „apractic agraphia“ (Scarone u. a., 2009) bleibt nichts anders übrig, als ihre Schrift während des Schreibens laufend an das gewünschte Bild anzupassen, indem sie die direkten visuellen und propriozeptiven Sinneseindrücke nutzen. Entsprechend langsam und unsicher erfolgen diese Bewegungen.

Insgesamt fügen sich diese Symptome in das oft mit dem GSM in Verbindung gebrachte klinische Krankheitsbild der „phonologischen Agraphie“ ein (nach Grötzbach, 2006:48) mit Beeinträchtigungen in folgenden Funktionen:

- Schreiben von nicht ganzheitlich gespeicherten Wort-Schriftbildern
- Schreiben von Pseudo-Wörtern
- Phonem-Graphem-Konvertierung

Die Agraphie äußert sich also insbesondere bei Wörtern, für die der Bewegungsablauf nicht ganzheitlich repräsentiert ist, sondern zuvor aus einzelnen Phonemen in eine flüssige Folge von Graphemen gebracht werden muss, dh. bei Wörtern, die selten gebraucht werden oder nicht existieren.

2.1.3 Gemeinsamkeiten

Der GSM und das Broca-Areal haben Einiges gemeinsam. Beide spielen eine Rolle, wenn es darum geht, eine komplexe Abfolge von motorischen Bewegungen zu planen. Eine Störung des GSM führt zu einer Agraphie oder gar Apraxie, während eine Läsion des Broca-Areals Sprechapraxie zur Folge hat. Der GSM dürfte ebenfalls einem Prozess dienen, der der „Unification“ nicht unähnlich ist, nämlich einzelne Grapheme in einen einzigen Schreibfluss zu vereinen.

Weiters spricht man beiden Regionen die Funktion zu, den Zugriff auf einen Speicher zu gewährleisten. Beim GSM ist dies der „phonological store“, über den die Phonem-Graphem-Konvertierung ermöglicht wird, beim Broca-Areal ist dies das Lexikon. Auf beide trifft konsequenterweise zu, dass sie bei seltenen Wörtern stärker

beansprucht werden als bei häufigen. In der phonologischen Agraphie als pathologische Folge einer GSM-Läsion ist ja insbesondere das Schreiben seltener und nicht existierender Wörter gestört.

Zuguterletzt kann eine Verletzung des Broca-Areals gar Symptome hervorrufen, die auch bei einer Läsion des GSM auftreten. ZB. berichten Davis u. a. (2008) in ihrer unter 2.1.1 beschriebenen Studie, dass ihr Broca-Patient aus apraktischen Gründen nicht fähig war, „*to form letters for written spelling to dictation*“ (Davis u. a., 2008:55).

2.2 Spiegelneuronen in der Sprachverarbeitung

Die Kodierung von ganzen Handlungsabläufen wird – wie im Kapitel 1.2 dargelegt – von Spiegelneuronen geleistet. Sie feuern nicht bei einzelnen Muskelregungen sondern bei ganzen Sequenzen. Dieses Verhalten passt zu den eben beschriebenen Funktionen des Broca-Areals und des GSM, nämlich der Unification – Vereinigung einzelner Bausteine zu einem Ganzen – und der Phonem-Graphem-Konvertierung mit Bildung eines ganzheitlichen Schreibflusses.

Der folgende Abschnitt geht der Frage nach, wie sich diese neuronalen Prozesse in der Sprachverarbeitung ausdrücken und in welche Rolle Spiegelneuronen hierbei spielen könnten. Der Bogen spannt sich von artikulatorisch-phonologischen über semantische hin zu syntaktischen Aspekten.

2.2.1 Artikulatorische Phonetik und Phonologie

Fadiga u. a. (2002) und Watkins u. a. (2003) widmeten sich dieser Frage mit der Hypothese, dass nicht nur die Beobachtung von Handbewegungen eine latente motorische Reaktion beim Beobachter hervorruft, sondern auch die Beobachtung und Wahrnehmung von Mundbewegungen, also Sprache. Diese Hypothese äußerten diese beiden Studien scheinbar noch bevor Kohler u. a. (2002) die multimodale (also auch rein auditive) Erregbarkeit von Spiegelneuronen des Makaken entdeckten (siehe Kapitel 1.2.3). Hätten sie von den Resultaten von Kohler u. a. (2002) gewusst, hätten sie in der Formulierung ihrer Hypothesen gewiss darauf Bezug genommen, dass Spiegelneuronen multimodal aktiviert werden können und aufgrund dessen eine latente motorische Reaktion auch bei Sprachlauten, die in dieser Hinsicht nichts anderes als Geräusche der Artikulatoren sind, zu erwarten sei.

Ähnlich wie Fadiga u. a. (1995) benutzten Fadiga u. a. (2002) und Watkins u. a. (2003) TMS zur Erregungsverstärkung des motorischen Cortex bei gleichzeitiger

Messung der Aktivität der Zungen- (Fadiga u. a., 2002) und Lippenmuskeln (Watkins u. a., 2003). Fadiga u. a. (1995) hatten ja im Unterschied dazu das EMG an den Fingermuskeln angelegt.

Watkins u. a. (2003) spielten ihren Probanden gesprochene Prosa vor, zum einen nur hörbar und zum anderen nur sichtbar in Form der Lippenbewegungen. Die Personen waren des Lippenlesens nicht mächtig. Als Kontrollstimuli dienten Alltagsgeräusche und Bewegungen von Augen und Augenbrauen. Das Ergebnis war, dass die sprachlichen Stimuli unter TMS die erwartete Muskelaktivität in den Lippenmuskeln hervorrief und zwar gleichermaßen in auditiver als auch visueller Modalität. Von den Kontrollstimuli bewirkten die Alltagsgeräusche dies ebenfalls (wenn auch in geringerem Ausmaß), was sich die Autoren dadurch erklären, dass man manche der Geräusche auch mit dem Mund machen könne. Die Aktivität bei der Präsentation der Augenbewegungen hingegen war signifikant schwächer bzw. kaum vorhanden.

Außerdem konnten Watkins u. a. (2003) feststellen, dass sich diese Effekte nur bei Stimulation der linken Gehirnhälfte zeigten: *„The most obvious explanation for this asymmetry is that due to the known left hemisphere specialisation for language, the perception of speech stimuli selectively modulated the motor cortex of the left hemisphere.”* (Watkins u. a., 2003:993).

Einen ähnlichen Befund liefert die Studie von Fadiga u. a. (2002) für Zungenbewegungen. Im Unterschied zu Watkins u. a. (2003) spielten sie den Versuchspersonen einzelne italienische Wörter und Pseudo-Wörter vor, die sich in ihrer silbischen Struktur glichen und entweder die Bewegung der Zungenspitze erforderten (durch ein alveolar ausgesprochenes, doppeltes „r“) oder nicht (durch ein labio-dentales „f“). Kontrollstimuli waren Töne, die der Intonation der Wörter nachgebildet waren.

Die Untersuchung zeigte zwei wesentliche Zusammenhänge: Erstens konnte eine signifikant höhere Muskelaktivität bei Wörtern mit alveolarem gegenüber jenen mit labio-dentalem Konsonanten festgestellt werden. Zweitens erregten Pseudo-Wörter die Zungenmuskeln insgesamt deutlich schwächer als echte Wörter: *„This effect could be due to a further facilitation of the speech motor centres induced by the presence of meaning.”* (Fadiga u. a., 2002:401).

Diese beiden Studien decken eine eindeutige Korrelation zwischen Sprachperzeption und -produktion auf und beide führen diese auf die Beteiligung von Spiegelneuronen zurück. Dass bei beiden Vorgängen auch dasselbe Gehirnareal aktiv ist, konnten Wilson u. a. (2004) zeigen, die ein ähnliches Experiment der FMRT unterzogen.

Bei dieser Untersuchung waren es Einzelsilben, die die Probanden einerseits zu hören bekamen und andererseits zu produzieren hatten. Wie auf Basis der zuvor be-

schriebenen TMS-Studien vermutet, stellte sich heraus, dass in beiden Modalitäten der motorische Cortex (präzentrale Windung und Zentralfurche) aktiv war. „*Across subjects, $73 \pm 7\%$ of voxels in precentral gyrus and central sulcus regions activated by listening to speech were also activated by speech production.*” (Wilson u. a., 2004:701).

Diese drei Studien belegen zwar, dass Sprachperzeption und -produktion sich hier eine Gehirnregion teilen, verharren aber in einem rein motorischen Aspekt von Sprache. Die eigentlich für die Sprachverarbeitung interessanten Areale, Broca und GSM, wurden hier noch nicht näher untersucht. ZB. konnten Wilson u. a. (2004) keine besondere Aktivität des Broca-Areals nachweisen, was aber nicht verwundert, da ihre Probanden nur mit bedeutungslosen Einzelsilben zu tun hatten, die nicht des Einsatzes eines höheren Sprachverarbeitungsschritts in dieser Gehirnregion bedurften.

Dass das Broca-Areal von rein phonologischen Einflüssen überhaupt nur bedingt abhängt, zeigt eine spätere Studie, bei der Fadiga und Craighero (2006) es mit TMS direkt stimulieren. Dabei konnten sie keine Wirkung der Stimulation auf die phonologische Verarbeitung feststellen. In ihrem Experiment machten sich Fadiga und Craighero (2006) das sog. Priming zunutze. So bezeichnet man das Phänomen, dass ein Stimulus die Verarbeitung eines nachfolgenden Stimulus in irgendeiner Weise beeinflusst, wenn die Stimuli phonologisch oder semantisch ähnlich sind. In dieser Studie spielten Fadiga und Craighero (2006) ihren Versuchspersonen nacheinander im Abstand von 20 ms zwei (Pseudo-)Wörter vor, wobei sie beim zweiten Wort bestimmen mussten, ob es existiert oder nicht (lexikalischer Entscheidungstest). Gemessen wurde, wie sich die Reaktionszeit in Abhängigkeit folgender Variablen verändert:

1. Erstes Wort („priming stimulus“) ist ein Pseudo-Wort oder nicht.
2. Zweites Wort („target stimulus“) ist ein Pseudo-Wort oder nicht.
3. Die Wörter reimen sich oder nicht.
4. Zwischen erstem und zweitem Wort wirkt ein **hemmender** TMS-Impuls auf das Broca-Areal ein oder nicht.

In bezug auf die vierte Variable lässt sich anhand der ersten beiden Variablen feststellen, ob ein lexikalischer, und anhand der dritten Variable, ob ein phonologischer Priming-Effekt hervorgerufen bzw. verhindert wird.

Abbildung 2.1 zeigt, dass das phonologische Priming vom TMS-Impuls durchgehend unbeeinflusst blieb, da sich die Reaktionszeit bei reimenden Paaren mit der

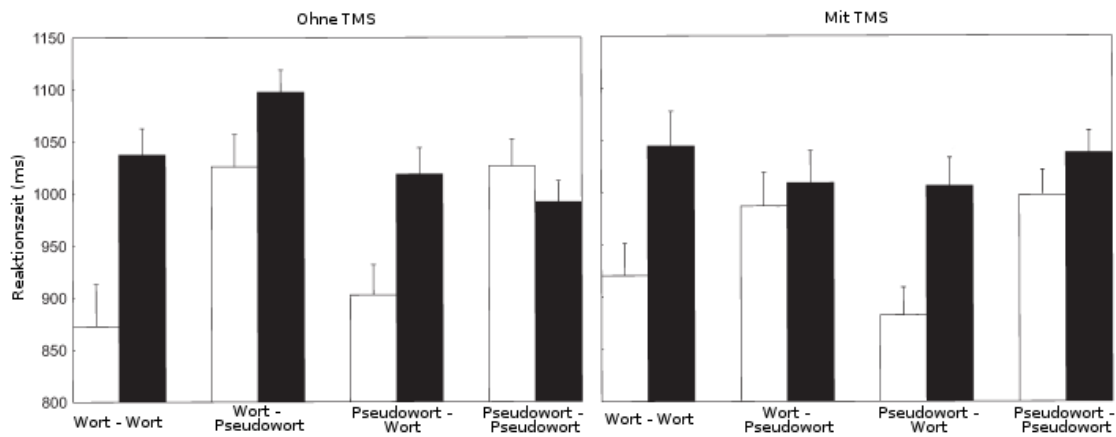


Abbildung 2.1: Diagramm nach Fadiga und Craighero (2006:488). Weiße Balken stellen reimende, schwarze Balken nicht reimende Wortpaare dar.

Stimulation nicht signifikant änderte. Der einzig nennenswerte TMS-spezifische Effekt ist beim Wort-Pseudowort-Paar sichtbar: Die lexikalische Entscheidungsdauer bei einem Pseudo-Wort ist länger, wenn ihm ein existierendes Wort vorangeht. Wird dieses Priming nämlich durch TMS gestört, fällt die Entscheidung wesentlich schneller.

„This finding suggests that the stimulation of the Broca’s region might have affected the priming effect not because it interferes with phonological processing but because it interferes with lexical categorization of the prime.” (Fadiga und Craighero, 2006:488)

Dennoch hat Reim eine positive Wirkung, wenn das Zielwort existiert. Das Broca-Areal dürfte folglich „unter Beihilfe“ der Phonologie eines Wortes auf das Lexikon zugreifen. Wenn wir ein Wörterbuch benutzen und ein Wort nachschlagen, werden wir es analog zum neuronalen Lexikonzugriff ebenfalls dann schneller finden, wenn wir zuvor ein anderes ähnliches, welches zB. mit dem gleichen Buchstaben beginnt, gesucht und gefunden haben und quasi unser Lexikon noch an dessen Seite aufgeschlagen hatten. Aber wenn das Zielwort erst gar nicht existiert, nutzt auch die phonologische Ähnlichkeit der lexikalischen Entscheidung nicht. Dann muss trotzdem – sozusagen das gesamte – Lexikon durchsucht werden.

Folglich kann der von Fadiga u. a. (2002) und Watkins u. a. (2003) erkannte neuronale Zusammenhang von Sprachproduktion und -perzeption nicht auf einer einfachen, phonologischen Basis fußen, sondern muss auf einer komplexeren, semantischen Ebene zustandekommen. Die Regungen der Zunge bei Fadiga u. a. (2002) und

die der Lippen bei Watkins u. a. (2003) müssen auf eine semantische Verarbeitung des Wortes zurückgehen.

Genau dieser Hypothese nahmen sich Roy u. a. (2008) an. Ihre Studie, an der auch Luciano Fadiga beteiligt war, ergab sich aus einer Frage, die Fadiga u. a. (2002) aufgeworfen haben: Warum lösen alveolare Konsonanten eine geringere Muskelregung der Zunge aus, wenn sie in einem Pseudo-Wort erscheinen als wenn sie in einem existierenden Wort enthalten sind? „*This effect could be due to a further facilitation of the speech motor centres induced by the presence of meaning.*” (Fadiga u. a., 2002:401) mutmaßten sie.

Wie in dieser vorangegangenen Studie stimulierten Roy u. a. (2008) hier mittels TMS jenen motorischen Cortex, der für Zungenbewegungen verantwortlich ist, während die Probanden Wörter mit und ohne alveolarem Konsonanten (doppeltes „l” vs. doppeltes „m” oder „b”) zu hören bekamen. Eine zusätzliche Variable war die Frequenz der Wörter im alltäglichen Sprachgebrauch einerseits: Sie wurden nach „häufig”, „selten” und „unbekannt” (Pseudo-Wörter) gruppiert. Die zweite veränderliche Größe war der Zeitpunkt des TMS-Impulses, denn dieser erfolgte in einem von vier unterschiedlichen Abständen (entweder 0, 100, 200 oder 300 ms) zum Anlaut des Doppelkonsonanten. Die Frage, welche Wörter zu welchem Zeitpunkt eine Aktivität der Zungenmuskeln hervorrufen, sollte dadurch beantwortet werden.

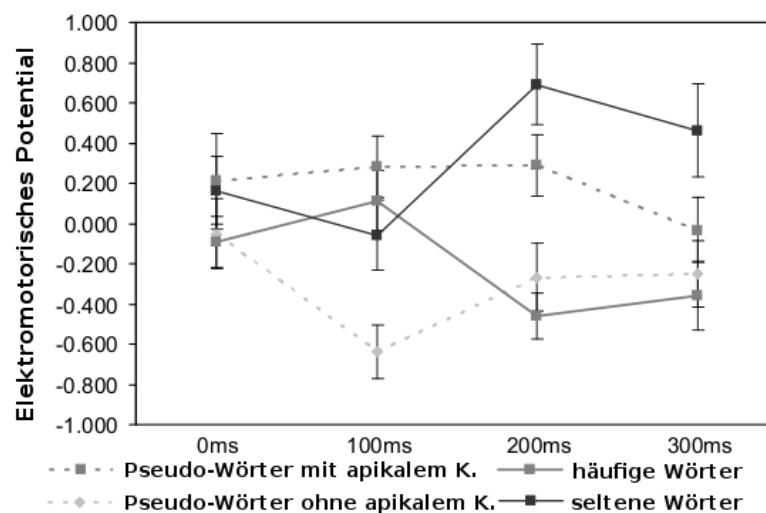


Abbildung 2.2: Potentialverlauf (Bild nach Roy u. a., 2008:104).

Das Ergebnis der Studie in Abb. 2.2 demonstrierte einen signifikanten Potentialverlauf für jede Wortkategorie. Pseudo-Wörter ohne alveolarem Doppelkonsonanten bewirkten schon relativ früh eine deutliche Senkung des elektromotorischen Poten-

tials, während jene mit alveolarem Laut fast durchgehend eine erhöhte Muskelaktivität aufwiesen. Signifikant war auch die Reaktion bei den existierenden Wörtern (welche alle ein zweifaches „l“ beinhalteten) ab 200 ms. Häufige Wörter bedingten ein deutlich abgesenktes, gar inhibitorisches Potential, während seltene eine besonders hohe Muskelaktivität auslösten, die sich wiederum deutlich von den alveolaren Pseudoworten unterschied.

„[...]the later (200 ms and 300 ms time intervals) lexical resonance effect might reflect the specific involvement of the phonoarticulatory system in the effort necessary to attribute a meaning to low frequency words [...]” (Roy u. a., 2008:105)

Die Autoren meinen, dass dieser Lexikonzugriff über das Nachproduzieren der Laute für diesen Lexikoneintrag erfolgte. Daher wäre statt Lexikon die wahrscheinlich treffendere Metapher für das Broca-Areal die eines regelgeleiteten, generativen Baukastens, der ein seltenes Wort quasi erst in seine einzelnen Bausteine zerlegt und wieder zusammensetzt. Dieser Vorgang könnte von Spiegelneuronen geleistet werden, die diese Bausteine und ihre Zusammensetzung in Form von internen, motorischen Repräsentationen aktivieren. Diese wurden in der Studie von Roy u. a. (2008) mittels TMS sichtbar gemacht.

Da Sahin u. a. (2009) (siehe Kapitel 2.1.1) in ihrer intrakranialen Studie den lexikalischen Zugriff eben zu derselben Zeitkomponente (200 ms) im Broca-Areal verorten konnten, kann man davon ausgehen, dass die hier sichtbar gemachte motorische Reaktion auf eben dieser Aktivität im Broca-Areal basierte und somit von den dortigen Spiegelneuronen stammte.

Häufige Wörter oder nicht existierende Pseudo-Wörter hingegen reizten sie offensichtlich weniger, weswegen man weiters annehmen muss, dass die Spiegelung der Perzeption in die Produktion erst stattfindet, nachdem festgestellt wurde, dass das Wort existiert und dass es keinen „direkten Draht“ zu seiner Bedeutung gibt. Häufige Wörter führten ja zu einer schwächeren Aktivierung des Broca-Areals und zu einer geringeren TMS-gestützten Muskelregung, da ihre Bedeutung (zusätzlich) auf anderen neuronalen Wegen erfasst worden sein dürfte. Daher erfordern seltene Wörter eine stärkere Einbindung des Broca-Areals und seiner Spiegelneuronen.

2.2.2 Graphematische Phonologie

Analog zum vorigen Kapitel über artikulatorische Phonologie behandelt dieser Abschnitt Studien zu Spiegeleffekten zwischen Sprachperzeption und -produktion auf

einer basalen Ebene der Sprachverarbeitung, hier beim Lesen und Schreiben. Allerdings sind Untersuchungen dazu nur spärlich vorhanden.

Longcamp u. a. (2003) untersuchten mittels FMRT und später (Longcamp u. a., 2006) mittels MEG die Aktivität in motorischen Gehirnarealen beim Lesen. Die Probanden der ersten Studie hatten im Scanner die Aufgabe, sowohl lateinische Druckbuchstaben als auch Pseudo-Buchstaben zu betrachten. Letztere waren Pseudo-Buchstaben in dem Sinn, dass sie gewisse Charakteristika der lateinischen Schrift beinhalteten (zB. horizontale oder vertikale gerade Linien oder Bögen), aber dennoch keinem Buchstaben des Alphabets ähnlich sahen. Die zweite Aufgabe, die getrennt von der ersten gestellt wurde, lautete, diese Buchstaben auf eine Tafel zu schreiben, die an der Brust der Personen fixiert war.

