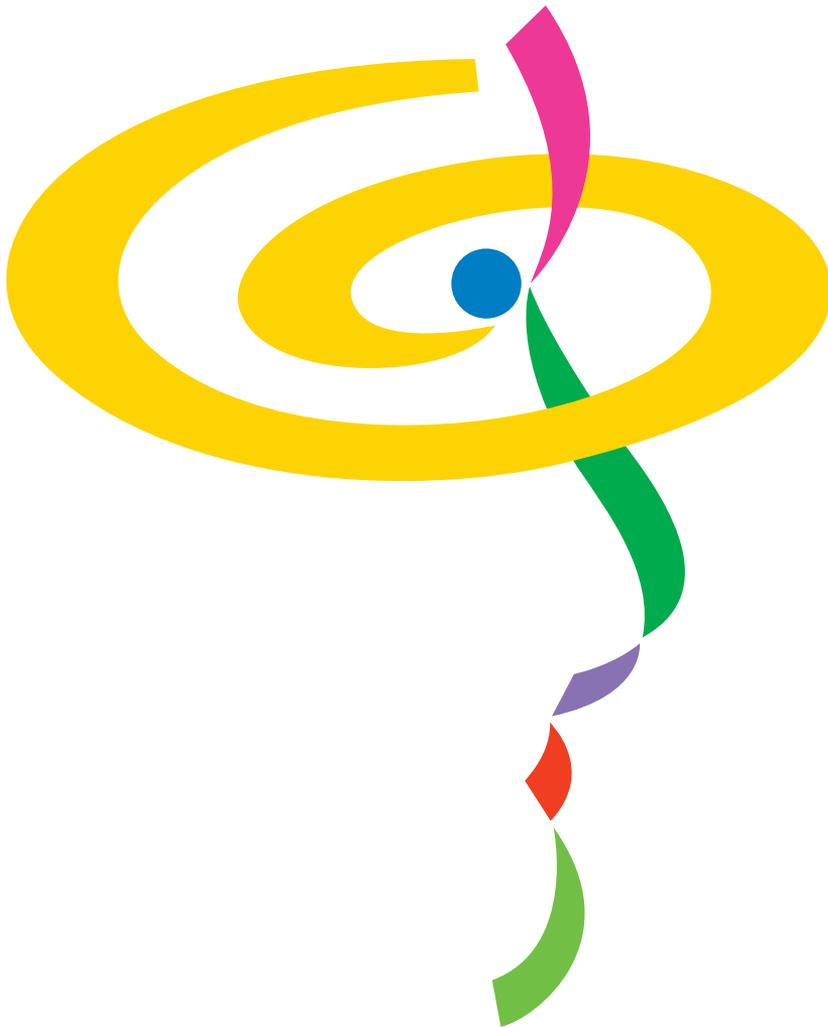




# 13 Lehr-Lern-Forschung und Neurowissenschaften – Erwartungen, Befunde, Forschungsperspektiven



## **Bildungsreform Band 13**

### **Lehr-Lern-Forschung und Neurowissenschaften – Erwartungen, Befunde, Forschungsperspektiven**

#### **Impressum**

##### **Herausgeber**

Bundesministerium  
für Bildung und Forschung (BMBF)  
Referat Publikationen; Internetredaktion  
11055 Berlin

##### **Bestellungen**

Schriftlich an den Herausgeber  
Postfach 30 02 35  
53182 Bonn

oder per

Tel.: 01805-262 302

Fax: 01805-262 303

(0,12 Euro/Min. aus dem deutschen Festnetz)

E-Mail: [books@bmbf.bund.de](mailto:books@bmbf.bund.de)

Internet: <http://www.bmbf.de>

##### **Autoren**

Prof. Dr. Elsbeth Stern (Max-Planck-Institut für Bildungsforschung, Berlin) (verantwortlich)

Roland Grabner, M. Sc. (Universität Graz)

PD Dr. Ralph Schumacher (Humboldt-Universität zu Berlin)

unter Mitarbeit von

Prof. Dr. Christa Neuper (Universität Graz) und

Dipl.-Psych. Henrik Saalbach (Max-Planck-Institut für Bildungsforschung, Berlin)

##### **Umschlaggestaltung**

Helmut Langer

**Bonn, Berlin 2005** (korrigierte und ergänzte Auflage)

Gedruckt auf Recyclingpapier

Elsbeth Stern  
Roland Grabner  
Ralph Schumacher  
unter Mitarbeit von  
Christa Neuper  
Henrik Saalbach

Lehr-Lern-Forschung und  
Neurowissenschaften:  
Erwartungen, Befunde und  
Forschungsperspektiven