Buchstaben:	N	+	A	+	B	+	K	+	...
Pseudo-Buchstaben:		+		+		+		+	...
Kontrollstimuli:		+		+		+		+	...

Abbildung 2.3: Drei Kategorien von Stimuli (Bild nach Longcamp u. a., 2003:1493).

Longcamp u. a. (2003) konnten im prämotorischen Cortex (BA 6) eine signifikante Aktivierung der Nervenzellen sowohl für das Lesen als auch für das Schreiben lokalisieren. Außerdem trat bei der Leseaufgabe diese Erregung nur mit der Präsentation der echten Buchstaben auf, nicht jedoch mit den Pseudo-Buchstaben und Kontrollstimuli. Damit konnten sie zeigen, dass beim Lesen von bedeutungsvollen Zeichen ein neuronales motorisches Programm abgerufen wird, das auch am Schreiben beteiligt ist. Dieses könnte mittels kanonischer Neuronen geschehen, die beide Modalitäten auf neuronaler Ebene verbinden. Kanonische Neuronen sind solche, die im Makakengehirn feuern, wenn das Tier einen Gegenstand ergreift oder wenn es ihn nur sieht. „[...] *these premotor neurons automatically “translate” the visual features of the objects into a potential motor action.*” (Longcamp u. a., 2003:1498).

Die Autoren stellten allerdings keine Aktivität im Broca-Areal oder im GSM fest. Aber sie merken an, dass es insbesondere in der individuellen Analyse der Aktivierungsmuster im BA 6 Überlappungen für das Lesen und das Schreiben gibt, und zitieren dazu einen Fall von Anderson u. a. (1990), der eine Patientin mit einer Läsion in eben diesem Bereich beschreibt: Diese hatte dadurch sowohl die Fähigkeit Buchstaben und Wörter zu schreiben als auch zu lesen verloren. Was die fehlende Aktivität in beiden besagten Regionen betrifft, muss man außerdem bedenken, dass

sie primär für komplexe Bewegungsabläufe relevant sind und daher bei der simplen Aufgabe mit einzelnen Buchstaben wohl gar nicht oder nur schwach einbezogen werden.

In einem späteren Experiment versuchten Longcamp u. a. (2006) ihr Ergebnis weiter zu differenzieren. Diesmal war der zu messende Unterschied der zwischen gedruckten und handgeschriebenen Buchstaben. Die Hypothese lautete hier, dass letztere die motorischen Areale stärker aktivieren würden, „*to support embodied perception of handwritten letters, involving the primary motor cortex as an important part of the action-perception link.*” (Longcamp u. a., 2006:687). Dazu zeichneten sie elektromagnetische Felder mittels MEG über einem Bereich der Großhirnrinde auf, den sie dort lokalisiert hatten, wo Fingerbewegungen der Probanden die stärksten Signale von Neuronenaktivität erzeugten.

Entsprechend ihrer Hypothese ergab sich für die handgeschriebenen Buchstaben ein deutlicher Unterschied der Amplitude des für motorische Aktivität spezifischen Wellenrhythmus (~ 20 Hz) gegenüber den gedruckten Buchstaben. In ihrem Fazit führen sie dies auf die verstärkte Aktivierung eigener motorischer Repräsentationen im primären motorischen Cortex über die im benachbarten *Gyrus frontalis inferior* (welcher das Broca-Areal enthält) gelegenen Spiegelneuronen zurück, wobei dieser Zusammenhang auf Basis ihrer Studie rein hypothetisch bleiben muss:

„[...] the primary motor cortex, which is downstream from the inferior frontal gyrus, the core area of the MNS [= Mirror Neuron System, Anm.], also reacts to the sensory consequences of somebody else’s action, although this action is neither directly visible nor currently executed. In handwriting, similarly as in speech perception the knowledge of a common production process, shared by both the perceiver and the producer, would help recognition and therefore communication.” (Longcamp u. a., 2006:687)

Auch hier suchen diese Studien Aktivität von Spiegelneuronen in rein motorischen Aspekten. Doch unter der Annahme, dass das Broca-Areal und der GSM eine ähnliche Funktion (Unification) aber für unterschiedliche Modalitäten (Hören/Sprechen vs. Lesen/Schreiben) erfüllen, müsste auch im GSM eine Beteiligung an höheren, nämlich semantischen Verarbeitungsprozessen nachgewiesen werden können.

So fanden Stoeckel u. a. (2009) heraus, dass ein TMS-Impuls auf den GSM 180 ms nach Präsentation eines schriftlichen Stimulus die phonologische und die semantische Verarbeitung beeinflusst. Hier hatten die Probanden in der einen Aufgabe

zu entscheiden, ob zwei Wörter sich reimten, und in einer anderen, ob zwei Wörter homonym waren. Dabei wurde ihre Reaktionszeit gemessen und verstärkende TMS zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf den GSM angewandt. Der einzige signifikante TMS-spezifische Effekt stellte sich 180 ms nach Präsentation des Stimulus ein: Die Probanden konnten die Entscheidung schneller treffen, wenn der GSM mittels TMS quasi vorgewärmt worden war (Priming), und hier in der zweiten, semantischen Aufgabe sogar etwas schneller als in der ersten, phonologischen.

Daher liegt die Vermutung nahe, dass der GSM ähnlich wie das Broca-Areal unter Beihilfe der Phonologie die Semantik verarbeitet, was noch durch die Ergebnisse von Corina u. a. (1999) untermauert wird. Hier wurden Auswirkungen auf die phonologische und semantische Verarbeitung eines gehörlosen Gebärdensprechers untersucht, wenn dessen Broca-Areal oder dessen GSM durch TMS gestört wurde. In der Folge stellen sie fest, dass bei letzterem nicht nur phonologische, sondern auch semantische Fehler auftraten.

„Importantly, these semantic errors demonstrated considerable phonological overlap with their intended targets. [...] Taken together our data indicate that the SMG [GSM, Anm.] may play a critical role in the selection of phonological feature information and the association of this information with semantic representations in the service of language production.” (Corina u. a., 1999:580)

Diese Erkenntnis deckt sich nahezu mit der von Fadiga und Craighero (2006), dass Phonologie und Semantik hier zusammenarbeiten. Leider fehlen bis dato Studien, die diese Zusammenarbeit im GSM in bezug auf Lesen und Schreiben und in Hinblick auf Spiegelneuronen näher beleuchten.

2.2.3 Semantik

Aufgrund der Erkenntnisse der bis jetzt behandelten Untersuchungen dürfte sich der Wirkungsbereich der Spiegelneuronen auf einer kognitiv höher gelegenen, abstrakteren Ebene befinden. Daher soll es nun in weiterer Folge um Studien gehen, die die Beteiligung von Spiegelneuronen an semantischen Verarbeitungsprozessen zum Gegenstand haben.

Saygin u. a. (2004) näherten sich diesem auf klassische Weise. Sie führten ein Sprachexperiment an Aphasikern durch, die an verschiedenen Spracharealen verletzt waren, unter anderem im Gyrus frontalis inferior und im Lobus parietalis inferior anterior gelegen. Ersterer Bereich enthält das Broca-Areal, zweiterer den GSM. Die

Aufgabe für die Patienten und die Kontrollgruppe, welche aus gesunden Personen bestand, gestaltete sich wie folgt:

1. Die gezeichnete Pantomime einer zielgerichteten Handlung wird vorgelegt. In der Zeichnung fehlt das Objekt (zB. ein Bub in der Haltung des Eis Schleckens, wobei das Eis nicht dargestellt ist). Zu diesem Bild soll der Proband von zwei möglichen Objekten eines zuordnen.
2. Die Handlung wird in einem Satz beschrieben, wobei auch hier das Objekt ausgelassen ist (zB. „*he is licking the ...*“). Analog zur ersten Aufgabe ist eines von zwei möglichen Nomina auszuwählen.

Die beiden Objekte beinhalteten im pantomimischen und im sprachlichen Kontext immer die korrekte Alternative (zB. Eiscreme) und einen Ablenker. Dieser war entweder auf semantischer Ebene ähnlich zum ersten Objekt (zB. Torte, welche semantisch ähnlich zur Eiscreme ist, da beides essbar) oder in Bezug auf seine Benutzung (zB. Blumenstrauß, welcher ähnlich wie ein Stanitzel zu halten ist) vom anderen Stimulus ablenkt. Eine dritte Art von Ablenker stand in keinerlei Beziehung zur Handlung (zB. Gockelhahn).

Für beide Kontexte war das semantische Verständnis für die bezeichnete Handlung notwendig, um das richtige Objekt zuzuordnen. Die Frage lautete, ob sprachliche und nicht-sprachliche Defizite gekoppelt sind, dh. ob ein Patient, der Fehler im sprachlichen Kontext macht, auch signifikant schlechter im pantomimischen abschneidet oder ob die Kontexte unabhängig voneinander gestört sein können und ob diese Störung mit dem Läsionsort korreliert.

Leider konnten Saygin u. a. (2004) diese Frage nicht eindeutig beantworten, da sich für beide Möglichkeiten Hinweise fanden:

„There was no overall correlation between patients’ deficits in the two domains, suggesting that the deficits observed in comprehension of pantomimed actions and comprehension of actions through reading are not tightly coupled processes.” (Saygin u. a., 2004:1799)

Sie konnten einerseits feststellen, dass Defizite in der pantomimischen Domäne mit Läsionen im frontalen Bereich, einschließlich des Broca-Areals, assoziiert sein können, während Fehler im sprachlichen Kontext mit parietalen Regionen, einschließlich des GSM, in Verbindung stehen. Dennoch gab es auch Probanden, die nur in einer Region geschädigt, aber in beiden Kontexten gestört waren, und dies insbesondere je leichter die Schädigung war. Das heißt, eine Schädigung des frontalen

Cortex hat stets eine Störung im pantomimischen Kontext zufolge, dies aber nicht ausschließlich. Selbiges gilt analog für eine parietale Läsion: „[...] *we see some evidence for some common substrates between linguistic and non-linguistic processing of action information.*” (Saygin u. a., 2004:1799).

Aber in beiden Domänen traten die Defizite überwiegend mit semantischen Ablenkern auf bzw. unterschied sich die Häufigkeit dieser Fehler signifikant von der Fehlerhäufigkeit bei den beiden anderen Ablenkern. „*We can conclude that associative or conceptual processes must be engaged in the comprehension of the action stimuli in both domains [...].*” (Saygin u. a., 2004:1799).

Diese kontextunabhängige Störung der Semantik passt in das Bild der Spiegelneuronen, die konzeptuelle („conceptual”) bzw. semantische Funktion in den beiden frontalen und parietalen Bereichen innehaben. Weiters kann man sagen, dass frontale Spiegelneuronen im nicht-sprachlichen Kontext (aber nicht notwendigerweise nur in diesem) die konzeptuelle Auflösung der wahrgenommenen Handlung besorgen, während parietale dies für den sprachlichen (aber ebenfalls nicht nur in diesem) tun.

Auf den ersten Blick widersprechen diese Ergebnisse jenen Studien, die die phonologische, semantische Verarbeitung im Broca-Areal untersuchten und erkannten, dass sprachliche Stimuli sehr wohl primär in diesem frontalen Areal verarbeitet werden, während dieses Experiment dem frontalen Cortex primär Stimuli im pantomimischen Kontext zuordnet. Doch man darf nicht vergessen, dass Saygin u. a. (2004) die Sätze in schriftlicher Form präsentierten, weshalb die linguistische Verarbeitung eher im Schreib-Lese-Zentrum, also unter anderem dem GSM, stattfindet.

Die Befunde dieser Studie über den linken inferioren frontalen Gyrus passen dennoch gut zu den anderen und bereichern diese sogar, da sie zeigen, dass das Broca-Areal und seine benachbarten Regionen beteiligt sind, wenn ein Stimulus nach visuell-motorischen Aspekten verarbeitet werden muss. Derselbe kortikale Bereich könnte zum Einsatz kommen, wenn der Stimulus *auditiv*-motorischer, dh. sprachlicher, Natur ist, wie dies bei den vorigen Studien des Kapitels 2.2.1 über artikulatorische Phonetik und Phonologie der Fall war. Der immanente Vorgang, der beiden Stimulusformen zugrunde liegen könnte, ist das neuronale Nachproduzieren der Motorik – des Schreibens einerseits, des Sprechens andererseits – durch Spiegelneuronen. Aber die Untersuchung von Saygin u. a. (2004) belegt nicht, dass solche Nervenzellen hier beteiligt seien.

Dazu muss das Experiment von Buccino u. a. (2005) ins Treffen geführt werden, das der Frage nachging, inwieweit Spiegelneuronen an semantischen Vorgängen beteiligt sind. Dazu suchen die Autoren zusammenhängende Aktivität von sprach-

verarbeitenden Gehirnregionen und von Muskeln, die auf Basis der Bedeutung eines sprachlichen Stimulus zustandekommt.

Die Probanden bekamen Sätze zu hören, die entweder eine Handlung mit der Hand oder mit dem Fuß ausdrückten, zB. ital. „*Lavava i vetri*” („Er wusch die Gläser”) oder ital. „*Calciava la palla*” („Er trat den Ball”). Währenddessen wurde die Regungen von Hand- und Fußmuskeln mittels EMG gemessen und die Gehirnrinde mittels TMS stimuliert. Als Kontrollstimulus dienten Sätze abstrakten Inhalts, zB. ital. „*Temava il buio*” („Er fürchtete die Dunkelheit”).

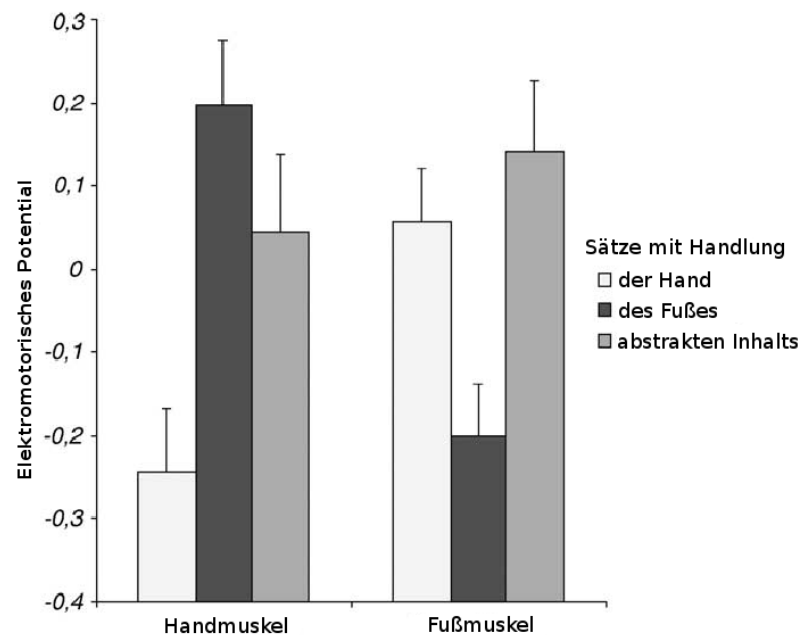


Abbildung 2.4: EMG-Potentiale gemessen an Hand- und Fußmuskeln beim Hören von Sätzen mit Handlung der Hand, des Fußes oder abstrakten Inhalts (Bild nach Buccino u. a., 2005:359).

Abb. 2.4 zeigt den eindeutigen Zusammenhang zwischen Muskelaktivität¹ eines Körperteils und semantischem Bezug eines sprachlichen Stimulus auf die Aktion dieses Körperteils.

Der semantische Bezug ist es, der diese Untersuchung mit jener von Saygin u. a. (2004) verknüpft. Während Saygin u. a. (2004) den semantischen Verarbeitungsprozess durch ihre Läsionsstudie im Cortex relativ genau verorten konnten, konnten

¹Die hier gemessene Reaktion am Muskel ist eigentlich eine Absenkung des Potentials, was eine Muskelaktivität in Wahrheit behindert und in anderen TMS-EMG-Studien (insbesondere den hier zuvor beschriebenen) nicht aufgetreten ist. Buccino u. a. (2005) diskutieren dazu mehrere mögliche Erklärungen, auf die hier nicht näher eingegangen wird. Dieses Phänomen ist für die Feststellung des gesuchten Zusammenhangs zwischen Sprachverarbeitung und Muskelaktivität nicht weiter relevant.

Buccino u. a. (2005) feststellen, dass dieser Prozess mit der eigenen Motorik gekoppelt ist. Da zweites Ergebnis sehr deutlich auf das Werk von Spiegelneuronen hinweist, liegt der Verdacht nahe, dass am Zustandekommen des ersten Ergebnisses ebenfalls solche Neuronen beteiligt sind, obwohl hier nicht jenes motorische Feedback gemessen wurde, das für die Aktivität von Spiegelneuronen charakteristisch ist.

Doch nun stellt sich die Frage, ob Spiegelneuronen insbesondere auf solche sprachlichen Stimuli reagieren, die irgendeine transitive Handlung beschreiben. Denn es wurde gezeigt, dass Spiegelneuronen in den BA 44 und 45 bzw. in den homologen Arealen des Affen durch Bewegungsbeobachtung und -ausführung einzelner Körperteile gereizt werden, doch gilt dies in der sprachlichen Domäne analog auch für Verben, die solche Bewegungen bezeichnen? Wenn dem so wäre, müsste sich eine solche körperbasierte Semantik in jenen Regionen abbilden lassen, die Spiegelneuronen enthalten. Was das Broca-Areal betrifft, konnten die beiden folgenden Studien keine solche Abbildung feststellen.

Aziz-Zadeh u. a. (2006) betrachteten mittels FMRT die Gehirnaktivität beim Lesen und Verarbeiten von Sätzen wie *„biting the peach“*, *„grasping the pen“* oder *„pressing the car brake“* und beim Beobachten derselben Handlungen über Video. Die drei Beispielsätze repräsentieren drei Kategorien, die nach dem beteiligten Körperteil definiert sind: Mund, Hand und Fuß. Sowohl beim Lesen als auch beim Beobachten war das Broca-Areal aktiviert, jedoch gab es zwischen den drei Gruppen keine signifikanten Unterschiede im Aktivierungsmuster.

Zu einem ähnlichen Befund kommen auch de Zubizaray u. a. (2010), deren Studie aber etwas breiter angelegt war. Sie untersuchten nicht nur den Einfluss von Verben, die Handlungen mit Mund, Hand und Fuß beschrieben, sondern nahmen auch Wörter, die in keine dieser semantischen Kategorien fielen, sowie Pseudo-Wörter in das Testkorpus auf. Neben dem sprachlichen Teil beinhaltete ihr Untersuchungsdesign außerdem die Beobachtung und Ausführung von Bewegungen mit den besagten Körperteilen einerseits und die Beobachtung von alltäglichen Vorgängen ohne Handlungen als Kontrollstimuli andererseits. Die sprachlichen Stimuli waren durchwegs einzelne Infinitive, waren also nicht in eine Objektphrase eingebettet, wie dies bei der ersten Studie der Fall war.

In beiden Modalitäten, dh. beim Beobachten und beim Ausführen, stellten de Zubizaray u. a. (2010) signifikante Aktivitätsmuster im Broca-Areal (BA 44) fest, wie dies von Spiegelneuronen zu erwarten ist. Unterschied man die Aktivität bezüglich Hand, Mund oder Fuß, fanden sich jedoch keine signifikanten Zusammenhänge zwischen den Modalitäten. Dasselbe Bild ergab sich für den sprachlichen Teil des Ex-

periments. Alle Wörter, sowohl die Verben, als auch jene ohne semantischen Bezug zu Körperteilen und die Pseudo-Wörter erregten das BA 44. Zwischen ihren spezifischen Aktivitätsmustern stellten sich ebenfalls keine eindeutigen Unterschiede heraus.

„The results therefore provide support for alternative explanations of ‘mirror’ activity, and provide no evidence that the putative human MNS [Mirror Neuron System, Anm.] makes a preferential or selective contribution to comprehending action word meanings.” (de Zubizaray u. a., 2010:81), schließen die Autoren aus ihren Ergebnissen. Stattdessen teilen sie dem Broca-Areal *„a role of sequencing or hierarchical linearisation of information across action and linguistic domains”* (de Zubizaray u. a., 2010:83) zu.

Außerhalb des Broca-Areals, nämlich im primären motorischen Cortex, fanden Aziz-Zadeh u. a. (2006) freilich schon somatotopische Kongruenz mit den Muskeln des im sprachlichen Stimulus bezeichneten Körperteils. Das heißt, Phrasen wie „biting the peach” oder „grasping the pen” aktivierten unterschiedliche motorische Bereiche, wie dies auf Basis der Ergebnisse von Buccino u. a. (2005), die diese sprachlich evozierter Muskelregung ja mittels TMS aufzeigten, zu erwarten war. Dies spricht für *„an involvement of premotor areas with mirror neuron properties in re-enactment of sensory-motor representations during conceptual processing of linguistic phrases describing actions.”* (Aziz-Zadeh u. a., 2006:1821). Die Bedeutung eines sprachlichen Ausdrucks wird demnach (im wahrsten Sinne des Wortes) *begriffen*, indem die bezeichnete Handlung auf neuronaler Ebene nachgespielt wird.

2.2.4 Syntax

de Zubizaray u. a. (2010) schlussfolgern, dass das BA 44 eine Rolle im Ab- und Nachbilden von Abläufen sowohl von Bewegungen als auch von sprachlichen Entitäten spielen. Dies fügt sich in die Unification-Hypothese wie sie von Hagoort (2005) beschrieben wird, denn auch hier wird das Broca-Areal als jene neuronale Komponente gesehen, die Einzelnes in ein Ganzes zusammenfügt.

Spiegelneuronen machen genau dies. Am Affen wurde festgestellt, dass sie eine Handlung immer nur als Ganzes kodieren und zwar vom Anfang bis zum Ende, dh. von dem Moment an, in dem die Bewegung auf ein Ziel hin startet, bis zum Erreichen des Ziels. In dieser Ganzheit ist außerdem enthalten, welcher Körperteil die Handlung ausführt und von welcher Beschaffenheit das Ziel ist. Die Aktivität mancher Spiegelneuronen im Makakengehirn hing mit genau einer bestimmten Konfiguration dieser beiden Variablen zusammen, andere korrelierten mit mehreren unterschiedli-

chen Konstellationen und wieder andere zeigten gar keine klare Korrelation zwischen beobachteter und selbst durchgeführter Handlung (siehe Kapitel 1.2).

Doch es ist die Repräsentation einer Ganzheit, die die wesentliche Funktion der Spiegelneuronen, aber auch der kanonischen Neuronen ausmacht. Ihre primäre Aufgabe liegt auf einer abstrakten, syntaktisch-semantischen Verarbeitungsebene, die die Beziehung zwischen einem Subjekt und einem Objekt herstellt. Weniger liegt ihre Funktion folglich in der prominenten und namensgebenden neuronalen Spiegelung einer beobachteten Bewegung in den eigenen Motorcortex. Denn dieser kann, muss aber nicht von Spiegelneuronen mitaktiviert werden.

Diese Vermutung legt ein weiteres Teilergebnis von Aziz-Zadeh u. a. (2006) nahe: Neben der Kongruenz der Wahrnehmung eines Satzes, der eine Aktion mit einem bestimmten Körperteil ausdrückt, mit der Aktivität im motorischen Areal dieses Körperteils untersuchten sie auch, ob das Hören eines Satzes, in dem die Aktion des Körperteils metaphorisch gebraucht wird (zB. „*grasping the idea*“), ebenfalls die entsprechenden Bereiche des Motorcortex erregt. Da dies aber nicht der Fall war und hier nur das Broca-Areal aufleuchtete, scheinen die dortigen Spiegelneuronen nicht notwendigerweise motorische Areale zu aktivieren.

Daher liegt ihre Funktion nur sekundär im Spiegeln von Handlungen, nämlich nur dann, wenn die Handlung in concreto verstanden werden muss. Eine abstrakte, metaphorische Aussage, die keine konkrete Handlung beschreibt, bedarf keiner konkreten neuronal-motorischen Repräsentation. Aus diesem Grund muss der Begriff der Spiegelneuronen über Motorik hinausgehend und von Motorik entkoppelt gefasst werden. Dazu nochmal Zaboura (2009):

„Auch, wenn sich die symmetrische Aktivierung der Neurone intern abspielt, handelt es sich doch um eine selbst generierte Aktion und nicht um ein reines motorisches Echo des Gesehenen. Es geht also nicht um eine reine Duplikation oder Reproduktion, sondern um Repräsentation.“
(Zaboura, 2009:91)

Dieses Verständnis ist notwendig, um den Spiegelneuronen überhaupt linguistische Relevanz zusprechen zu können. Würde man sie auf eine rein reduplikatorische Funktion reduzieren, wäre das Fundament zu klein, um darauf ein Modell für Sprachverarbeitung zu errichten. So ist es nun aber gestattet, Spiegelneuronen Bedeutung für einen weiteren, vielleicht sogar wichtigeren Bereich von Sprache zuzutrauen: der Syntax.

Kemmerer und Gonzalez-Castillo (2010) verwenden dafür den theoretischen Rahmen der „Two-Level Theory of verb meaning“. Dieser Theorie nach ergibt sich die

Semantik und Syntax eines Verbs einerseits aus seiner ihm einzigartigen, intensionalen Bedeutung und andererseits aus der ihm zur Verfügung stehenden Menge von syntaktisch-semantischen Schablonen („*templates*“) für seinen Verwendungskontext. Dies ist ähnlich zum lexikalischen Ansatz der Unification-Hypothese von Hagoort (2005), wo grammatische Regeln auch als Eigenschaften betrachtet werden, die als Teil eines Lexems gespeichert sind.

Die erste Ebene umfasst semantische Merkmale, die das Verb unabhängig von seiner grammatischen Verwendung beschreiben. Hier bedeutet zB. das Verb „flüstern“ leises, stimmloses Sprechen. Auf der zweiten Ebene hingegen sind die Schablonen angesiedelt, die quasi in semantischen Primitiven beschreiben, wie das Verb in Beziehung zu anderen Konstituenten, seinen Argumenten, steht und welche semantischen Eigenschaften die Argumente erfüllen müssen. Das Schablonen-Set des Verbs „flüstern“ könnte man wie in Tabelle 2.1 rudimentär dargestellt definieren.

Schablone	Beispiel
X_{Agens} tut etwas	Hans flüstert
X_{Agens} tut etwas mit Y_{unbelebt}	Hans flüstert die Worte
X_{Agens} tut etwas mit Y_{unbelebt} in Richtung von Z_{belebt}	Hans flüstert Maria die Worte

Tabelle 2.1: Dieses Beispiel erhebt freilich keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es soll lediglich zeigen, wie abstrakte Strukturvorschriften für die Argumente eines Verbs aussehen könnten.

Einzelne Schablonen können in mehreren Verbklassen auftreten, wobei mit Verbklassen bei Kemmerer und Gonzalez-Castillo (2010) eine bestimmte Menge von gemeinsamen semantischen und syntaktischen Merkmalen der in einer Klasse enthaltenen Verben gemeint sind. Die Verben „singen“ und „flüstern“ könnte man so derselben Klasse zuordnen, da sie einerseits semantisch ähnlich sind und andererseits dasselbe Schablonenrepertoire zur Verfügung haben.

Eine dieser Schablonen, zB. „ X_{Agens} tut etwas“, kann aber auch in anderen Klassen angewandt werden, zB. in jenen der intransitiven Verben wie „lachen“. Ebenso wird es Verbenklassen geben, die stattdessen die zweite und/oder dritte Schablone auf ihrer zweiten Ebene im Sinne der Two-Level Theory repräsentieren, zB. jene, die die Verben „sagen“ oder „wünschen“ enthalten. Je weniger semantische Primitive und Eigenschaften in einer Schablone eingesetzt sind, dh. je abstrakter ihre Gesamtbedeutung ist, desto wahrscheinlicher wird sie in mehreren verschiedenen Verbklassen auftreten können.

Kemmerer und Gonzalez-Castillo (2010) sehen diese beiden Ebenen nicht als strikt getrennt, sondern vielmehr als in einander verlaufend an, da die Anzahl der

	Erste Ebene	Zweite Ebene
Semantischer Kontrast:	zwischen Verben einer Klasse	zwischen Klassen
Grad der Schematizität:	niedrig	hoch
Grammatische Relevanz:	niedrig	hoch

Tabelle 2.2: Die beiden Ebenen in der Two-Level Theory (vgl. Kemmerer und Gonzalez-Castillo, 2010:58)

Verben pro Klasse und die Anzahl an Klassen variieren kann. Sie verwenden daher, wie in Tabelle 2.2 ersichtlich, zur Beschreibung der Ebenen Begriffe, die ein Kontinuum ausdrücken. Gäbe es zB. im Extremfall eine Klasse, die nur ein einziges Verb enthält, weil dieses einzigartig in seinen semantischen Merkmalen und einzigartig in Form und Menge seiner Schablonen ist, dann wäre

- der semantische Kontrast auf erster Ebene minimal, da es ja nur ein Verb gibt,
- der semantische Kontrast auf zweiter Ebene maximal, da keine der Schablonen und semantischen Merkmale der Klasse mit anderen geteilt würde
- und folglich der Grad der Schematizität und die grammatische Relevanz für beide Ebenen dieses Verbs gleich hoch bzw. nicht mehr unterscheidbar.

Daher muss die Definition der Bedeutung eines Verbs in der Two-Level Theory in einem kontinuierlichen Spektrum erfolgen. Dies ist, wie gleich gezeigt wird, auch von neurologischer Relevanz.

Auf Basis dieser Theorie stellen Kemmerer und Gonzalez-Castillo (2010) zwei Hypothesen auf. Erstens behaupten sie, dass die intensionale Semantik der ersten Ebene durch somatotopische Neuronenaktivität im motorischen Cortex repräsentiert ist. Eine solche Kongruenz zwischen der Semantik eines sprachlichen Stimulus und der Erregung von bestimmten motorischen Arealen wurde im vorigen Kapitel 2.2.3 ausführlich beschrieben und konnte dort für Sätze gezeigt werden, die eine konkrete Handlung mit einem Körperteil ausdrücken.

Die zweite Hypothese besagt, dass die syntaktisch-semantischen Schablonen der zweiten Ebene durch die Aktivität der Spiegelneuronen im BA 44 des Broca-Areals neuronal abgebildet sind. Sie erscheint aus mehreren Gründen plausibel. Zum einen stellt jede Schablone für sich eine Einheit dar und drückt als Ganzes eine einzigartige Beziehung zwischen Subjekt und Objekt aus, so wie Spiegelneuronen Handlungen als Ganzes kodieren, die von einem Körperteil auf ein Zielobjekt ausgeführt werden. Zum anderen können Schablonen, wie zuvor erwähnt, in ihrer Gesamtbedeutung

unterschiedlich abstrakt sein, je nachdem wie genau die semantischen Eigenschaften von Subjekt und Objekt und die semantischen Primitive ihrer Beziehung definiert sind. An Spiegelneuronen im Gehirn des Makaken hat man ein ähnliches Kontinuum gefunden (siehe Kapitel 1.2): Manche korrelieren nur mit ganz bestimmten Handlungen, die mit einem bestimmten Körperteil auf ein Zielobjekt einer bestimmten Größe ausgeführt werden (zB. ein Präzisionsgriff nach einem kleinen Ding wie einer Erdnuss). Andere reagieren hingegen auf mehrere Objekte unterschiedlicher Größen und kodieren daher quasi ein abstrakteres Bild einer Handlung (zB. ein Griff nach einer Erdnuss, einem Apfel oder anderen Gegenständen).

„[...] comprehending sentences like *Carol sprayed water on the flowers* and *Carol sprayed the flowers with water* involves simulating not only how the described actions are performed in terms of relatively low-level, effector-specific kinematics, but also how they are construed in terms of relatively high-level, effector-neutral goals and intentions [...]”
(Kemmerer und Gonzalez-Castillo, 2010:68)

Gäbe es ein Spiegelneuron, das nur bei einer einzigen Handlung feuerte, und dazu ein Neuron des motorischen Cortex, das nur zusammen mit diesem Spiegelneuron aktiviert wird, entspräche dies der Theorie nach dem oben geschilderten Extremfall eines Verbs, das als einziges eine Klasse bildet und nichts mit anderen Klassen gemein hat.

2.2.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde näher beleuchtet, welchen Anteil Spiegelneuronen an der Sprachverarbeitung haben, und im Zuge dessen die Funktionsweise dieser Neuronen weiter differenziert. Angefangen wurde mit der Hypothese, dass sie durch ein imaginäres motorisches Nachspielen der Sprechbewegungen die neuronale Basis für das Verstehen von Gesagtem liefern. Hierbei stellte sich heraus, dass sie dies insbesondere bei seltenen Wörtern taten, kaum jedoch bei häufigen oder nicht existierenden, was darauf hindeutet, dass ein solcher phonologischer Prozess in Abhängigkeit von einem vorangehenden lexikalisch-semantischen im Broca-Areal abläuft.

Analog dazu fand man eine Spiegelung der neuronal-motorischen Produktion von Schreibbewegungen in der Perzeption von Buchstaben, insbesondere von handgeschrieben. Weiters wurden Hinweise zusammengetragen, dass der GSM ähnlich wie das Broca-Areal vorgeht und die Semantik eines schriftlichen Stimulus zusammen mit phonologischen Prozessen verarbeitet.

Zudem konnte gezeigt werden, dass motorische Reaktionen auch auf semantischer Verarbeitungsebene hervorgerufen werden können. Eine ähnlich klare Evidenz ergibt sich für geschriebene Sprache und für Spiegelneuronen im GSM auf Basis der vorhandenen Literatur leider nicht. Stattdessen konnten aber Ähnlichkeiten der beiden Areale in ihrer Funktionsweise aufgezeigt werden.

Dies führte schlussendlich zu einer weiteren Ausdifferenzierung dessen, was Spiegelneuronen sind und was sie für Sprache leisten könnten. Dadurch konnten sie in einem theoretischen Rahmen verankert werden, in dem ihnen eine zentrale Funktion in der Verarbeitung von Syntax zukommt.

Zusammenfassend muss festgehalten werden, dass Spiegelneuronen auf mehreren Ebenen der Sprachverarbeitung beteiligt zu sein scheinen. Einerseits auf phonologischer Ebene, wenn ein seltenes Wort mit Unterstützung des motorischen Cortex im Lexikon gefunden werden muss, andererseits auf semantischer Ebene, wenn die Bedeutung eines Ausdrucks ebenfalls mittels Projektion in motorische Areale generiert wird, und zuletzt auf syntaktischer Ebene, wenn die Bedeutung in Beziehung zu anderen Konstituenten besteht, die durch Spiegelneuronen holistisch repräsentiert ist.

Kapitel 3

Spiegelneuronen und Sprachentwicklung

Nachdem das Phänomen Spiegelneuronen und seine Bedeutung für die Sprachverarbeitung ausführlich behandelt wurde, widmet sich das dritte Kapitel dieser Arbeit ihrem diachronen Einfluss auf die Sprachgenese, sowohl in ihrer onto- als auch phylogenetischen Dimension. Beide beeinflussen einander und sind daher gemeinsam zu betrachten, wenn etwas über Sprachentwicklung gesagt werden soll. Einerseits sind ontogenetisch frühe Entwicklungsphasen bei phylogenetisch verwandten Arten eher anzutreffen als spätere Phasen. Andererseits spiegelt sich eine frühe phylogenetische Entwicklung in der Ontogenese von mehr verwandten Arten wider als spätere Entwicklungen.

Eine solche Entwicklungsphase, die einerseits früh in der Phylogenese des Menschen, dh. nämlich auch bei seinen nächsten Artverwandten, und andererseits früh in seiner Ontogenese auftritt, dh. hier noch vor dem Spracherwerb, ist die der Ausbildung von Handlungen und Gesten. Hiermit beschäftigt sich der erste Teil dieses Kapitels. Danach erst werden Erstspracherwerb und Sprachevolution im Lichte der Spiegelneuronen behandelt.

3.1 Gesten

Sobald sie das Licht der Welt erblicken, haben beide, Affen und Menschen, zunächst zu lernen, sich in dieser Welt zurechtzufinden. Sie müssen lernen, dass ihr Körper jenes Medium ist, über die sie selbst mit der Umwelt interagieren können. Dies beginnt mit der Erfahrung des Körpers als Subjekt, das wahrnimmt, einerseits und als Objekt, das sich selbst wahrnimmt, andererseits. Für Gallese und Sinigaglia (2010)

resultiert daraus „[...] its action-orientedness that the body schema provides us with the power going beyond the limits of our own bodies, extending the localization of our movements to the end of some tool held in the hand.” (Gallese und Sinigaglia, 2010:747). Da dieses Körperschema die Ausführung von Handlungen erst ermöglicht, muss der Körper folglich alle möglichen Handlungen im Rahmen eines Handlungsraums in sich tragen, dh. internalisiert haben, sodass dieser Raum selbst durch den physischen Verlust einer Extremität nicht gestört und als Gefühl eines Phantomglieds aufrechterhalten wird. Daraus gebiert der „*Körper als Dreh- und Angelpunkt des Seins*” (Zaboura, 2009:44) Interaktion und Gestik.

Diese Entwicklung im Kinde wird im ersten Abschnitt dieses Unterkapitels beleuchtet. Anschließend wird näher auf die Funktion von Gestik beim Menschen und beim Affen eingegangen und zuletzt ihr Zusammenspiel mit gesprochener Sprache behandelt.

3.1.1 Entwicklung

Kurz vor und nach der Geburt sind die Bewegungen der Föten und Neugeborenen spontan, unregelmäßig und unkoordiniert. Dennoch gibt es bestimmte, wiederkehrende Bewegungsabläufe, die Aßmann u. a. (2007) an sechs ein bis zehn Tage alten Babys systematisch untersuchten. Dafür wurden sie 20 Minuten lang auf Video aufgezeichnet.



Abbildung 3.1: Hierarchische Bewegungsstruktur (Bild nach Aßmann u. a., 2007:582).

Dabei stellten sie eine hierarchische Ordnung der Bewegungen fest: „A movement sequence could be segmented in movement phrases that are composed of movement elements.” (Aßmann u. a., 2007:573), wobei ein „Bewegungselement” definiert ist als die Streckung oder Beugung eines Arms oder Beins und eine Bewegungsphrase als eine Folge von Bewegungselementen, deren Anfang und Ende jeweils durch eine längere Bewegungspause markiert sind. Mehrere Bewegungsphrasen ließen sich ihrer Ansicht nach außerdem zu Phrasenbündeln zusammenfassen (siehe Abb. 3.1).

Daraus schließen die Autoren:

„[...] hierarchical organization and chunking are very effective mechanisms to reduce the degrees of freedom in information processing. Therefore, it is plausible to appear in exploratory behavior of neonates in the process of gathering information about the biodynamical properties of their bodies.” (Aßmann u. a., 2007:582)

Diese Bewegungsstruktur ist durch ein Oszillieren zwischen „*origin and target positions*”, dh. zwischen „*reference configurations*”, in die eine Bewegung immer wieder zurückkehrt, definiert. Aus dieser Erfahrung entwickelt sich für das Neugeborene ein Gefühl für zielgerichtete, abgeschlossene Bewegungsabläufe: „*From this point of view, we propose that neonates experience goal directedness as the matching of action and perception through the biodynamical organization of their body towards single final postures [...]*” (Aßmann u. a., 2007:583).

Hadders-Algra (2005) berichten weiters von Studien, die belegen, dass Kinder bereits ab der Geburt bis zum Alter von einem Monat ihre Bewegungen tendentiell in Richtung vorhandener Objekte ausführen. Dies stellte man anhand der elektromyographischen Aktivität von Muskeln fest, die bei Bewegungen in eine bestimmte Richtung beteiligt sind. Allerdings nimmt sie in den darauffolgenden zwei Monaten ab, „*indicating that motoneuron excitability decreases during the first 3 months after birth.*” (Hadders-Algra, 2005:101), um danach wieder zuzunehmen und mit vier bis fünf Monaten in zielgerichtete Greifbewegungen zu münden. Eine solche U-förmige Lernkurve ist ein typisches Phänomen in der kindlichen Entwicklung, das auch in anderen Domänen (zB. der Sprachentwicklung) auftritt.

Auf welche Weise Greifbewegungen in den nächsten Altersstufen von sechs, neun und zwölf Monaten durch die Sichtbarkeit und Größe des Zielobjekts beeinflusst werden, untersuchten Berthier und Carrico (2010). Dazu präsentierten sie Säuglingen ein großes oder kleines fluoreszierendes Objekt bei Dunkelheit oder bei Licht. Dabei zeigte sich, dass

1. jüngere bei Dunkelheit schneller nach dem Objekt griffen und
2. ältere schon während der Bewegung auf das Objekt hin die Hand entsprechend der Objektgröße formten, während jüngere dies erst nach Berührung des Objekt taten.

Dies deutet darauf hin, dass jüngere Babys in der Greifbewegung sich mehr auf ihre propriozeptive als visuelle Sinneswahrnehmung verlassen, ältere hingegen mehr

auf die sichtbare Konfiguration ihrer Hand achten, um sie zu einem Objekt hinzuführen. Ab dem Alter von 9 Monaten etwa scheinen Säuglinge in der Interaktion mit ihrer Umwelt also vermehrt auf visuelle Informationen zu setzen.

Ab diesem Alter beginnen Kinder Zeigegesten zu verwenden. Tomasello u. a. (2007:714) unterscheiden hierbei drei Arten:

- imperativ („*they want others to do things*”),
- deklarativ informativ („*they want others to know things*”)
- deklarativ expressiv („*they want others to feel things*”)

Cochet und Vauclair (2010) gehen von der Hypothese aus, dass imperative Zeigegesten sich aus Greifbewegungen entwickeln, die beiden anderen hingegen durch Imitation gelernt werden, und untersuchten sie an 48 Kleinkindern im Alter von 14 bis 31 Monaten. Dabei zogen sie auch in Betracht, ob die Probanden ihre Gesten durch Laute begleiteten, wo sie dabei hinblickten, ob sie die linke oder die rechte Hand dazu verwendeten und ob sie den Zeigefinger oder die ganze Hand benutzten.