# Inhalt

1.	Zielsetzung der Expertise und Übersicht über die Beiträge	5
1.1	Ausgangspunkt	5
1.2	Übersicht über die Beiträge	6
2.	Was suchen und finden wir im Gehirn? Chancen und Grenzen einer neuropsychologischen Lehr-Lern-Forschung	18
2.1	Lernvorgänge im Gehirn – eine faszinierende Perspektive	18
2.2	Auf den Inhalt kommt es an: Analyse von Wissensdomänen als zentrale Aufgabe der Lehr-Lern-Forschung	20
2.3	Gute Lehrer wissen, wie Schüler lernen	21
2.4	Anregende Lernumgebungen	23
3.	Wie verhalten sich neurophysiologische, kognitionswissenschaftliche und pädagogische Erklärungen zueinander? Überlegungen zum Problem der Reduktion von Theorien	24
3.1	Einleitung	24
3.2	Die Verschiedenheit und Autonomie unterschiedlicher Erklärungsebenen	24
3.3	Die Bedeutung neurophysiologischer Untersuchungen für Kognitionswissenschaft und Pädagogik	27
3.4	Die prinzipielle Unterbestimmtheit neurophysiologischer Untersuchungen im Hinblick auf die Lehr-Lern-Forschung	30
3.5	Schlussbetrachtung	33
4.	Bildgebende Verfahren in den kognitiven Neurowissenschaften	35
4.1	Positronen-Emissions-Tomographie (PET)	36
4.2	Magnetresonanztomographie (MRT, MRI)	39
4.3	Funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT, fMRI)	42
4.4	Transcraniale Nahe-Infrarot-Spektroskopie (NIRS)	46
4.5	Elektroencephalographie (EEG)	48
4.6	Magnetoencephalographie (MEG)	53
4.7	Abschließende Bemerkungen	55
5.	Gehirnentwicklung	59
5.1	Hauptprozesse der Gehirnentwicklung	59
5.2	Die Entwicklung von zwei Regionen des cerebralen Kortex: primärer visueller Kortex und mittlerer frontaler Gyrus	62
5.3	Gene und Gehirnentwicklung	65
5.4	Gehirnentwicklung und Erfahrung	65
6.	Die zentrale Exekutive und das Frontalhirn	71
6.1	Das klassische Drei-Komponenten-Modell von Baddeley und Hitch	72
6.2	Arbeitsgedächtniskapazität und kognitive Leistungen	75
6.3	Das Mehr-Komponenten-Modell von Baddeley	77
6.4	Die neuronalen Grundlagen des Arbeitsgedächtnisses	79

7.	Zur Lokalisierbarkeit kognitiver Funktionen	83
8.	Aktivierungsveränderungen durch Lernen	89
8.1	Fazit	94
9.	Das Dopaminsystem	96
10.	Direkte Hirn-Computer-Kommunikation und Neurofeedback: Zur Anwendbarkeit moderner Neurofeedback-Technologie in der Lehr-Lern-Forschung	99
10.1	Grundlagen der Neurofeedback-Forschung	99
10.2	Neurofeedback-Anwendungen im klinischen Bereich	100
10.3	Verbesserung kognitiver Funktionen durch Neurofeedback	101
10.4	Direkte Gehirn-Computer Schnittstellen	102
10.5	Anwendungsmöglichkeiten und Anwendbarkeit in der Lehr- Lern-Forschung	103
11.	Ergebnisse des Workshops „Lehr-Lern-Forschung aus neuro- wissenschaftlicher Perspektive“ im November 2004 in Berlin	105
12.	Resümee und Ausblick: Was können Lehr-Lern-Forschung und Hirnforschung voneinander erwarten?	108
12.1	Lernen als Gegenstand der wissenschaftlichen Forschung	108
12.2	Was den Menschen von anderen Lebewesen unterscheidet: In- stitutionalisiertes Lernen im kulturellen Kontext	112
13.	Jenseits einer unmittelbaren Anwendbarkeit: Mögliche For- schungsfragen, bei denen eine Zusammenarbeit zwischen Neu- rowissenschaften und Lehr-Lern-Forschung wünschenswert ist	118
13.1	Zehn mögliche Forschungsfragen	120
13.2	Abschließende Bewertung und Empfehlungen für die Forschungsförderung	124
	Literatur	126
	Anhang	138
A1	Fragebogen „Lehr-Lern-Forschung aus neurowissenschaft- licher Perspektive“	138
A2	Teilnehmer am Workshop	140
A3	Programm des Workshops	142
A4	Workshop-Materialien	144