Neben einer Kontrollaufgabe, in der die Kinder einen Gegenstand einfach nur zu ergreifen hatten, führten Cochet und Vauclair (2010) folgende Experimente durch: Im ersten saß man dem Kind gegenüber, hielt dabei ein Spielzeug in der Hand und gab es dem Kind schließlich, nachdem man damit eine Zeit lang herumgespielt hatte. Anschließend nahm man es ihm wieder weg und stellte es unerreichbar auf den Tisch, was das Kind veranlassen sollte, eine imperative Zeigegeste zu tätigen. Der zweite Versuchsaufbau sah vor, dass einer der Untersucher sich mit dem Kind beschäftigte, während ein anderer überraschend hinter dem Kollegen eine Tafel mit einem aufgemalten Gesicht hochhielt, die nur das Kind sehen konnte und eine expressive Zeigegeste bewirken sollte. Im dritten Experiment wurde zuerst, für das Kind sichtbar, ein Gegenstand auf dem Tisch verdeckt, der anschließend von einer anderen hinzukommenden Person gesucht wurde. Hier sollte das Kind eine informative (helfende) Zeigegeste durchführen.

Die Unterschiede zwischen imperativen und deklarativen Gesten waren in vielerlei Hinsicht signifikant. Zum einen wurden die imperativen überwiegend mit der ganzen Hand ausgeführt, während die anderen meist den ausgestreckten Zeigefinger involvierten, was darauf hindeutet, dass erstere eigentlich verkürzte Greifbewegungen darstellten. Weiters konnte man feststellen, dass die Verwendung der ganzen Hand ab-, die Verwendung des Zeigefingers hingegen mit dem Alter generell zunahm.

Deklarative Gesten wurden länger gehalten, eher durch Laute begleitet und insbesondere informative zeichneten sich dadurch aus, dass die Kinder öfter zwischen der angezeigten Sache und der Person hin- und herblickten. Daher liegt nahe, dass sie durch diese Gesten primär etwas kommunizieren wollten.

Zwischen expressiven und informativen Gesten entdeckten Cochet und Vauclair (2010) ebenfalls Abstufungen: Erstere wiesen gegenüber imperativen Gesten und den einfachen Greifbewegungen keinen signifikanten Unterschied dahingehend auf, ob die Bewegung mit der rechten oder der linken Hand ausgeführt wurde. Informativ deklarative Gesten dagegen involvierten tendentiell eher die rechte Hand. Bei diesen war der Blick außerdem weniger – wie bei expressiven Gesten – auf die Sache fixiert, sondern wechselte häufiger auch zur Person.

„The development of declarative expressive pointing may therefore represent an intermediate stage between imperative and cooperative communication. It may be more complex than simply requesting an object, but less demanding than cooperating with and helping an adult.”
(Cochet und Vauclair, 2010:439)

Aufgrund dessen kann man allerdings nicht sagen, dass sich deklarative Gesten aus imperativen entwickeln, denn auch wenn die Verwendung von deklarativen Gesten mit dem Alter zunahm, veränderte sich die Anzahl der imperativen Gesten nicht. Während letztere entsprechend der Hypothese aus Greifbewegungen entstehen dürften, korreliert das Auftreten deklarativer Gesten eher mit der generellen Sprachentwicklung des Kindes.

Es scheint also zwei parallele Entwicklungsprozesse zu geben: einerseits jenen, über den Greifbewegungen – oder allgemeiner die Interaktionsmöglichkeiten mit der Außenwelt – *als solche* gelernt werden und andererseits einen kommunikativen, auf die Interaktion mit anderen Lebewesen *als solche* ausgerichteten Entwicklungsprozess. Ersteren kann man auch an Tieren beobachten, wenn diese darauf konditioniert werden, dass nur der Ansatz einer Handlung bei einem anderen Individuum eine Reaktion auslösen kann. Ein solches Ansetzen, aber nicht vollständiges Ausführen einer Handlung entspricht einer imperativen Zeigegeste beim Kind und zielt darauf ab, Objekte der Außenwelt in einen gewünschten Zustand zu bringen.

„But they [Kleinkinder, Anm.] also sometimes produce more cooperative imperatives in which they attempt to go through the intentional/mental states of the recipient, her understanding and motivations, in a way that more individualistic imperatives do not.” (Tomasello u. a., 2007:714)

„Kooperative“ (deklarative, deiktische) Gesten werden daher verwendet, um mentale Zustände anderer Artgenossen zu verändern, dh. deren Aufmerksamkeit zu erlangen oder Wissen zu vermitteln, was voraussetzt, dass man dem anderen solche Zustände überhaupt zuschreiben kann. Die Frage nach der Entwicklung von Gestik ist daher primär die Frage nach der Entwicklung der Fähigkeit, eine „Theory of Mind“ über andere aufzustellen: Was weiß und fühlt der andere, was sind seine Ziele und Wünsche und was denkt er über mich? Dieser Frage wird im Kapitel 3.2 nachgegangen werden.

3.1.2 Funktion

Zunächst gilt es nun kommunikative Gesten nach ihrer Funktion zu differenzieren. Zum einen können sie zusammen mit gesprochener Sprache oder isoliert auftreten, zum anderen können sie ikonisch oder konventionell sein. Ikonische (propositionale) Gesten drücken eine Form oder einen Sachverhalt durch sich selbst aus, zB. indem man die Größe eines Objekts durch den Abstand zwischen Finger und Daumen darstellt. Konventionelle Gesten hingegen transportieren eine Bedeutung, die nur innerhalb von Individuen einer bestimmten Gruppe erfasst werden kann. Klassisches Beispiel hierfür ist das Kopfnicken, das in den meisten europäisch geprägten Kulturen Zustimmung bedeutet.

Werden ikonische oder konventionelle Gesten beim Sprechen verwendet, haben sie entweder die Funktion das Gesagte zu untermauern, *„often giving clues to the underlying thematic organization of the discourse or the speaker’s perspective on events“* oder zu ergänzen: *„to identify underlying reasoning processes that the speaker did not or could not articulate.“* (Cassell, 1998:192).

McNeill (1992) unterscheidet außerdem metaphorische, deiktische und rhythmische Gesten. Erstere drücken ikonisch eine Sache aus, die aber metaphorisch zu verstehen ist, zB. mittels der zuvor beschriebenen Geste eine Größenangabe zu machen, um die Wichtigkeit eines Gegenstands zu verdeutlichen. Deiktische, also Zeigegesten, können sich auf ein konkretes, im Raum befindliches oder auf ein abstraktes, in der Vorstellungswelt der Gesprächsteilnehmer existierendes Objekt beziehen, wobei letzteres durch eine konkrete Richtung oder einen Gegenstand repräsentiert sein muss (zB. eine Tür für „draußen“). Rhythmische Gesten hingegen besitzen keine offensichtliche, inhaltliche Funktion, sondern begleiten vielmehr Rhythmus oder Intonation des Gesprochenen und werden auch verwendet, wenn sie gar nicht gesehen werden können (zB. am Telefon).

Die Zuteilung zu einer der erwähnten Funktionen ist aber selten eindeutig, da sie

ineinander verlaufen. Es erscheint daher geeigneter, Gesten an zwei kontinuierlichen Skalen zu messen: eine für Konkretheit, die andere für Bewusstheit. Eine Geste kann sehr bewusst gesetzt sein, um Gesagtes gezielt zu unterstreichen, dabei aber sich auf konkrete (ikonisch oder deiktisch) bis abstrakte Sachverhalte (metaphorisch oder deiktisch) beziehen. Eine konkrete Geste kann aber umgekehrt auch unbewusst verwendet werden, insbesondere wenn Emotionen im Spiel sind.

Wie Sprache umfasst Gestik also neben ikonischen Zeichen auch arbiträre und durch Konvention entstandene Symbole, die sich auf konkrete und abstrakte Dinge beziehen können, und es gibt idiomatische Unterschiede im Gebrauch zwischen Individuen und Populationen. Wann und wieviel gestikuliert wird, ist nämlich letztlich von der einzelnen Person, der einzelnen Gesprächssituation und der einzelnen Kultur abhängig. Gestik ist daher ein in seiner Spezifität ähnlich ausgeprägtes System wie die gesprochene Sprache, wenn nicht sogar Teil desselben Systems.

Perzeption

Aber warum gestikulieren Sprecher aller Sprachen, wenn sie sprechen? Welche Bedeutung haben Gesten für das Sprechen? Dazu muss genauer beleuchtet werden, wie das Sprechen und das Gestikulieren zusammen gebraucht werden und in weiterer Folge was sie für das Verständnis des Gesagten nicht nur aufseiten des Hörers sondern auch des Sprechers leisten.

Kelly u. a. (2010) betrachten die beiden Modalitäten von Sprache wie die beiden Seiten einer Münze, „*that is, they together constitute language*” (Kelly u. a., 2010:261). Ihre Hypothese lautet daher, dass Sprechen und Gestikulieren einander beeinflussen. Was und wie man spricht, hängt demnach davon ab, welche Gesten man dazu *macht*, und umgekehrt. Was und wie man etwas versteht, hängt wiederum davon ab, welche Gesten man dazu *sieht*, und umgekehrt. In ihrem Priming-Experiment sollte letzteres untermauert werden, also dass das Verständnis sowohl von Sprache als auch von Gestik abhängt.

Dazu zeigten sie Probanden zuerst ein kurzes Video, das eine bestimmte Handlung darstellte (zB. das Zerhacken von Gemüse). Darauf folgte ein ebenso kurzes Video, auf dem eine Geste zu sehen und ein Wort zu hören war. In einer Gruppe von Videos stimmte die Geste mit der Handlung überein, während das Wort zur Handlung entweder ebenfalls passte (zB. engl. „chop”), nur semantisch ähnlich war (zB. „cut”) oder nicht passte (zB. „twist”). In der zweiten Gruppe von Stimuli war das Wort kongruent zur Handlung und die dargestellte Geste variierte zwischen passend, ähnlich und unpassend. Die Probanden hatten sodann per Knopfdruck zu

entscheiden, ob das zweite Video irgendetwas mit dem ersten zu tun hatte.

Entsprechend der Hypothese traf eine Versuchsperson ihre Entscheidung öfter falsch, wenn entweder Geste *oder* Wort nicht mit der Handlung übereinstimmten als wenn beide zur Handlung passten. Die Fehleranzahl bei Stimuli mit semantisch ähnlichem/r Wort oder Geste lag dabei außerdem deutlich über den entsprechenden Werten bei Stimuli mit einer unpassenden Modalität. Zwischen den Modalitäten, dh. ob die Geste oder das Wort von der Handlung abwich, gab es keine signifikanten Unterschiede in der Entscheidungsrichtigkeit.

Diese Ergebnisse bestärken die Annahme, dass sich die Verarbeitungsprozesse von Sprache und Gestik gegenseitig gleichermaßen auf semantischer Ebene beeinflussen. In einem Folgeexperiment konnten Kelly u. a. (2010) außerdem zeigen, dass diese modale Kopplung auch hält, wenn die Probanden nur Videos aus der zweiten Gruppe (Wort stets passend, Geste ähnlich oder unpassend) nach dem ersten Video mit der Handlung zu sehen bekamen und sie zuvor angewiesen wurden zu entscheiden, ob das *Wort* mit der Handlung zu tun hatte. Auch hier beeinflussten ähnliche und unpassende Gesten die Korrektheit ihrer Entscheidung, obwohl die Probanden diese aufgrund der Anweisung ignorieren mussten.

Daraus folgt, dass man als Adressat einer Äußerung nie nur den sprachlichen Teil wahrnimmt, sondern ebenso den gestischen einbezieht. Gesten sind dabei für die Sprachperzeption wichtig, weil sie integraler Bestandteil der Äußerung sind. Dieselbe modale Kopplung besteht auch aufseiten der Sprachproduktion wie folgende Studie nahelegt.

Produktion

Sprecher gestikulieren nicht nur zum besseren Verständnis des Hörers. Vieles deutet darauf hin, dass Gesten auch dem Sprecher helfen sich auszudrücken, insbesondere wenn der Inhalt der Äußerung einen räumlich darstellbaren Sachverhalt beschreibt.

Morsella und Krauss (2004) führen dazu eine Studie vor dem Hintergrund ihres „*gestural feedback models*“ durch. Dieses Modell sieht vor, dass die motorischen Prozesse, die beim sprachbegleitenden Gestikulieren im Gehirn oder den Muskeln auftreten, Vorgänge der Sprachverarbeitung unterstützen. Dabei gehen sie davon aus, dass diese Prozesse im Sinne einer körperbasierten Semantik teilweise die Bedeutung eines sprachlichen Ausdrucks repräsentieren. Die Gesten rekrutieren sich daher aus dem Bewegungsrepertoire des Sprechers, das sich aus dem Umgang mit seiner Umwelt entwickelt hat.

„Using gestures this way is helpful because purposefully activated

mental representations tend to be transient, and the process of activating them is effortful. As a result, it is difficult to hold them in mind for the lengthy intervals that often occur in lexical search (e.g., in a tip-of-the-tongue state).” (Morsella und Krauss, 2004:413)

Die durch Gesten bedingte motorische Aktivierung fungiert daher als zusätzlicher Speicher, in den mentale Repräsentationen „ausgelagert“ werden können, wodurch andere Ressourcen frei werden, die für die Sprachverarbeitung benötigt werden.

Um diese Hypothese zu testen, führten Morsella und Krauss (2004) ein Experiment durch, in dem die Probanden verschiedene abgebildete Objekte beschreiben sollten (ohne den Namen des Objekts zu nennen), während sie dabei auf Video aufgezeichnet wurden. Ihre Anweisung lautete, dies für eine andere Person zu tun, die die Aufnahme später zu sehen bekommen würde und ausgrunddessen das beschriebene Bild wiedererkennen sollte. Denn dadurch sollten die Versuchspersonen veranlasst werden, ihre Beschreibung möglichst natürlich zu gestalten, da man ihnen – um kontrollierbare Laborbedingungen zu schaffen – keinen tatsächlich anwesenden Zuhörer gegenüber setzen durfte.

Die Probanden waren anhand zweier unabhängiger Variablen gruppiert. Die eine bestimmte, ob sie Arme und Hände bewegen durften oder nicht¹, die andere ob sie den Stimulus während der Beschreibung sehen durften oder ob er zuvor nur kurz (10 Sek.) präsentiert wurde. Dadurch sollte einerseits gezeigt werden, ob sich unterschiedliche Anforderungen an das Gedächtnis auf die Gestik auswirken, und andererseits, in bezug auf die Bewegungseinschränkung, die Hypothese getestet werden, *„that restriction will have a deleterious effect on the description task regardless of whether the visual object is present or absent.“* (Morsella und Krauss, 2004:414).

Die Objekte bestanden aus zwei Gruppen. Die eine enthielt Dinge, für die es eine sprachliche Bezeichnung gab (zB. eine Blume), während die andere sprachlich nicht kodifizierte Darstellungen repräsentierte, welche außerdem unterschiedlich komplex waren (siehe Abb. 3.2). Für letztere Gruppe erwarteten die Autoren mehr Gesten als für die erstere.

Anhand der Videoaufnahmen maßen Morsella und Krauss (2004) die Summe der Zeitspannen, in denen in irgendeiner Form Gesten verwendet wurden, und setzten sie ins Verhältnis zur Gesamtdauer der Objektbeschreibung. Dadurch schätzten sie quantitativ ab, wieviel ein Proband gestikulierte. Qualitativ unterschieden die

¹Man befestigte dieser Gruppe auf den Unterarmen falsche Elektroden mit der Erklärung, dass die Messung bestimmter medizinischer Werte nicht durch Bewegung dieser Gliedmaßen gestört werden dürfe.

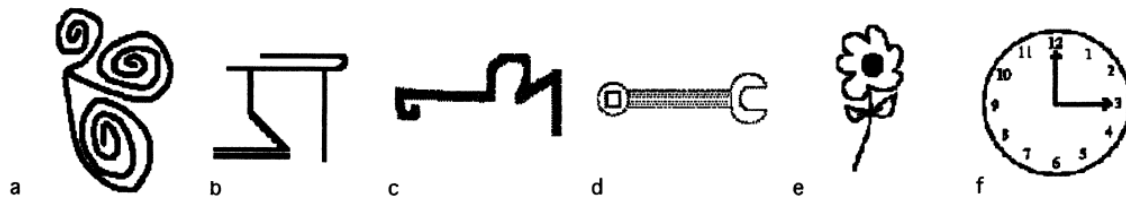


Abbildung 3.2: Beispiele für Abbildungen von nicht kodifizierten (a–c) und kodifizierten (d–f) Objekten (Bild nach Morsella und Krauss, 2004:415).

Autoren nach rhythmischen und nicht rhythmischen Gesten. Darüber hinaus quantifizierten sie die Sprache in Silben pro Sekunde.

„[...] we found that speakers gesture more when describing visual objects from memory than when the objects are visually accessible. We also found that speakers gesture more when describing objects that tax spatial working memory, such as drawings that are difficult to remember and encode verbally.” (Morsella und Krauss, 2004:420)

Das heißt, dass Gesten helfen, eine „vor-sprachliche“ Vorstellung zu begreifen und sie für die Verarbeitung in Sprache bereitzuhalten. Aus diesem Schluss heraus erklären sich die Autoren auch, warum Probanden langsamer sprachen, wenn sie am Gestikulieren gehindert waren. Insbesondere beim Beschreiben sichtbarer Stimuli produzierten sie hier signifikant weniger Silben pro Sekunde. Gesten müssen daher auch auf die produktive Seite der Sprachverarbeitung einwirken.

Dafür sprechen auch Befunde von Iverson und Goldin-Meadow (1998). Sie stellten fest, dass selbst von Geburt an blinde Kinder gestikulieren: *„We found that all 12 blind speakers gestured as they spoke, at a rate not reliably different from the sighted group, and conveyed the same information using the same range of gesture forms.”* (Iverson und Goldin-Meadow, 1998:228). Wenn die Kinder mit einer anderen blinden Person sprachen und auch von deren Blindheit wussten, gebrauchten sie dabei dennoch nahezu dieselbe Gestik. Dies untermauert nicht nur die Hypothese, dass Gesten integraler Bestandteil von Sprache sind und nicht alleine der Kommunikation dienen, sondern wirft auch ein besonderes Licht auf die Frage, wie sich Gestik bei Kindern entwickelt, was mitunter im Kapitel 3.2 behandelt wird.

Gestik bei nicht menschlichen Primaten

Für die phylogenetische Perspektive hinsichtlich der menschlichen Gestik ist der Blick auf entsprechende Phänomene bei den nächsten Artverwandten des Menschen

lehrreich. Studien dazu gibt es mit Gorillas, Schimpansen und Bonobos und die meisten stammen von der Gruppe um Michael Tomasello.

Ähnlich wie bei der Entwicklung von imperativen Zeigegesten bei Kindern, findet zwischen zwei Affen eine „ontogenetische Ritualisierung“ einer bestimmten Handlung statt, woraus eine pseudo-kommunikative Geste entsteht. Pika u. a. (2007) stellen diesen Prozess wie folgt dar:

1. Zwei Affen interagieren miteinander, dh. der erste tut etwas, worauf der zweite mit einer anderen Handlung reagiert, zB. ein Junges versucht auf den Rücken der Mutter zu klettern, die Mutter bückt sich.
2. Der zweite reagiert dabei schon, während der erste zur Handlung ansetzt.
3. Der erste lernt dadurch, dass nur die Andeutung der Handlung ausreicht, um die gewünschte Handlung beim anderen auszulösen. ZB. das Junge berührt bloß den Rücken der Mutter, anstatt ihn zu besteigen, was die Mutter veranlasst sich zu bücken.

Diese Andeutung wird im Kontext der Kommunikation der nicht menschlichen Primaten als Geste verstanden, so wie imperative Zeigegesten bei Kindern als ange-deutete Greifhandlungen zu verstehen sind: „[...] a behaviour that was not at first a communicative signal becomes one by virtue of the anticipations of the interactants over time.“ (Pika u. a., 2007:40). Die Autoren fanden neben Gesten, die in der Berührung des Artgenossen bestanden, auch visuelle und auditive. Letztere schienen vor allem dazu zu dienen, Aufmerksamkeit zu erregen, um anschließend, nachdem der Adressat sich zugewandt hatte, eine visuelle Gesten zeigen zu können.

Zu wissen, ob der andere die Geste sehen kann oder nicht, und auf Basis dessen Maßnahmen zu setzen, um die Aufmerksamkeit des anderen zu erlangen, ist eine wesentliche Voraussetzung für das Gelingen von gerichteter Kommunikation und unterscheidet sie von ungerichteten, spontanen Signalen wie Alarmschreien. Ein weiteres Indiz für kommunikatives Verhalten beim Affen ist die Flexibilität der Gesten gegenüber des Verwendungskontexts.

„For example, a chimpanzee stretching out an open hand toward a third party during a fight signals a need for support, whereas the same gesture toward a possessor of food signals a desire for a share.“ (Pollick und de Waal, 2007:8184)

Während diese Kommunikationsform durchwegs dyadisch, dh. nur aus einem Sender und einem Empfänger, ohne Referenz auf etwas Drittes, aufgebaut ist, meinen Pika und Mitani (2006) an in der Wildnis lebenden Schimpansen auch triadische

Formen beobachtet zu haben, die neben Sender und Empfänger einen Referenzpunkt involvieren. Ein Affe, der von einem anderen gelaust wurde, schien diesem mittels Kratzbewegungen anzuzeigen, an welcher Stelle er „bearbeitet“ werden wollte. Immerhin in 60% der Fälle reagierte der andere Affe darauf. Außerdem trat diese Geste signifikant öfter zwischen zwei Schimpansen auf, die beide in der Rangordnung an hoher Stelle standen, und seltener bei anderen paarweisen Kombinationen.

Trotzdem hier der eine Affe dem anderen eine „Aussage“ über etwas Drittes zu machen scheint („Laus mich hier!“), was beim Menschen ja in Form von deiktischer Gesten getan wird und eine wichtige Eigenschaft von symbolhafter, referentieller Kommunikation ist, muss diese Beobachtung im Wesentlichen als eine imperative Geste klassifiziert werden, die im Kontext der Fellpflege auftritt. Ansonsten sind pseudo-deklarative Zeigegesten bei nicht menschlichen Primaten nur anzutreffen, wenn ihnen diese von Menschen beigebracht wurden.

Neben ihrer Beschränkung auf eine dyadische Form unterscheiden die tierischen von den menschlichen Gesten außerdem, dass sie kaum von anderen Artgenossen direkt gelernt werden, sondern von jedem Individuum selbst neu erfunden und innerhalb einer Gruppe ontogenetisch ritualisiert werden. Bis jetzt konnte an Affen auch keine symbolische oder ikonische genuine Verwendung von Gesten festgestellt werden. Die Gestik beim Affen geht also nicht über ihre handlungsbezogenen Rituale hinaus und bleibt durchwegs imperativ, mit dem bloßen Ziel, Zustände der Außenwelt mitsamt anderen Individuen zu verändern. Sie könnte aber eine wichtige Zwischenstufe in der Sprachevolution darstellen, die im Kapitel 3.3 genauer behandelt wird.

3.1.3 Integration von Gestik und Sprache

Wenn Gestik und Sprache Teil eines gemeinsamen Systems sind, sollte diese Assoziation auch auf neuronaler Ebene zu Tage treten. Das Broca-Areal ist in den Studien der Gruppe um Paul Hagoort (Hagoort, 2005; Hagoort und Levelt, 2009; Snijders u. a., 2009) in seiner Funktion der Unification untersucht worden, die sich nun auch in der Frage, wo und wie Gestik und Sprache integriert werden, aufdrängt.

Diese Funktion wird vom Broca-Areal wie im Kapitel 2.1.1 dargestellt auf mehreren Sprachebenen erfüllt: Phonologie, Semantik und Syntax. Auch Gestik ist in allen dreien repräsentiert: phonologisch durch rhythmische, semantisch durch ikonische/metaphorische Gesten und syntaktisch dadurch, dass Gesten zusammengesetzt werden können. Unification dürfte aber nicht nur innerhalb von Sprache und Gestik stattfinden sondern auch zwischen den Domänen, indem die beiden Modalitäten

integriert werden. Das macht das Broca-Areal zum wahrscheinlichsten Ort eines gemeinsamen, integralen Systems.

Die entsprechende neuronale Aktivität wurde unter anderen von Willems u. a. (2009) mittels FMRT untersucht. Dieser Studie waren bereits einige andere vorangegangen, die zwar zwei bestimmten kortikalen Bereichen – dem Gyrus frontalis inferior (Broca-Areal) und Sulcus temporalis superior posterior (STSp) – entsprechende Aktivierungen für beide Modalitäten zuschreiben, aber jeweils zu unterschiedlichen Ergebnissen kamen, was die genaue funktionale Rollenaufteilung in der Verarbeitung von Sprache mit Gesten betraf.

Das experimentelle Paradigma war bei diesen Studien wie auch bei Kelly u. a. (2010) weitgehend ähnlich: Die Stimuli waren Videos von Personen, die eine sprachliche Äußerung und dazu Gesten tätigten, wobei als veränderlicher Parameter die semantische Kongruenz zwischen Aussage und Geste diente (passend vs. unpassend). Bei Willems u. a. (2009) wurden die Gesten außerdem nach ihrer Ikonizität unterschieden: Ein Set von Gesten bestand hauptsächlich aus pantomimischen Bewegungen, die die sprachliche Äußerung exakt darstellten, das andere Set enthielt typische, sprachbegleitende Gesten, deren Inhalt ohne die sprachliche Modalität nicht verstanden werden konnte. Neben Stimuli mit passenden und unpassenden Paaren der beiden Modalitäten wurden den Versuchspersonen auch unimodale, dh. entweder nur die sprachliche oder nur die gestische Form des Stimulus präsentiert.

Sowohl der STSp als auch das Broca-Areal reagierten auf unimodale Stimuli in beiden Modalitäten, aber was die bimodalen Stimuli betrifft, war der STSp nur bei unpassender Pantomime signifikant stärker als bei passender aktiviert, das Broca-Areal hingegen leuchtete sowohl bei unpassender Pantomime als auch bei unpassender Geste stärker auf als bei der jeweils passenden Bewegung. Das heißt, dass insbesondere in diesem Areal Sprache und Gestik gemeinsam semantisch verarbeitet werden.

Aber noch in einem anderen Aspekt sind Hand und Mund neuronal gekoppelt. Denn schon bald nach der Entdeckung der Spiegelneuronen hat man im Areal F5 des Makaken auch Neuronen gefunden, die an Hand- *und* Mundbewegungen beteiligt sind. Diese haben Maurizio Gentilucci aus der Gruppe um Giacomo Rizzolatti veranlasst, Verhaltensstudien am Menschen durchzuführen, die diese bimodale Gemeinsamkeit widerspiegeln. Die jüngste stammt von Gentilucci u. a. (2009).

Hier sollten Probanden per Video vorgespielte Greifbewegungen einer Hand beobachten, die entweder nach einem faustgroßen oder einem mit Zeigefinger und Daumen fassbaren Objekt griff. Mittels TMS bewirkt und mittels EMG gemessen stellte man fest, dass die an den vorgespielten Handlungen beteiligten Muskelpartien – wie

erwartet – auch bei der Versuchsperson erregt wurden. Die Hypothese lautete nun, dass hier Spiegelneuronen wirken, die neben Handlungen mit der Hand auch an solchen mit dem Mund beteiligt sind. Um dies zu testen, ließ man die Probanden während der Beobachtung der Videos die Silbe „da“ sagen. Es stellte sich dabei heraus, dass der erste Formant² im Frequenzspektrum des Vokals höher lag, wenn die Person die Greifbewegung nach dem größeren Gegenstand beobachtete. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Person dabei das [a] etwas offener artikulierte und folglich hier Größe der Greifbewegung und Größe der Mundöffnung korrelierten.

Derselbe Effekt wurde schon zuvor von Gentilucci u. a. (2001) gezeigt, wenn Probanden die Bewegungen selbst ausführten anstatt sie zu beobachten. Zum einen mussten sie nach unterschiedlich großen Objekten greifen und dabei den Mund öffnen, zum anderen mussten sie die Objekte mit dem Mund aufnehmen und dabei die rechte Hand öffnen. Auch hier korrelierte die Größe des Objekts damit, wie weit der Körperteil geöffnet wurde, und dies nur, wenn sowohl Hand als auch Mund gleichzeitig beteiligt waren.

Solche neurologischen und psychologischen Beobachtungen nähren die Annahme, dass Sprache und Gestik mittels Spiegelneuronen integrierte Systeme sind. Es gibt aber auch Hinweise, dass in der Sprachperzeption nicht nur Handgesten semantisch integriert werden, sondern auch die Bewegungen der Artikulatoren.

Ein Indiz hierfür ist die Reine Worttaubheit³, bei der die auditive Verarbeitung von Sprache, nicht jedoch von anderen hörbaren Reizen gestört ist. Die Patienten sind daher „worttaub“. Ihr Sprachverständnis ist aber besser, wenn sie die Artikulation des Gesagten sehen, dh. die Bewegungen der Artikulatoren wie Lippen, Zunge und Kehlkopf zur Dekodierung des Lautstroms heranziehen können. Dies tun sie unbewusst und nicht etwa, weil sie aufgrund ihrer Krankheit Lippenlesen gelernt hätten.

Ein anderes Beispiel ist der McGurk-Effekt (McGurk und MacDonald, 1976): Die Silbe „ba“ wird als „da“ wahrgenommen, wenn die dazu sichtbare Mundbewegung „ga“ artikuliert. Die Zusammenführung eines auditiven mit einem visuellen Stimulus ergibt somit die Wahrnehmung eines dritten Stimulus, der Elemente von beiden enthält. Auf Basis dieser Phänomene stellt die „Motor Theory of Speech Perception“ von Liberman und Mattingly (1985) die Behauptung auf, *„that phonetic perception*

²In der Phonetik werden die für einen Vokal charakteristischen Frequenzen als Formanten bezeichnet. Dabei entspricht die Höhe des ersten Formanten (F1) indirekt proportional der Höhe eines Vokals, dh. die Höhe der Zunge im Mundraum. So tritt beim [i] ein niedriger, beim [a] ein höherer F1 auf.

³siehe <http://www.ims.uni-stuttgart.de/phonetik/joerg/sgtutorial/worttaubheit.html>, Zugriff: 3.3.2011

is perception of gesture.” (Liberman und Mattingly, 1985:21).

Die Theorie entstand aus der fundamentalen Frage heraus, wie es möglich ist, eine sprachliche Äußerung trotz sprecher- und kontextspezifischer (Stör-)Variablen in ihre einzelnen Phoneme zerlegen und folglich verstehen zu können. Anstatt eines eigenen Moduls für Perzeption, das den auditiven Stimulus nach rein akustischen Anhaltspunkten analysiert und so den diskreten „Phonemcode“ aus dem kontinuierlichen phonetischen Fluss extrahiert, nehmen Liberman und Mattingly (1985) einen einzigen Mechanismus an, über den nicht nur die Sprachperzeption sondern auch die Produktion läuft. Denn sowohl die Kodierung einer Phonemkette in einen Sprachfluss als auch die Dekodierung eines Flusses in einzelne Phoneme brauchen jeweils eine zentrale Repräsentation von Phonemen und ihren Verbindungen. Da aufseiten der Sprachproduktion ein solches Vokabular von „phonetischen Gesten“ durch diskrete Stellungen der Artikulatoren eindeutig definiert sein muss, sehen sie dieses als das zentrale Modul an, das auch zur Sprachperzeption herangezogen wird.

„[...] the candidate signal descriptions are computed by an analogue of the production process – an internal, innately specified vocal-tract synthesizer – that incorporates complete information about the anatomical and physiological characteristics of the vocal tract and also about the articulatory and acoustic consequences of linguistically significant gestures.” (Liberman und Mattingly, 1985:26).

Mit dem erwähnten „vocal-tract synthesizer“ als der Verbindung von Produktion und Perzeption nahmen Liberman und Mattingly (1985) bereits wesentliche Eigenschaften der wenig später entdeckten Spiegelneuronen vorweg: Ganzheitliche, synthetische Kodierung von Handlungen in beiden Verarbeitungsrichtungen.

3.2 Erstspracherwerb

Wie bis jetzt gezeigt werden konnte, kann Sprache nicht unabhängig von Gestik betrachtet werden. Unter dieser Prämisse befasst sich das folgende Kapitel mit dem Erstspracherwerb und welche theoretische Rolle man auch aus dem Vorangegangenen für Spiegelneuronen ableiten kann. Dazu ist es zunächst wichtig anzusehen, wann und wie Kinder beginnen, einerseits Gesten kommunikativ einsetzen und andererseits kommunikative Gesten anderer zu verstehen.

3.2.1 Kommunikatives Verhalten

Grundlage für Kommunikation zwischen zwei Individuen ist, dass sie ihre Aufmerksamkeit auf einen gemeinsamen Fokus legen. Die Blickrichtung eines Babys ist das offensichtliche und direkt messbare Merkmal für seinen momentanen Aufmerksamkeitsfokus. Darauf konzentrieren sich Untersuchungen zur Entwicklung kommunikativen Verhaltens beim Neugeborenen.

Gredebäck u. a. (2010) beobachteten in einer Langzeitstudie mit Kindern im Alter von zwei bis acht Monaten, wann sie beginnen, dem Blick einer anderen Person zu folgen, dh. Aufmerksamkeit zu teilen, und wie sich dieses Verhalten über die Zeit entwickelt. Eine Person saß dazu dem Kind gegenüber, vor ihr auf einem Tisch links und rechts zwei Spielzeuge. Zuerst lenkte sie die Aufmerksamkeit des Kindes auf sich selbst und wandte dann den Kopf einem der beiden Gegenstände zu. Währenddessen wurde die Blickrichtung des Kindes mittels Okulographie (Eye-Tracking) gemessen. Die Person war in einem Versuch die Mutter des Kindes selbst, im anderen eine dem Kind fremde Person.

Hierbei stellte sich heraus, dass die Kinder mit zunehmendem Alter ab ca. drei Monaten auch häufiger dem Blick der Person folgten, wobei die fremde Person gegenüber der Mutter diesen Effekt signifikant verstärkte. Es kann daher nicht sein, dass das Kind in der alltäglichen Interaktion mit der Mutter gelernt habe, in ihrer Blickrichtung etwas Interessantes vorzufinden, denn sonst müsste es mehr ihrem als dem fremden Blick folgen. Stattdessen scheint das Kind die Blickrichtung in einem kommunikativen Sinne aufzufassen und schlichtweg seine Aufmerksamkeit auf den Aufmerksamkeitsfokus des anderen zu richten.

Neben der Sensibilität für direkten Blickkontakt und für sogenannte Ammensprache, die sich durch ein spezifisches Intonationsmuster in der Interaktion mit dem Kind ausdrückt, ist für Csibra (2010) auch die Sensibilität für Kontingenz angeboren. Diese entsteht hier, in der Kommunikation, erstens, wenn eine Person eine Aktion setzt, um die Aufmerksamkeit des Kindes zu erregen, und das Kind darauf reagiert, und zweitens, wenn auf die Reaktion des Kindes wieder eine Aktion vom Gegenüber folgt, nämlich Änderung der Blickrichtung. Csibra (2010) führt Studien an, die solche Kontingenz auch im Saugverhalten neugeborener Babys feststellten. Daher seien Menschen von Anfang an prädisponiert zu kommunizieren:

„[...] recognizing communicative intentions (in the sense of noticing their presence rather than of accessing their content) is not the outcome but one of the sources of the development of communicative skills. In order to launch this development, some of the signals that code for

ostension should be innately specified.” (Csibra, 2010:144)

Die früheste Form eines aktiven kommunikativen, dh. kontingenten, Verhaltens ist die deklarative Zeigegeste. Kinder ab dem Alter von zwölf Monaten verwenden sie, um erstens die Aufmerksamkeit der anderen Person auf einen Gegenstand zu lenken und zweitens um bei dieser eine Reaktion auszulösen. In zwei Studien, die Liszkowski (2007) anführt, hörten die Kinder erst auf zu zeigen, wenn die zweite anwesende Person beide kommunikativen Bedingungen erfüllt hatte: zum einen sich dem referenzierten Gegenstand oder Geschehnis zuzuwenden und zum anderen in irgendeiner Form zu reagieren. Eine emotionale Reaktion schien die Kinder dabei mehr zu befriedigen als eine neutrale, die lediglich ausdrückte, dass das Interesse des Kindes an dem angezeigten Ding zur Kenntnis genommen wurde.

„Motivationally then, pointing at 12 months already is an inherently social communicative act, intended for both sender and recipient, and not a solitary, self-centered activity of the infant.” (Liszkowski, 2007:133)

3.2.2 Gestik und Sprache

Colonnesi u. a. (in Druck) analysierten anhand einer Vielzahl von Studien zum Thema, ob und wie die Entwicklung von Zeigegesten mit der Entwicklung von Sprache zusammenhängt. *„If a longitudinal relation exists between the pointing gesture and the later use of language this would suggest that these two abilities share the same communicative and socio-cognitive system.”* (Colonnesi u. a.:5). Ihre Schlüsse ziehen die Autoren aus den Erkenntnissen von 25 Studien an insgesamt 734 Kindern, die jeweils untersuchten, wie sich die Produktion und Perzeption von Zeigegesten und Sprache und die Beziehung zwischen den beiden Modalitäten entwickelt.

Colonnesi u. a. fanden einen signifikanten Zusammenhang zwischen Zeigegestik und Sprache sowohl im konkreten Gebrauch als auch in der langzeitlichen Entwicklung. Das heißt einerseits, dass Kinder Zeigegesten zusammen mit sprachlichen Äußerungen verwenden, andererseits, dass das longitudinale Auftreten der Gesten mit dem Auftreten von Sprache zusammenfällt bzw. die Gestik des Kindes auf seine spätere Sprachentwicklung schließen lässt. Eine der analysierten Studien stellte zB. folgendes fest:

„At the lexical level, items found initially in children’s gestural repertoires subsequently appeared in their verbal lexicons. At the sentence level, the onset of gesture-plus-word combinations conveying two elements

of a proposition predicted with great precision the onset of two-word combinations.” (Iverson und Goldin-Meadow, 2005:370)

Dieser Zusammenhang besteht nur bei deklarativen, nicht jedoch bei imperativen Zeigegesten, und dies nicht nur in der Produktion sondern auch in der Perzeption. Es äußert sich folglich auch im Erstspracherwerb, dass Gebrauch und Verständnis von Gesten und Sprache integrale Bestandteile eines kognitiven Systems sind, die in der Entwicklung dieses Systems nahezu gleichermaßen zum Vorschein gebracht werden.

Ikonische und symbolische Gesten treten ebenfalls auf, aber wesentlich seltener als deiktische (Pizzuto u. a., 2005). Capirci u. a. (2007) hielten in ihrer Langzeitstudie an Kindern zwischen zehn und 23 Monaten den Verlauf fest, den die Entstehung eines Symbols als Geste oder als Wort nahm. Dabei stellte sich heraus, dass einer ikonischen Geste, wie die Hände zum Mund zu führen und dem italienischen Wort „Pappa” (Essen), eine entsprechende Handlung, zB. Essen mit einem Löffel, voranging und sich die jeweiligen Bewegungsabläufe über weite Strecken glichen. *„The meanings shared through the goal directed action were almost all expressed later in a symbolic way with gestures and words.”* (Capirci u. a., 2007:156).

Der Grund für die Verwendung von deiktischen und ikonischen Gesten in der Sprachentwicklung mag derselbe wie für die Verwendung von Gesten überhaupt sein (siehe Kapitel 3.1.2 und die Studie von Morsella und Krauss, 2004). Sie ermöglichen dem Kind einen direkteren Zugang zur Bedeutung einer Aussage ohne ein arbiträres, sprachliches Zeichen gebrauchen zu müssen, *„because a conventional sign puts more strain on memory than a gesture whose form is not conventionalized but constructed on the spot on an ad hoc basis”* (Goldin-Meadow und Özçalışkan, 2005:111). Letzteres birgt für das Kind obendrein höhere Anforderungen an die feinmotorische Bewegungssteuerung der Sprechorgane (Acredolo und Goodwyn, 1998:62).

Daher verwendet das Kind Gesten nicht nur zur Kommunikation mit anderen sondern auch für sich selbst. Hierfür spricht nicht nur jene Studie über Kinder, die blind zur Welt kamen und dennoch gestikulierten (Iverson und Goldin-Meadow, 1998). Laut Rodríguez (2009) haben Gesten für Kinder auch eine selbstregulative Funktion, indem sie ihnen beim Nachzudenken helfen: *„these private gestures [...] are tools used by the child to think about a situation”* (Rodríguez, 2009:299). Beispielsweise erwähnt die Autorin den Fall eines 18 Monate alten Kindes, das sich mit einem Spiel beschäftigte, bei dem Ringe auf einen hölzernen Pfahl gesteckt werden konnten. Während das Kind nun einen Ring in der Hand hielt, zeigte es mehrmals auf den Pfahl, ehe es den Ring auf ihm platzierte. Die ganze Zeit haftete sein Blick

dabei auf dem Zielobjekt und wechselte nie zu einer anderen anwesenden Person. Das Kind wollte durch seine Zeigegeste nicht kommunizieren, sondern – so schien es – sich selbst einen Sachverhalt klar machen.

Fraglich bleibt, warum Kinder neben Gesten auch Sprache benutzen, wo erstere doch ein ausreichendes Kommunikationsmedium darstellen, und warum sie auf so ein abstraktes Zeichensystem wie die gesprochene Sprache umsteigen bzw. im Laufe der Zeit immer stärker präferieren. Aus Sicht dieser Arbeit dürfte dieser Wandel durch die in Kapitel 3.1.3 beschriebene Kopplung von Hand- und Mundbewegungen motiviert sein. Aber die Studie von Petitto u. a. (2004) liefert dazu weitere Ansätze.

Sie hatte die Entwicklung der Lallphase von sechs Babys im Alter von sechs, zehn und zwölf Monaten zum Gegenstand. Drei von ihnen stammten von gehörlosen Eltern, was Petitto u. a. (2004) die Gelegenheit gab, die Lautproduktion bei Babys zu untersuchen, die zwar hören konnten, aber keine auditiven Sprachstimuli erhielten. Ihr einziger sprachlicher Input war die Gebärdensprache der Eltern. Die anderen drei wuchsen unter typischen Umständen auf, dh. ihre Eltern kommunizierten über eine Lautsprache.

An diesen beiden Gruppen konnten Petitto u. a. (2004) testen, wie sich die Lallphase jeweils unterscheidet, ob sie etwas spezifisch Vokales ist oder ob ihr eine *„more central and specific sensitivity to specific patterns in the input that correspond to aspects of the patterning of natural language“* (Petitto u. a., 2004:50) zugrundeliegt. Dazu quantisierten sie die Bewegungen der Babys mittels eines speziellen Geräts, das die Position von Händen und Armen aufzeichnete.

Die Lallphase ist durch ein oftmaliges Wiederholen einer bestimmten Silbe definiert, die der spezifischen phonologischen Silbenstruktur einer Sprache entspricht, zB. „ba-ba-ba-...“. Ähnlich oszillieren auch die Bewegungen der Extremitäten des Säuglings. Da Petitto u. a. (2004) die genauen Bewegungsdaten ihrer Probanden erfasst hatten, konnten sie die Wiederholungsfrequenzen bestimmter Bewegungssegmente feststellen und in einem Frequenzspektrogramm visualisieren.

Hierbei traten in beiden Gruppen Bewegungen auf, die mit einer Frequenz von ca. 3 Hz wiederholt wurden und Teil der allgemeinen Bewegungsentwicklung von Säuglingen sein dürften. Aber jene Gruppe der Babys, die mit Gebärdensprache aufwuchsen, wies zusätzlich im Frequenzband um 1 Hz Bewegungen auf, die die andere Gruppe nur in geringem Ausmaß ausführte. Die Autoren bezeichneten sie als „manuelles Lallen“, da die Kinder diese Bewegungen außerdem in einem Bereich vor dem Körper produzierten, der für jene Gebärdensprache typisch war und daher ein linguistisch motiviertes Spezifikum dieser Gruppe darstellte.

„[...] the human brain contains specialization to particular input patterns relevant to aspects of the structure of natural language that is linked to rudimentary motor programs to produce them – but that is not initially linked to a particular modality. If so, it follows that speech and manual movements in young babies are equipotential articulators [...]” (Petitto u. a., 2004:27)

Dass bei hörenden Kindern letztlich sich die auditive Sprachmodalität durchsetzt, dürfte demnach nicht an einer besonderen Eignung für Kommunikation oder an einer Dominanz gegenüber der manuellen, gestischen Modalität liegen, sondern schlichtweg an einer sozialen Umwelt, die überwiegend mit sprechenden Mitmenschen bevölkert ist. Wie hingegen die Entwicklung von Gebärden bei gehörlosen Kindern und von Gebärdensprache an sich aussieht, ist Gegenstand des nächsten Unterkapitels, bevor der Schluss folgt, in dem die Relevanz der Spiegelneuronen für den Erstspracherwerb bewertet wird.

3.2.3 Gebärdensprache

Kinder, die gehörlos zur Welt kommen, haben keine andere Möglichkeit, als über Gesten und Gebärden zu kommunizieren. Wenn die Eltern selbst keine Gebärdensprache nicht oder nur schlecht beherrschen und ihre Kinder nur von einer Lautsprache umgeben sind, die sie aber nicht wahrnehmen können, entwickeln sie, angetrieben von dem Wunsch sich mitteilen zu können, ein eigenes Gestensystem, das laut Goldin-Meadow u. a. (2007) ebenfalls Eigenschaften eines vollwertigen Sprachsystems aufweist.

Die Autoren berichten von gehörlosen amerikanischen und chinesischen Kindern, deren durchwegs ikonische Gesten sie auch als einzelne Morpheme verwenden und zu unterschiedlichen Worten zusammensetzen konnten. Die kulturellen Unterschiede waren dabei nicht größer als die zwischen einzelnen Kindern, was Goldin-Meadow u. a. (2007) darauf zurückführen, dass sie ihre Handzeichen nicht nur von den typischen sprachbegleitenden Gesten ihrer Mitmenschen übernahmen, sondern auch *„from their haptic knowledge of objects, a process that would also promote commonalities across the children’s gestures”* (Goldin-Meadow u. a., 2007), sich also eines universalen, körperbasierten Zugangs zu Kommunikationssymbolen bedienten.

Überdies produzierten die Kinder drei Klassen von Gesten, die auch in gängigen Gebärdensprachen unterschieden werden, aber dies ohne je mit einer solchen Sprache in Berührung gekommen zu sein:

- Gesten, die die Handhabung eines imaginären Objekts darstellen,
- konventionalisierte Gesten, die für ein bestimmtes Objekt oder eine Klasse von Objekten stehen,
- und Gesten, die die Größe und Form eines Objekts abbilden.

Es dürfte sich hierbei folglich um eine für Gebärdensprachen universelle Eigenschaft handeln, die sich aus der körperbasierten Erfahrungswelt des Kindes rekrutiert. Anhand ihrer Langzeitstudie konnten Goldin-Meadow u. a. (2007) auch beobachten, wie innerhalb jener Klassen einzelne Gesten über die Zeit allgemeinere Bedeutung erlangten. Zu Beginn gebrauchten die Kinder einzelne, komplexe Zeichen (zB. die Faust auf- und abbewegen) als Ganzes, um einen bestimmten Sachverhalt zu bezeichnen (zB. „auf eine Trommel schlagen“). Später löste sich die Faust von der Bewegung und die beiden Gesten konnten individuell, als Morpheme, verwendet werden. Die Autoren stellten fest, dass die Kinder diese Entwicklung selbst vollzogen und nicht etwa in irgendeiner Weise von den sprachbegleitenden Gesten der Eltern ableiteten: *„Children thus seem predisposed to impose word-level structure on their communications and will do so even when such structure is not modeled in their input.“* (Goldin-Meadow u. a., 2007:132).

3.2.4 Die Rolle der Spiegelneuronen

Oztop u. a. (2006) leiten die Entstehung von Spiegelneuronen beim Kleinkind aus seiner Entwicklung zielgerichteter Greifhandlungen ab. Dazu bieten sie einen modellhaften Ablauf an, den sie sowohl für Menschen als auch nicht menschliche Primaten annehmen:

1. Das Kind lernt seinen eigenen visuomotorischen Bewegungsrahmen kennen. Dabei hilft ihm die angeborene Tendenz, seine ungerichteten, mehr oder weniger zufälligen „Bewegungsübungen“ auf Objekte in seiner Nähe auszurichten.
2. Oztop u. a. (2006) nehmen weiters an, dass der Drang, Dinge zu ergreifen, von einer angeborenen Freude an der Berührung genährt wird. Indem das Kind die Form von Objekten kennenlernt und damit seine Greifbewegungen anzupassen lernt, vergrößert es diese Freude. Gleichzeitig lernt es zunehmend, die gefühlten Objekteigenschaften mit visuellen Stimuli zu verbinden.
3. Ab dem ersten Jahr internalisiert das Kind seine Greiferfahrungen und beginnt die Außenwelt in ihrer Greifbarkeit zu erfassen, dh. einen „Begriff“ von ihr zu

entwickeln oder „*an 'informed' visual system which can extract affordances, the features of objects that will guide their reach and grasp.*” (Oztop u. a., 2006:408). Auf physiologischer Ebene ist dieser Entwicklungsschritt durch kanonische Neuronen repräsentiert, die den bloßen Anblick eines Objekt mit der erforderlichen Greifhandlung verbinden.

4. Diese Begriffe kann das Kind in weiterer Folge auch mit fremden Handlungen verknüpfen. Hier verbindet sich der visuelle Eindruck der zielgerichteten Bewegung anderer Lebewesen mit der Aktivität kanonischer Neuronen, was zur Entwicklung von Spiegelneuronen führt. Eigene und fremde Handlung werden quasi durch ein gemeinsames Ziel assoziiert.

Die Frage ist nun, ob und wie aus diesen begrifflichen Repräsentationen von Interaktionsmöglichkeiten kommunikative und symbolhafte Sprach- und Handgesten werden. Wenn die hier geäußerte Annahme stimmt, dass Spiegelneuronen sich erst um den ersten Geburtstag herum entwickeln, nachdem das Kind gelernt hat, Objekteigenschaften nach Greifbewegungen zu „klassifizieren“, und Kommunikation hingegen ein tiefer verwurzeltes menschliches Phänomen darstellt (siehe Kapitel 3.2.1), können Spiegelneuronen und Greifbewegungen alleine nicht für die Entstehung von kommunikativen Gesten verantwortlich sein. Wäre dem so, müssten Affen fähig sein, deklarativ zu kommunizieren, dh. ein Sprachsystem entwickeln können.

Vielmehr sieht es nach einem Zusammenspiel der beiden Systeme aus. Das kommunikative System, das Kontingenz herstellt und Symbole für den zwischenmenschlichen Gedankenaustausch generiert, bedient sich der neuronalen Repräsentationen außenweltlicher Begrifflichkeiten, die von kanonischen Neuronen und Spiegelneuronen gehalten werden. Es nimmt das hier ganzheitlich gespeicherte Bewegungsprogramm einer bestimmten Greifhandlung für eine bestimmte Klasse von Objekten her und *verwandelt* es in eine symbolhafte Geste, die sodann *für* jene Objektklasse steht. Die menschliche Kommunikationsfähigkeit gebraucht sie dann in der Folge, um ihren Inhalt anderen mitzuteilen.

Um diesen Inhalt zu verstehen, benutzt das kommunikative System des Anderen ebenfalls Spiegelneuronen, diesmal aber in der Funktion, die Wahrnehmung einer Handlung wie die eigene zu repräsentieren. Spiegelneuronen selbst sind nicht Grundlage für das Verstehen, sondern besorgen lediglich die Vereinigung und Spiegelung eines fremden Bewegungsablaufs in einen ganzheitlichen Begriff, der in den körperlichen Erfahrungen verankert ist und dort in Resonanz tritt. Jedoch erst das kommunikative System gibt diesem Begriff „Sinn“. *„Würde nämlich solcherlei ausschließlich durch reine Körperresonanz transportiert werden, wäre eine bewusste,*

kommunikativ hergestellte Intersubjektivität überflüssig.” (Zaboura, 2009:118)

Die Rolle der Spiegelneuronen für den Erstspracherwerb dürfte daher in der Ausbildung einer subjektiven, körperbasierten Semantik zu verorten sein, deren internalisierte und unbewusste Begriffe erst durch das menschliche Kommunikationssystem in kommunizierbare Symbole verwandelt werden.

In diesem Lichte wird nun im letzten Abschnitt die Bedeutung der Spiegelneuronen für die Evolution von Sprache betrachtet.

3.3 Sprachevolution

Die Kopplung von Gestik und Sprache im Menschen, die Ritualisierung von Handlungen zu pseudo-kommunikativen Gesten bei nicht menschlichen Primaten, die spontane Entwicklung von Gebärdensprache bei gehörlosen Kindern und nicht zuletzt die Homologie zwischen Areal F5 beim Makaken und dem Broca-Areal des Menschen legen nahe, dass gemeinsame, manuelle Tätigkeiten den Nährboden für die Phylogenese von Sprache bildeten. Dazu werden zwei theoretische Ansätze diskutiert, über die die Rolle der Spiegelneuronen in der Sprachevolution geklärt werden soll: einerseits die „Mirror System Hypothesis“, andererseits die Hypothese der auf Kooperation basierenden Entwicklung menschlicher Kommunikation.

3.3.1 Die „Mirror System Hypothesis“

Arbib (2006) sieht Spiegelneuronen als „the missing link“ in der evolutionären Sprachentwicklung. Sie haben im Menschen die Fähigkeit entwickelt, symbolhaft und multimodal, dh. mittels vokaler, gestischer oder mimischer Bewegungen, zu kommunizieren. Mit dieser Entwicklung war der Grundstein für die Entstehung von Sprache gelegt. Sie passierte aber nicht durch Spiegelneuronen alleine, sondern involvierte auch die Veränderung anderer Gehirnareale, dh. *„evolutionary changes within and outside the mirror system which may have occurred to equip Homo sapiens with a language-ready brain“* (Arbib, 2006:4).

Diese Evolution des Gehirns fußt der „Mirror System Hypothesis“ von Arbib (2006, 2009) zufolge in den alltäglichen Handlungen der Vorfahren des Menschen. Ab hier nimmt der Autor folgende Entwicklungsstufen an, die verlaufend ineinander übergehen:

1. Spiegelneuronen im Areal F5: Ihre Entwicklung ermöglicht einfache Formen von Imitation, die die Individuen befähigt, das Ziel einer fremden Handlung

zu erfassen. Diese Art von Imitation trifft man auch bei heutigen Vertretern nicht menschlicher Primaten an. Diese ahmen jedoch nicht die Handlung selbst nach, sondern haben nur ihr Ziel vor Augen, während sie danach streben, es mit allen Mitteln zu erreichen, denn: *„It is one thing to recognize an action using the mirror system; it is another thing to use that representation as a basis for repeating the action.”* (Arbib, 2006:24).

2. Komplexe Imitation: Eine Handlung wird als eine Kette von Einzelbewegungen begriffen, die auch einzeln imitiert werden können, was folglich die Fähigkeit darstellt, eine Handlung „nachzuvollziehen“. Auf diese Weise können neue, komplexe Handlungen ins durch Spiegelneuronen repräsentierte Bewegungsrepertoire aufgenommen werden. Diese Stufe sieht Arbib (2006) bereits als spezifisch menschlich.
3. Aus der Pantomime dieser internalisierten Einzelbewegungen entstehen erste Ur-Zeichen („*protosign*“). Ihre kommunikative Verwendung erklärt sich der Autor aus der besonderen Eigenschaft der Spiegelneuronen, durch ihre Ausführung beim Gegenüber das Bild der entsprechenden Handlung auszulösen und es auf diese Weise mitzuteilen.
4. Zeichen werden konventionalisiert und Ur-Laute („*protospeech*“) werden als weitere Modalität für symbolhafte Kommunikation entdeckt, in dem Sinne *„that protosign grounded the crucial innovation of using arbitrary symbolic gestures to convey novel meanings, and that this in turn provided the scaffolding for protospeech.”* (Arbib, 2006:27).
5. Vor dem Hintergrund dieser lautlichen Ur-Symbole entwickeln sich auch die Ur-Zeichen weiter, was wiederum die Ur-Laute bereichert. Die entstehende Spirale führt schließlich zur Ausbildung einer Ur-Sprache.

Der Urgrund von Sprache ist dieser Hypothese zufolge die zielgerichtete Handlung, repräsentiert durch das „Mirror Neuron System“, das durch seine inhärente Parität von Produktion und Perzeption zusammen mit anderen, nicht näher definierten Entwicklungen auch kommunikatives Verhalten hervorbringt. Arbib (2006, 2009) sieht daher im Verb mit seinen Argumenten jene primitive semantisch-syntaktische Einheit, aus der sich sprachliche Äußerungen aufbauen, und nicht in einer „Universalen Grammatik“. Das Ziel einer Äußerung ist vielmehr, in einem bestimmten Kontext eine eindeutige Aussage zu treffen.

Arbib (2006) nennt als Beispiel einen Restaurantbesitzer, der seinem Kellner eine Anweisung gibt: „Bediene den netten, alten Mann zu deiner Linken!“. Stattdessen könnte er aber auch sagen: „Bediene den alten Mann!“, weiß aber, dass diese Äußerung ambig ist und im Kellner keine klare Vorstellung seines Auftrags hervorrufen wird. Er verfeinert daher die zielgerichtete Handlung des Bedienens durch weitere Argumente.

„While syntactic constructions can be usefully analyzed and categorized from an abstract viewpoint, the pragmatics of what one is trying to say and to whom one is trying to say it will drive the goal-directed process of producing a sentence.” (Arbib, 2006:10)

Daher besteht laut seiner Hypothese die Ur-Sprache anfangs aus ganzen, unteilbaren Äußerungen für bestimmte, konkrete Situationen und Handlungen. Diese werden aber im Laufe der Zeit in einzelne Komponenten aufgebrochen, wie dies auch gehörlose Kinder bei der eigenständigen Entwicklung von Zeichensprachen tun (siehe Kapitel 3.2.3), und zunehmend von ihrem konkreten und erlebnisnahen Kontext abstrahiert. Was bleibt, ist ein *„schema network anchored in my action and perception“* (Arbib, 2006:40).

Ähnlich argumentiert auch Tomasello (2003) über einen „usage-based approach“. Grammatische Kategorien hält er für mehr akademischer als psychologischer Natur. Sie ergeben sich seiner Meinung nach aus dem konkreten Gebrauch sprachlicher Symbole in der sozialen Interaktion. Universell erscheinen manche Kategorien, weil kommunikative Anforderungen universell sind, *„for example, something like nouns and verbs as expressions of reference and predication using linguistic symbols of certain kinds.“* (Tomasello, 2003:19). Daher stellt sich in der Sprachevolution für ihn primär die Frage nach der Entstehung kommunikativen Verhaltens.

3.3.2 Kommunikation durch Kooperation

Der dritte Schritt im zuvor dargestellten Verlauf laut „Mirror System Hypothesis“ scheint nicht klar definiert. Denn etwas kommunizieren zu können, sei dies hier durch Pantomime, setzt eine evolutionäre Veränderung voraus, die es dem Individuum ermöglicht, dem anderen mentale Zustände zu attribuieren.

Dass Spiegelneuronen nicht (alleine) dafür verantwortlich sein können, zeigt schon der Umstand, dass Affen trotz Spiegelneuronen kein kommunikatives Verhalten an den Tag legen. Ein solches muss nämlich laut Moll und Tomasello (2007) auf drei wesentlichen kooperativen Eckpunkten fußen:

- Ein gemeinsames Ziel, das eine Gruppe zusammenschweißt: Affen kooperieren zwar, wenn ein Ziel nur gemeinsam mit einem anderen erreicht werden kann. Wenn der andere (in der von Moll und Tomasello (2007) zitierten Studie ein Mensch) plötzlich aufhört, das gemeinsame Ziel zu verfolgen, versucht der Affe nicht, ihn zur weiteren Kooperation zu bewegen. Ein Mensch hingegen würde schon danach streben, den mentalen Zustand des anderen wieder auf das gemeinsame Ziel „auszurichten“.
- Reziproker, kontingenter Rollentausch: Dies erfordert ebenfalls ein gegenseitiges empathisches Verstehen des anderen, die Fähigkeit die Perspektive des anderen einzunehmen. Auch darauf gibt es keine Hinweise beim Affen.
- Hilfe für andere beim Erreichen eines Ziels: Solange das Ziel nichts Essbares ist, konnte in einer weiteren von Moll und Tomasello (2007) erwähnten Studie manchmal beobachtet werden, dass der Affe einem Menschen dabei half, einen Gegenstand zu erreichen.

Diese drei Verhaltensweisen stehen für Kooperation. Am beschriebenen Beispiel für die dritte Form ist aber ersichtlich, dass auch nicht menschliche Primaten rudimentär kooperieren können. Ein wichtiger Umstand in jener Untersuchung war aber, dass der Affe erstens schon länger mit Menschen zusammengelebt hatte und zweitens, dass das Zielobjekt nichts Essbares war. In einer vertrauten Umgebung mit vertrauten Personen, die keinen Anlass zu feindlichen, konkurrierendem Verhalten Anlass geben, lassen sich Affen durchaus zu gemeinsamen Aktionen hinreißen.

Was zur Evolution kooperativen Verhaltens auf Basis gegenseitigen Verstehens geführt haben mag, ist die Entstehung von Populationen, *„in which the more aggressive and less cooperative members of the group were somehow ostracized or killed“* (Moll und Tomasello, 2007:648). In einer Umgebung, die nicht mehr auf Konkurrenz und nacktes Überlegen ausgerichtet war, konnten sich sodann jene sozialen, kooperativen Fähigkeiten ausbilden, die in weiterer Folge Grundlage für Kommunikation waren.

Spiegelneuronen mag es schon davor gegeben haben, wie auch im Modell der „Mirror System Hypothesis“ vorgesehen. Doch erst die Evolution von Kommunikation durch Kooperation band sie in ein empathisches Netzwerk ein, wo aus reinem Handlungsspiegeln ein Handlungsverstehen wurde. Ergebnis dieser Entwicklung ist die Fähigkeit, mit dem eigenen Körper gemachte Erfahrungen in andere zu projizieren, zielgerichtete Handlungen zu kommunikativen Symbolen zu abstrahieren und Sprache an der Schnittstelle zwischen Spiegelneuronen und sozialer Kommunikation auszudifferenzieren.

Conclusio

Nachdem man Spiegelneuronen entdeckt hatte, war die Euphorie unter den Neuro-Reduktionisten groß, endlich *den* Mechanismus für Sprachproduktion und -perzeption, Empathie und Kommunikation gefunden zu haben:

„I predict that mirror neurons will do for psychology what DNA did for biology: they will provide a unifying framework and help explain a host of mental abilities that have hitherto remained mysterious and inaccessible to experiments.” (Ramachandran, 2000)

Dabei sind Spiegelneuronen wirklich bemerkenswert: Sie feuern gleichermaßen, wenn man eine Handlung ausführt oder wenn man sie bloß beobachtet. Sie kodieren eine Handlung als Ganzes und sind daher während ihres gesamten Ablaufs aktiv. Sie reagieren gar schon, wenn zu einer Handlung erst angesetzt wird oder gar nur angesetzt werden könnte. Es gibt sie für visuellen und auditiven Input. Sie „unterscheiden“ zwischen Kontexten und zwischen „meaningfull“ und „meaningless“. Und das alles auf Einzelzellebene.

War damit endlich die sagenumwobene „Großmutterzelle“ gefunden, nur nicht für die Großmutter, sondern für bestimmte zielgerichtete, bedeutungsvolle Handlungen? War endlich die fundamentale Frage beantwortet, was Nervenzellen eigentlich sind, was sie tun und warum es sie gibt? War endlich geklärt, warum der Mensch ist, was er ist, nämlich ein soziales, kommunizierendes Wesen, das Gesellschaft, Politik, Kultur und Religion hervorgebracht hat? Mitnichten.

Die vorliegende Arbeit begann mit der Darstellung der Fakten über Spiegelneuronen im Gehirn des Makaken, wo man diese direkt untersuchen konnte, extrapolierte anhand einiger schlagender Indizien die dortigen Befunde auf das Gehirn des Menschen und spannte den Bogen vom Areal F5 zur Broca-Region und von hier weiter zur Sprache. Dort folgten zunächst aktuelle Sichtweisen auf die Sprachareale („Unification-Hypothese“) und anschließend Studien, die Hinweise für die Beteiligung von Spiegelneuronen in der Sprachverarbeitung suchten und in Form von

körperbasierter Syntax und Semantik fanden. Zuletzt wurde umfassend das Zusammenspiel von Gestik und Sprache, sowohl in der Entwicklung als auch im Gebrauch, behandelt, bevor im Kontext dessen und der Spiegelneuronen Erstspracherwerb und Sprachevolution in Augenschein genommen wurden. Was bleibt nun über Spiegelneuronen zu sagen?

Sie erklären uns nichts von dem zuvor Genannten, weder ob einzelne Zellen eine „Bedeutung“ haben können, noch wie das Gehirn funktioniert und auch nicht, was der Mensch ist. Auch nach dieser Arbeit ist und bleibt die menschliche Sprache ein Rätsel.

Aber Spiegelneuronen rücken dieses Rätsel in ein neues Licht, was neue, vormals verborgene Seiten zu Tage fördert. Diese Arbeit legt den Schluss nahe, dass Spiegelneuronen den Menschen in seinen körperlich-sinnlichen Erfahrungen verankern, indem sie sein unentwegtes und ureigenes Greifen zum ganzheitlich repräsentierten Begriff führen: einem Begriff der unbelebten Welt durch kanonische Neuronen und einem Begriff der belebten Welt durch Spiegelneuronen.

Was im Dunkel bleibt, ist die spezifisch menschliche Fähigkeit symbolhaft zu kommunizieren. Die Arbeit konnte und wollte nicht darauf eingehen, worin diese Fähigkeit besteht. Aber sie konnte zeigen, dass die kommunikative Funktion von der Funktion der Spiegelneuronen zu unterscheiden ist. Aufgabe der letzteren besteht nämlich darin, ersterer in der zwischenmenschlichen Interaktion einen Fundus an paritätär repräsentierten und neuronal-motorisch definierten „Begriffen“ zur Verfügung zu stellen.

Gegenstand weiterer Untersuchungen könnte das lautsprachliche Äquivalent zu der spontanen, körperbasierten Entwicklung von Zeichensprachen sein. Wenn Spiegelneuronen nämlich ein Repertoire für symbolhaft, als Gesten verwendbare Handlungen darstellen, wenn Sprache als ein Gestikulieren mit dem Mund verstanden werden kann und wenn Gestik und Sprache neuronal integrierte Bestandteile desselben Systems sind, inwieweit ist dann das Sprechen selbst in der körperlichen Erfahrung verankert? Inwieweit kann sich ein Begriff lautmalerisch, durch die Lautform selbst, ausdrücken? Es könnte daher lehrreich sein, im Lichte der Spiegelneuronen einen neuen Blick auf das Phänomen der Onomatopöie zu werfen.

Literaturverzeichnis

- [1] ACREDOLO, Linda ; GOODWYN, Susan: Symbolic gestures in the service of infant-initiated "joint attention". In: *Infant Behavior and Development* 21 (1998), April, Nr. Supplement 1, S. 62. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6W4K-4602P0J-27/2/2577fa9654157a07ff67c5f8b6f5242a>. – ISSN 0163-6383
- [2] AHLSEN, Elisabeth: *Introduction to Neurolinguistics*. Amsterdam/Philadelphia : John Benjamins, 2006
- [3] ANDERSON, Steven W. ; DAMASIO, Antonio R. ; DAMASIO, Hanna: Troubled letters but not numbers: domain specific cognitive impairments following focal damage in frontal cortex. In: *Brain* 113 (1990), Juni, Nr. 3, S. 749–766. – URL <http://brain.oxfordjournals.org/content/113/3/749.abstract>
- [4] ARBIB, Michael ; BOTA, Mihail: Language evolution: neural homologies and neuroinformatics. In: *Neural Networks* 16 (2003), November, Nr. 9, S. 1237–1260. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T08-49V1D69-1/2/5c4274f0b7847d958fcc91e605042137>. – ISSN 0893-6080
- [5] ARBIB, Michael A.: The Mirror System Hypothesis on the linkage of action and languages. In: ARBIB, Michael A. (Hrsg.): *Action to language via the mirror neuron system*. Cambridge : Cambridge University Press, 2006, S. 3–47
- [6] ARBIB, Michael A.: Evolving the language-ready brain and the social mechanisms that support language. In: *Journal of Communication Disorders* 42 (2009), Juli, Nr. 4, S. 263–271. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T85-4W38RHN-1/2/12f720d736e2ab26c35307e49d3dcca0>. – ISSN 0021-9924
- [7] AZIZ-ZADEH, Lisa ; WILSON, Stephen M. ; RIZZOLATTI, Giacomo ; IACOBONI, Marco: Congruent Embodied Representations for Visually Presented Actions and Linguistic Phrases Describing Actions. In: *Current Biology* 16 (2006), September, Nr. 18, S. 1818–1823. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VRT-4KXDWXW-X/2/d016eff2a96cc2571749176d8d709be5>. – ISSN 0960-9822

- [8] ASSMANN, Birte ; ROMANO, M. C. ; THIEL, Marco ; NIEMITZ, Carsten: Hierarchical organization of a reference system in newborn spontaneous movements. In: *Infant Behavior and Development* 30 (2007), Dezember, Nr. 4, S. 568–586. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6W4K-4P1G8NR-1/2/e801dcbdee99c71685dda8a80c4b7e95>. – ISSN 0163-6383
- [9] BERTHIER, Neil E. ; CARRICO, Renee L.: Visual information and object size in infant reaching. In: *Infant Behavior and Development* 33 (2010), Dezember, Nr. 4, S. 555–566. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6W4K-50S2D4K-2/2/5dea844e335e029501b92e2b7abcd1a8>. – ISSN 0163-6383
- [10] BUCCINO, G. ; RIGGIO, L. ; MELLI, G. ; BINKOFSKI, F. ; GALLESE, V. ; RIZZOLATTI, G.: Listening to action-related sentences modulates the activity of the motor system: A combined TMS and behavioral study. In: *Cognitive Brain Research* 24 (2005), August, Nr. 3, S. 355–363. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6SYV-4FXNRF8-1/2/40bcf34aacbda145276b0f94346d72bb>. – ISSN 0926-6410
- [11] CAPIRCI, Olga ; CONTALDO, Annarita ; CASELLI, M. C. ; VOLTERRA, Virginia: From action to language through gesture: a longitudinal perspective. In: *Gestural Communication in Nonhuman and Human Primates*. Amsterdam u.a. : John Benjamins Publishing Co., 2007 (Benjamins Current Topics 10), S. 141–161
- [12] CARR, Laurie ; IACOBONI, Marco ; DUBEAU, Marie-Charlotte ; MAZZIOTTA, John C. ; LENZI, Gian L.: Neural mechanisms of empathy in humans: A relay from neural systems for imitation to limbic areas. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100 (2003), April, Nr. 9, S. 5497–5502. – URL <http://www.pnas.org/content/100/9/5497.abstract>
- [13] CASSELL, Justine: A Framework for Gesture Generation and Interpretation. In: CIPOLLA, R. (Hrsg.) ; PENTLAND, A. (Hrsg.): *Computer Vision for Human-Machine Interaction*. Cambridge : Cambridge University Press, 1998
- [14] CHONG, Trevor . ; CUNNINGTON, Ross ; WILLIAMS, Mark A. ; KANWISHER, Nancy ; MATTINGLEY, Jason B.: fMRI Adaptation Reveals Mirror Neurons in Human Inferior Parietal Cortex. In: *Current Biology* 18 (2008), Oktober, Nr. 20, S. 1576–1580. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VRT-4TRS9RY-1/2/23da272d87b1c2d73ec9052b78ff65f8>. – ISSN 0960-9822
- [15] COCHET, Hélène ; VAUCLAIR, Jacques: Pointing gestures produced by toddlers from 15 to 30 months: Different functions, hand shapes and laterality patterns. In: *Infant Behavior and Development* 33 (2010), Dezember, Nr. 4, S. 431–441. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6W4K-504TP21-1/2/aae9a574ef370c32cf708f36f9f10ec0>. – ISSN 0163-6383

- [16] COLONNESI, Cristina ; STAMS, Geert Jan . ; KOSTER, Irene ; NOOM, Marc J.: The relation between pointing and language development: A meta-analysis. In: *Developmental Review* in Druck. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WDH-51GHKBF-1/2/610827235b0416b4589ed72f029c8129>. – ISSN 0273-2297
- [17] CORINA, David P. ; MCBURNEY, Susan L. ; DODRILL, Carl ; HINSHAW, Kevin ; BRINKLEY, Jim ; OJEMANN, George: Functional Roles of Broca's Area and SMG: Evidence from Cortical Stimulation Mapping in a Deaf Signer. In: *NeuroImage* 10 (1999), November, Nr. 5, S. 570–581. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WNP-45FCP3G-S/2/8ae5e48cb37e82b65a3df437e7c384a8>. – ISSN 1053-8119
- [18] CSIBRA, Gergely: Recognizing Communicative Intentions in Infancy. In: *Mind & Language* 25 (2010), Nr. 2, S. 141–168. – URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1468-0017.2009.01384.x>. – ISSN 1468-0017
- [19] DAVIS, Cameron ; KLEINMAN, Jonathan T. ; NEWHART, Melissa ; GINGIS, Leila ; PAWLAK, Mikolaj ; HILLIS, Argye E.: Speech and language functions that require a functioning Broca's area. In: *Brain and Language* 105 (2008), April, Nr. 1, S. 50–58. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WC0-4S08YFB-1/2/0d00f0cf3a3a4144e5e3a68aca646fea>. – ISSN 0093-934X
- [20] DECETY, J ; GRÈZES, J ; COSTES, N ; PERANI, D ; JEANNEROD, M ; PROCYK, E ; GRASSI, F ; FAZIO, F: Brain activity during observation of actions. Influence of action content and subject's strategy. In: *Brain* 120 (1997), Oktober, Nr. 10, S. 1763–1777. – URL <http://brain.oxfordjournals.org/content/120/10/1763.abstract>
- [21] DRONKERS, N. F. ; PLAISANT, O. ; IBA-ZIZEN, M. T. ; CABANIS, E. A.: Paul Broca's historic cases: high resolution MR imaging of the brains of Leborgne and Lelong. In: *Brain* 130 (2007), Mai, Nr. 5, S. 1432–1441. – URL <http://brain.oxfordjournals.org/content/130/5/1432.abstract>
- [22] FADIGA, L. ; FOGASSI, L. ; PAVESI, G. ; RIZZOLATTI, G.: Motor facilitation during action observation: a magnetic stimulation study. In: *J Neurophysiol* 73 (1995), Juni, Nr. 6, S. 2608–2611. – URL <http://jn.physiology.org/cgi/content/abstract/73/6/2608>
- [23] FADIGA, Luciano ; CRAIGHERO, Laila: Hand Actions and Speech Representation in Broca's Area. In: *Cortex* 42 (2006), Nr. 4, S. 486–490. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B8JH1-4S03J28-7/2/0f1f751131f5696e6ad52765ac5da6ba>. – ISSN 0010-9452

- [24] FADIGA, Luciano ; CRAIGHERO, Laila ; BUCCINO, Giovanni ; RIZZOLATTI, Giacomo: Speech listening specifically modulates the excitability of tongue muscles: a TMS study. In: *European Journal of Neuroscience* 15 (2002), Nr. 2, S. 399–402. – URL <http://dx.doi.org/10.1046/j.0953-816x.2001.01874.x>
- [25] FERRARI, P. F. ; GALLESE, V. ; RIZZOLATTI, G. ; FOGASSI, L.: Mirror neurons responding to the observation of ingestive and communicative mouth actions in the monkey ventral premotor cortex. In: *European Journal of Neuroscience* 17 (2003), Nr. 8, S. 1703–1714. – URL <http://dx.doi.org/10.1046/j.1460-9568.2003.02601.x>. – ISSN 1460-9568
- [26] FOGASSI, Leonardo ; FERRARI, Pier F. ; GESIERICH, Benno ; ROZZI, Stefano ; CHERSI, Fabian ; RIZZOLATTI, Giacomo: Parietal Lobe: From Action Organization to Intention Understanding. In: *Science* 308 (2005), April, Nr. 5722, S. 662 –667. – URL <http://www.sciencemag.org/content/308/5722/662.abstract>
- [27] FOGASSI, Leonardo ; LUPPINO, Giuseppe: Motor functions of the parietal lobe. In: *Current Opinion in Neurobiology* 15 (2005), Dezember, Nr. 6, S. 626–631. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VS3-4HGD74R-9/2/f31032a0e9778da36f7a3b5ad2298f1e>. – ISSN 0959-4388
- [28] FUKUTAKE, Toshio ; HATTORI, Takamichi: Motion sickness susceptibility due to a small hematoma in the right supramarginal gyrus. In: *Clinical Neurology and Neurosurgery* 102 (2000), Dezember, Nr. 4, S. 246–248. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T5F-44HSB2X-G/2/6a866316e57aef60213eef06c5e030c8>. – ISSN 0303-8467
- [29] GALLESE, Vittorio ; FADIGA, Luciano ; FOGASSI, Leonardo ; RIZZOLATTI, Giacomo: Action recognition in premotor cortex. In: *Brain* 119 (1996), S. 593–609
- [30] GALLESE, Vittorio ; SINIGAGLIA, Corrado: The bodily self as power for action. In: *Neuropsychologia* 48 (2010), Februar, Nr. 3, S. 746–755. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T0D-4XFPR7M-3/2/ceba38bbe3e1d36835428fbc80b69548>. – ISSN 0028-3932
- [31] GENTILUCCI, M. ; FOGASSI, L. ; LUPPINO, G. ; MATELLI, M. ; CAMARDA, R. ; RIZZOLATTI, G.: Functional organization of inferior area 6 in the macaque monkey - I. Somatotopy and the control of proximal movements. In: *Experimental Brain Research* 71 (1988a), Juli, Nr. 3, S. 475–490. – URL <http://dx.doi.org/10.1007/BF00248741>. – ISSN 0014-4819
- [32] GENTILUCCI, M. ; FOGASSI, L. ; LUPPINO, G. ; MATELLI, M. ; CAMARDA, R. ; RIZZOLATTI, G.: Functional organization of inferior area 6 in the macaque monkey -

- II. Area F5 and the control of distal movements. In: *Experimental Brain Research* 71 (1988b), Juli, Nr. 3, S. 491–507. – URL <http://dx.doi.org/10.1007/BF00248741>. – ISSN 0014-4819
- [33] GENTILUCCI, Maurizio ; BENUZZI, Francesca ; GANGITANO, Massimo ; GRIMALDI, Silvia: Grasp With Hand and Mouth: A Kinematic Study on Healthy Subjects. In: *J Neurophysiol* 86 (2001), Oktober, Nr. 4, S. 1685–1699. – URL <http://jn.physiology.org/cgi/content/abstract/86/4/1685>
- [34] GENTILUCCI, Maurizio ; CAMPIONE, Giovanna C. ; VOLTA, Riccardo D. ; BERNARDIS, Paolo: The observation of manual grasp actions affects the control of speech: A combined behavioral and Transcranial Magnetic Stimulation study. In: *Neuropsychologia* 47 (2009), Dezember, Nr. 14, S. 3190–3202. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T0D-4WXC285-2/2/978a5c4a9bf9a18423d9691b635dd12c>. – ISSN 0028-3932
- [35] GOLDIN-MEADOW, Susan ; MYLANDER, Carolyn ; FRANKLIN, Amy: How children make language out of gesture: Morphological structure in gesture systems developed by American and Chinese deaf children. In: *Cognitive Psychology* 55 (2007), September, Nr. 2, S. 87–135. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WCR-4M6SBNF-1/2/6411b7cf363d9c984ee50f0d75b20235>. – ISSN 0010-0285
- [36] GOLDIN-MEADOW, Susan ; ÖZÇALIŞKAN, Seyda: Gesture is at the cutting edge of early language development. In: *Cognition* 96 (2005), Juli, Nr. 3, S. B101–B113. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T24-4FSFXGK-1/2/342bf012a6c9b07b083282726f8b89fc>. – ISSN 0010-0277
- [37] GREDEBÄCK, Gustaf ; FIKKE, Linn ; MELINDER, Annika: The development of joint visual attention: a longitudinal study of gaze following during interactions with mothers and strangers. In: *Developmental Science* 13 (2010), Nr. 6, S. 839–848. – URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00945.x>. – ISSN 1467-7687
- [38] GRÈZES, J. ; ARMONY, J. L. ; ROWE, J. ; PASSINGHAM, R. E.: Activations related to “mirror” and “canonical” neurones in the human brain: an fMRI study. In: *NeuroImage* 18 (2003), April, Nr. 4, S. 928–937. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WNP-484VCY7-3/2/47021b2925c843e0fe5cba8dd31d693c>. – ISSN 1053-8119
- [39] GRÈZES, Julie ; COSTAS, Nicolas ; DECETY, Jean: Top-Down effect of strategy on the perception of human biological motion: A PET study. In: *Cognitive Neuropsychology* 15 (1998), September, Nr. 6-8, S. 553–582. – URL <http://www.ingentaconnect.com/content/psych/pcgn/1998/00000015/F0030006/art00004>

- [40] GRÖTZBACH, Meike Wehmeyer; H.: *Aphasie: Wege aus dem Sprachdschungel*. Heidelberg : Springer, 2006 (Praxiswissen Logopädie)
- [41] HADDERS-ALGRA, M.: Development of postural control during the first 18 months of life. In: *Neural Plasticity* 12 (2005), Nr. 2-3, S. 99–108. – URL <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-23744471526&partnerID=40&md5=35da715a878521852b475313c1d3261f>
- [42] HAGOORT, Peter: On Broca, brain, and binding: a new framework. In: *Trends in Cognitive Sciences* 9 (2005), September, Nr. 9, S. 416–423. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VH9-4GR8NC9-1/2/64a77f25ccd3e04886d918c51d6060b5>. – ISSN 1364-6613
- [43] HAGOORT, Peter ; LEVELT, Willem J. M.: The Speaking Brain. In: *Science* 326 (2009), Oktober, Nr. 5951, S. 372–373. – URL <http://www.sciencemag.org/content/326/5951/372.short>
- [44] HALLETT, Mark: Transcranial magnetic stimulation and the human brain. In: *Nature* 406 (2000), Juli, Nr. 6792, S. 147–150. – URL <http://dx.doi.org/10.1038/35018000>. – ISSN 0028-0836
- [45] HARI, R. ; FORSS, N. ; AVIKAINEN, S. ; KIRVESKARI, E. ; SALENIOUS, S. ; RIZZOLATTI, G.: Activation of human primary motor cortex during action observation: A neuromagnetic study. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 95 (1998), Dezember, Nr. 25, S. 15061–15065. – URL <http://www.pnas.org/content/95/25/15061.abstract>
- [46] HICKOK, Gregory: Eight Problems for the Mirror Neuron Theory of Action Understanding in Monkeys and Humans. In: *Journal of Cognitive Neuroscience* 21 (2009), Juli, Nr. 7, S. 1229–1243. – URL <http://dx.doi.org/10.1162/jocn.2009.21189>. – ISSN 0898-929X
- [47] HILLIS, Argye E. ; WORK, Melissa ; BARKER, Peter B. ; JACOBS, Michael A. ; BREESE, Elisabeth L. ; MAURER, Kristin: Re-examining the brain regions crucial for orchestrating speech articulation. In: *Brain* 127 (2004), Juli, Nr. 7, S. 1479–1487. – URL <http://brain.oxfordjournals.org/content/127/7/1479.abstract>
- [48] IACOBONI, Marco: Visuo-motor integration and control in the human posterior parietal cortex: Evidence from TMS and fMRI. In: *Neuropsychologia* 44 (2006), Nr. 13, S. 2691–2699. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TOD-4K4PTOK-1/2/f1c24b9ee8b1a6ef277963b73d946c52>. – ISSN 0028-3932

- [49] IVERSON, Jana M. ; GOLDIN-MEADOW, Susan: Gesture Paves the Way for Language Development. In: *Psychological Science* 16 (2005), Mai, Nr. 5, S. 367–371. – URL <http://pss.sagepub.com/content/16/5/367.abstract>
- [50] IVERSON, J.M. ; GOLDIN-MEADOW, S.: Why people gesture when they speak [7]. In: *Nature* 396 (1998), Nr. 6708, S. 228. – URL <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0032548011&partnerID=40&md5=1e6ffe1e8bc1eec91b4dae54d7840a33>
- [51] KELLY, Spencer D. ; ÖZYÜREK, Ashı ; MARIS, Eric: Two Sides of the Same Coin. In: *Psychological Science* 21 (2010), Februar, Nr. 2, S. 260–267. – URL <http://pss.sagepub.com/content/21/2/260.abstract>
- [52] KEMMERER, David ; GONZALEZ-CASTILLO, Javier: The Two-Level Theory of verb meaning: An approach to integrating the semantics of action with the mirror neuron system. In: *Brain and Language* 112 (2010), Januar, Nr. 1, S. 54–76. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WC0-4TW536J-1/2/1d644a5f4bab96a5f5aaff31ed4ab9cd>. – ISSN 0093-934X
- [53] KILNER, James M. ; NEAL, Alice ; WEISKOPF, Nikolaus ; FRISTON, Karl J. ; FRITH, Chris D.: Evidence of Mirror Neurons in Human Inferior Frontal Gyrus. In: *J. Neurosci.* 29 (2009), August, Nr. 32, S. 10153–10159. – URL <http://www.jneurosci.org/cgi/content/abstract/29/32/10153>
- [54] KOHLER, Evelyne ; KEYSERS, Christian ; UMITA, M. A. ; FOGASSI, Leonardo ; GALLESE, Vittorio ; RIZZOLATTI, Giacomo: Hearing Sounds, Understanding Actions: Action Representation in Mirror Neurons. In: *Science* 297 (2002), August, Nr. 5582, S. 846–848. – URL <http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/297/5582/846>
- [55] LIBERMAN, Alvin M. ; MATTINGLY, Ignatius G.: The motor theory of speech perception revised. In: *Cognition* 21 (1985), Oktober, Nr. 1, S. 1–36. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T24-49SGXHT-2/2/21ef1bbac6083bc994b3f39b47fbf060>. – ISSN 0010-0277
- [56] LISZKOWSKI, Ulf: Human twelve-month-olds point cooperatively to share interest with and helpfully provide information for a communicative partner. In: *Gestural Communication in Nonhuman and Human Primates*. Amsterdam u.a. : John Benjamins Publishing Co., 2007 (Benjamins Current Topics 10), S. 123–140
- [57] LONGCAMP, M. ; TANSKANEN, T. ; HARI, R.: The imprint of action: Motor cortex involvement in visual perception of handwritten letters. In: *NeuroImage* 33 (2006),

- November, Nr. 2, S. 681–688. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WNP-4KVXHN0-1/2/f0939e6fd95b07edfaed54c6db938293>. – ISSN 1053-8119
- [58] LONGCAMP, Marieke ; ANTON, Jean-Luc ; ROTH, Muriel ; VELAY, Jean-Luc: Visual presentation of single letters activates a premotor area involved in writing. In: *NeuroImage* 19 (2003), August, Nr. 4, S. 1492–1500. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WNP-48GVT78-7/2/87e91bda5e117288d9880cd1414778f5>. – ISSN 1053-8119
- [59] MCGURK, Harry ; MACDONALD, John: Hearing lips and seeing voices. In: *Nature* 264 (1976), Dezember, Nr. 5588, S. 746–748. – URL <http://dx.doi.org/10.1038/264746a0>
- [60] MCNEILL, David: *Hand and mind: What gestures reveal about thought*. Chicago : University of Chicago Press, 1992
- [61] MOLL, Henrike ; TOMASELLO, Michael: Cooperation and human cognition: the Vygotskian intelligence hypothesis. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 362 (2007), April, Nr. 1480, S. 639 –648. – URL <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/362/1480/639.abstract>
- [62] MORSELLA, Ezequiel ; KRAUSS, Robert M.: The Role of Gestures in Spatial Working Memory and Speech. In: *The American Journal of Psychology* 117 (2004), Oktober, Nr. 3, S. 411–424. – URL <http://www.jstor.org/stable/4149008>. – ArticleType: research-article / Full publication date: Autumn, 2004 / Copyright © 2004 University of Illinois Press. – ISSN 00029556
- [63] MUKAMEL, Roy ; EKSTROM, Arne D. ; KAPLAN, Jonas ; IACOBONI, Marco ; FRIED, Itzhak: Single-Neuron Responses in Humans during Execution and Observation of Actions. In: *Current biology : CB* 20 (2010), April, Nr. 8, S. 750–756. – URL <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960982210002332>. – ISSN 0960-9822
- [64] MUTHA, Pratik K. ; SAINBURG, Robert L. ; HAALAND, Kathleen Y.: Coordination deficits in ideomotor apraxia during visually targeted reaching reflect impaired visuomotor transformations. In: *Neuropsychologia* 48 (2010), November, Nr. 13, S. 3855–3867. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T0D-513F94D-2/2/80f243509e89f62c8d531c63c7f6c375>. – ISSN 0028-3932
- [65] OZTOP, Erhan ; ARBIB, Michael A. ; BRADLEY, Nina: The development of grasping and the mirror system. In: ARBIB, Michael A. (Hrsg.): *Action to language via the mirror neuron system*. Cambridge : Cambridge University Press, 2006, S. 397–423

- [66] PASSINGHAM, Richard: How good is the macaque monkey model of the human brain? In: *Current Opinion in Neurobiology* 19 (2009), Februar, Nr. 1, S. 6–11. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VS3-4VRMHX4-1/2/3ac8e03fcd202b37a44965c3f3048d4c>. – ISSN 0959-4388
- [67] PELLEGRINO, G. ; FADIGA, L. ; FOGASSI, L. ; GALLESE, V. ; RIZZOLATTI, G.: Understanding motor events: a neurophysiological study. In: *Experimental Brain Research* 91 (1992), Oktober, Nr. 1, S. 176–180. – URL <http://dx.doi.org/10.1007/BF00230027>. – ISSN 0014-4819
- [68] PETITTO, Laura A. ; HOLOWKA, Siobhan ; SERGIO, Lauren E. ; LEVY, Bronna ; OSTRY, David J.: Baby hands that move to the rhythm of language: hearing babies acquiring sign languages babble silently on the hands. In: *Cognition* 93 (2004), August, Nr. 1, S. 43–73. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T24-4BBMV9-1/2/865cd3800f1ce780f58f2ae9766295ba>. – ISSN 0010-0277
- [69] PIKA, Simone ; LIEBAL, Katja ; CALL, Joseph ; TOMASELLO, Michael: The gestural communication of apes. In: *Gestural Communication in Nonhuman and Human Primates*. Amsterdam u.a. : John Benjamins Publishing Co., 2007 (Benjamins Current Topics 10), S. 37–51
- [70] PIKA, Simone ; MITANI, John: Referential gestural communication in wild chimpanzees (Pan troglodytes). In: *Current Biology* 16 (2006), März, Nr. 6, S. R191–R192. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VRT-4JHMFT0-8/2/f510ef9c0352612c635030179db3596a>. – ISSN 0960-9822
- [71] PIZZUTO, Elena [. ; CAPOBIANCO, Micaela [. ; DEVESCOVI, Antonella [. : Gestural-vocal deixis and representational skills in early language development. In: *Interaction Studies* 6 (2005), S. 223–252. – URL <http://www.ingentaconnect.com/content/jbp/is/2005/00000006/00000002/art00004>
- [72] POLLICK, Amy S. ; WAAL, Frans B. M. de: Ape gestures and language evolution. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104 (2007), Mai, Nr. 19, S. 8184–8189. – URL <http://www.pnas.org/content/104/19/8184.abstract>
- [73] RAMACHANDRAN, V.S.: Mirror neurons and imitation learning as the driving force behind "the great leap forward" in human evolution. In: *Edge* (2000), Juni, Nr. 69. – URL http://www.edge.org/3rd_culture/ramachandran/ramachandran_index.html
- [74] RIZZOLATTI, G. ; FADIGA, L. ; MATELLI, M. ; BETTINARDI, V. ; PAULESU, E. ; PERANI, D. ; FAZIO, F.: Localization of grasp representations in humans by PET: 1.

- Observation versus execution. In: *Experimental Brain Research* 111 (1996), September, Nr. 2, S. 246–252. – URL <http://dx.doi.org/10.1007/BF00227301>. – ISSN 0014-4819
- [75] RIZZOLATTI, Giacomo ; CRAIGHERO, Laila: THE MIRROR-NEURON SYSTEM. In: *Annual Review of Neuroscience* 27 (2004), Juli, Nr. 1, S. 169–192. – URL <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144230>. – ISSN 0147-006x
- [76] RIZZOLATTI, Giacomo ; FOGASSI, Leonardo ; GALLESE, Vittorio: Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. In: *Nat Rev Neurosci* 2 (2001), Nr. 9, S. 661–670. – URL <http://dx.doi.org/10.1038/35090060>. – ISSN 1471-003X
- [77] RODRÍGUEZ, Cintia: The ‘circumstances’ of gestures: Proto-interrogatives and private gestures. In: *New Ideas in Psychology* 27 (2009), August, Nr. 2, S. 288–303. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VD4-4SNPR1G-2/2/d97f78f8e81dc51df74f7fb5eeecb66f>. – ISSN 0732-118X
- [78] ROY, Alice C. ; CRAIGHERO, Laila ; FABBRI-DESTRO, Maddalena ; FADIGA, Luciano: Phonological and lexical motor facilitation during speech listening: A transcranial magnetic stimulation study. In: *Journal of Physiology-Paris* 102 (2008), Januar, Nr. 1-3, S. 101–105. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VMC-4S32NK4-6/2/cec405a06a8f7679f0b7abf6ab5a6813>. – ISSN 0928-4257
- [79] ROZZI, S. ; FERRARI, P. F. ; BONINI, L. ; RIZZOLATTI, G. ; FOGASSI, L.: Functional organization of inferior parietal lobule convexity in the macaque monkey: electrophysiological characterization of motor, sensory and mirror responses and their correlation with cytoarchitectonic areas. In: *European Journal of Neuroscience* 28 (2008), Nr. 8, S. 1569–1588. – URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1460-9568.2008.06395.x>. – ISSN 1460-9568
- [80] SAHIN, Ned T. ; PINKER, Steven ; CASH, Sydney S. ; SCHOMER, Donald ; HALGREN, Eric: Sequential Processing of Lexical, Grammatical, and Phonological Information Within Broca’s Area. In: *Science* 326 (2009), Oktober, Nr. 5951, S. 445–449. – URL <http://www.sciencemag.org/content/326/5951/445.abstract>
- [81] SAYGIN, Ayse . ; WILSON, Stephen M. ; DRONKERS, Nina F. ; BATES, Elizabeth: Action comprehension in aphasia: linguistic and non-linguistic deficits and their lesion correlates. In: *Neuropsychologia* 42 (2004), Nr. 13, S. 1788–1804. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T0D-4CNJ8CS-1/2/45595a83419c367a09b6ef3de97435a9>. – ISSN 0028-3932

- [82] SCARONE, Pietro ; GATIGNOL, Peggy ; GUILLAUME, Sophie ; DENVIL, Dominique ; CAPELLE, Laurent ; DUFFAU, Hugues: Agraphia after awake surgery for brain tumor: new insights into the anatomo-functional network of writing. In: *Surgical Neurology* 72 (2009), September, Nr. 3, S. 223–241. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TCB-4WTYXVH-1/2/b0f2cd9924b038bea28e905e45ac4514>. – ISSN 0090-3019
- [83] SCOTT, Sophie K. ; WISE, Richard J. S.: Functional imaging and language: A critical guide to methodology and analysis. In: *Speech Communication* 41 (2003), August, Nr. 1, S. 7–21. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V1C-46RV6ST-N/2/6b64ef1b055409cb0f95ebaa503fca0c>. – ISSN 0167-6393
- [84] SERENO, Martin I. ; TOOTELL, Roger .: From monkeys to humans: what do we now know about brain homologies? In: *Current Opinion in Neurobiology* 15 (2005), April, Nr. 2, S. 135–144. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VS3-4FRB813-1/2/0139c2f30e4648ab02b96efb774a5738>. – ISSN 0959-4388
- [85] SNIJDERS, Tineke M. ; VOSSE, Theo ; KEMPEN, Gerard ; BERKUM, Jos J.A. V. ; PETERSSON, Karl M. ; HAGOORT, Peter: Retrieval and Unification of Syntactic Structure in Sentence Comprehension: an fMRI Study Using Word-Category Ambiguity. In: *Cerebral Cortex* 19 (2009), Juli, Nr. 7, S. 1493 –1503. – URL <http://cercor.oxfordjournals.org/content/19/7/1493.abstract>
- [86] STOECKEL, Cornelia ; GOUGH, Patricia M. ; WATKINS, Kate E. ; DEVLIN, Joseph T.: Supramarginal gyrus involvement in visual word recognition. In: *Cortex* 45 (2009), Oktober, Nr. 9, S. 1091–1096. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B8JH1-4VGF42W-1/2/5448989c8d75cd6fea05742ba98fc68b>. – ISSN 0010-9452
- [87] TOMASELLO, Michael: *Constructing a language: A Usage-Based Theory of Language Acquisition*. 1. Cambridge, USA & London, UK : Havard University Press, 2003
- [88] TOMASELLO, Michael ; CARPENTER, Malinda ; LISZKOWSKI, Ulf: A New Look at Infant Pointing. In: *Child Development* 78 (2007), Nr. 3, S. 705–722. – URL <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.01025.x>. – ISSN 1467-8624
- [89] UMILTÀ, M. A. ; ESCOLA, L. ; INTSKIRVELI, I. ; GRAMMONT, F. ; ROCHAT, M. ; CARUANA, F. ; JEZZINI, A. ; GALLESE, V. ; RIZZOLATTI, G.: When pliers become fingers in the monkey motor system. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105 (2008), Februar, Nr. 6, S. 2209 –2213. – URL <http://www.pnas.org/content/105/6/2209.abstract>

- [90] UMILTÀ, M.A. ; KOHLER, E. ; GALLESE, V. ; FOGASSI, L. ; FADIGA, L. ; KEYSERS, C. ; RIZZOLATTI, G.: I Know What You Are Doing: A Neurophysiological Study. In: *Neuron* 31 (2001), Juli, Nr. 1, S. 155–165. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WSS-4C5XKRC-N/2/e5d9700e94c3c208672cab65a3abc66>. – ISSN 0896-6273
- [91] WASSERMANN, Erric M.: Risk and safety of repetitive transcranial magnetic stimulation: report and suggested guidelines from the International Workshop on the Safety of Repetitive Transcranial Magnetic Stimulation, June 5-7, 1996. In: *Electroencephalography and clinical Neurophysiology* 108 (1998), S. 1–16
- [92] WATKINS, K. E. ; STRAFELLA, A. P. ; PAUS, T.: Seeing and hearing speech excites the motor system involved in speech production. In: *Neuropsychologia* 41 (2003), Nr. 8, S. 989–994. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T0D-4811RDF-1/2/f852c78f90c1ef55bc1f4166d58ce40d>. – ISSN 0028-3932
- [93] WHEATON, Lewis A. ; HALLETT, Mark: Ideomotor apraxia: A review. In: *Journal of the Neurological Sciences* 260 (2007), September, Nr. 1-2, S. 1–10. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6T06-4NRMDFG-1/2/0e095e24e3ae9c001356c37ec54883e6>. – ISSN 0022-510X
- [94] WILLEMS, Roel M. ; ÖZYÜREK, Aslı ; HAGOORT, Peter: Differential roles for left inferior frontal and superior temporal cortex in multimodal integration of action and language. In: *NeuroImage* 47 (2009), Oktober, Nr. 4, S. 1992–2004. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WNP-4WDVKS5-2/2/7add9d47710c17e58e06a82ab8aca13e>. – ISSN 1053-8119
- [95] WILSON, Stephen M. ; SAYGIN, Ayse P. ; SERENO, Martin I. ; IACOBONI, Marco: Listening to Speech activates motor areas involved in speech production. In: *Nature Neuroscience* 7 (2004), S. 701–702
- [96] ZABOURA, Nadia: *Das empathische Gehirn: Spiegelneurone als Grundlage menschlicher Kommunikation*. Wiesbaden : VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2009
- [97] ZUBICARAY, Greig de ; POSTLE, Natasha ; MCMAHON, Katie ; MEREDITH, Matthew ; ASHTON, Roderick: Mirror neurons, the representation of word meaning, and the foot of the third left frontal convolution. In: *Brain and Language* 112 (2010), Januar, Nr. 1, S. 77–84. – URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6WC0-4TTNC8T-1/2/c30d7bab0caa4eae8d6e85baea819573>. – ISSN 0093-934X

Anhang

Zusammenfassung

Spiegelneuronen, ursprünglich im Gehirn des Makaken entdeckt und mittlerweile auch am Menschen nachgewiesen, sind aktiv, wenn man eine zielgerichtete Handlung selbst ausführt oder an einem anderen Individuum beobachtet. Die einzelnen Neuronen kodieren dabei keine einzelnen Muskelbewegungen, sondern stets eine Aktion als Ganze, vom Ansatz bis zur Erreichung des Ziels, und dies kontextsensitiv und multimodal. Sie dürften daher mithilfe primär motorischer Prozesse und im Rahmen eines höheren kortikalen Netzwerks grundlegend – vom Greifen zum Begriff – an der Entwicklung und Repräsentation einer körperbasierten Semantik beteiligt sein. Hinzu kommt, dass sie sich in Gehirnregionen befinden, die zentral für das menschliche Sprachvermögen sind: dem Broca-Areal und dem Gyrus supramarginalis.

Diese Arbeit bietet aus neurolinguistischer Perspektive einen umfassenden Überblick über den aktuellen Forschungsstand zu Spiegelneuronen selbst und wie sie mit Sprache und Sprachentwicklung zusammenhängen. Der erste Teil beleuchtet zunächst ihre Entdeckungsgeschichte und Funktionalität. Im zweiten Teil wird ihre Bedeutung für die neuronale Sprachverarbeitung auf Ebene der Phonologie, Semantik und Syntax behandelt. Der dritte Teil schließlich setzt Spiegelneuronen in Bezug zur Onto- und Phylogenese der Sprache und endet mit einer kritischen Bewertung ihrer Rolle für zwischenmenschliche Kommunikation.

Abstract

Mirror neurons, which were firstly discovered in the brains of macaque monkeys and recently in human brains too, are activated during the execution and observation of goal directed actions. However, they do not code single muscle movements but the entire motor action, from its onset to its goal, in a context-sensitive and multi-modal way. That is why these neurons, within higher neural circuits, might be involved in the development and representation of embodied semantics. Moreover, they are located in brain regions crucial for language and speech, i.e. Broca's area and the supramarginal gyrus.

From a neuro-linguistic perspective, this thesis provides a comprehensive overview of current research on mirror neurons and their contribution to language and language development. The first part sheds light on their discovery and function. The next part deals with the relevance of these neurons for neural language processing on phonological, semantic and syntactical levels. Finally, the last part examines their relation to the onto- and phylogenetics of language and ends in a discerning evaluation of the role they might play for human communication.

Kurzbiographie

Matthias Rella, geboren am 14. Februar 1986 in Zwettl/NÖ. Sommer 2004 Matura mit Auszeichnung am Humanistischen Gymnasium Sachsenbrunn in Kirchberg am Wechsel, ab Herbst 2005 Studium der Allgemeinen/Angewandten Sprachwissenschaft mit Schwerpunkt Psycho-, Patho- und Neurolinguistik und ab Herbst 2006 Zweitstudium des Bakkalaureats Informatik (Ausprägungsfach Medieninformatik) an der Universität Wien mit Abschluss im Sommer 2010. Seit Herbst 2010 freier Mitarbeiter am Austrian Institute of Technology im Bereich Digital Memory Engineering.