# 1. Zielsetzung der Expertise und Übersicht über die Beiträge

## 1.1 Ausgangspunkt

Seitdem Verfahren wie EEG, PET und fMRT Einblicke in die neurophysiologischen Vorgänge bei der Informationsverarbeitung des Menschen ermöglichen, lassen sich sowohl Wissenschaftler als auch Laien von Bildern des denkenden und lernenden Gehirns faszinieren. Die Erforschung des menschlichen Gehirns gehört derzeit weltweit zu den wissenschaftlichen Schwerpunkten. In Deutschland ist noch aus einem weiteren Grund ein großes öffentliches Interesse an der wissenschaftlichen Erforschung des menschlichen Denkens und Lernens zu beobachten: Die in der PISA-Studie endgültig offenkundig gewordenen Probleme unserer Bildungseinrichtungen verlangen dringend nach professionellen Lösungen. Dabei wird zunehmend realisiert, dass in Deutschland wertvolle Jahre mit ideologisch geprägten Debatten über das Schulsystem verbracht wurden, in denen andere Länder unter Berücksichtigung neuerer Erkenntnisse der Lehr-Lern-Forschung ihre Bildungseinrichtungen an die Erfordernisse einer postindustriellen Wissensgesellschaft angepasst haben. Seitdem in dieser Hinsicht auch in Deutschland ein Prozess des Umdenkens eingesetzt hat, schien es für manchen nahe liegend, sich auf die allerneueste Forschungsrichtung zu konzentrieren – nämlich die neurophysiologische Lernforschung. Diese Tendenz wird jedoch von zahlreichen Lehr-Lern-Forschern – und nicht nur von diesen – skeptisch bis sorgenvoll beurteilt. Die bisher vorliegenden Befunde der neurophysiologischen Lernforschung sind nämlich nur selten eindeutig interpretierbar. Wenn überhaupt, lassen sich nur sehr allgemeine Schlussfolgerungen ableiten, die nicht selten den irreführenden Eindruck erwecken, dass eine Verbesserung des schulischen Lernens ohne großen Aufwand zu erreichen sei. Um in Deutschland mittelfristig eine Verbesserung des schulischen Lernens zu erreichen, sollten erprobte Maßnahmen zur Lehrerbildung für möglichst eingegrenzte Inhaltsbereiche zum Einsatz kommen. Auf diese Weise können Lehrer fachspezifisches pädagogisches Inhaltswissen aufbauen, welches bei der Entwicklung und Strukturierung von Lerngelegenheiten sowie bei der Interaktion mit den Schülern nützt.

Jenseits einer praktischen Anwendbarkeit der neurophysiologischen Lernforschung ist die Zeit aber zweifellos reif für die Frage, wie wir mit den Methoden der Hirnforschung Lehr-Lern-Prozesse besser verstehen können. Gegenwärtig können wir Lernfortschritte nur mit Hilfe von Leistungsmessungen feststellen. Das macht aber gerade die Erforschung von sinnstiftendem, verstehendem Lernen so schwer. Diese Form von Lernen braucht Zeit, und der Durchbruch, das Aha-Erlebnis, kommt so unverhofft, dass es nur in Ausnahmefällen der Beobachtung zugänglich ist. Verstehendes Lernen ist das Resultat der Zusammenführung und Umstrukturierung von unterschiedlichen Wissensbereichen. Welche Aktivitäten sich dabei im Gehirn entfalten, bevor es zum geistigen Durchbruch kommt, gehört zu den spannenden Fragen der Zukunft. Das Ziel dieser Expertise besteht darin, Untersuchungen und Paradigmen aus der

neurophysiologischen Forschung zusammenzutragen, die für das schulische Lernen relevant sind, und auf dieser Grundlage weiterführende Forschungsperspektiven zu entwickeln. Ausgeklammert wird allerdings die umfangreiche Forschung zur Lese-Rechtschreib-Schwäche und zur Dyskalkulie. Dass einige Kinder aufgrund abweichender Hirnfunktionen die regulären schulischen Lerngelegenheiten nicht adäquat nutzen können, ist unbestritten. Wie genau diese abweichenden Hirnfunktionen aussehen, wird in zahlreichen Arbeitsgruppen weltweit erforscht. Die Zusammenfassung der Ergebnisse könnte ganze Bände füllen und würde den Rahmen dieser Expertise bei weitem sprengen.<sup>1</sup>

## 1.2 Übersicht über die Beiträge

### **Kapitel 2: Was suchen und finden wir im Gehirn? Chancen und Grenzen einer neurophysiologischen Lehr-Lern-Forschung**

*Wichtige Stichworte:*

- Eigendynamik der Gehirnentwicklung von Kindern.
- Die frühkindliche Gehirnentwicklung stellt keine besonderen Anforderungen an die Umgebung, aber sie reagiert empfindlich auf künstliche Eingriffe und Störungen.
- Kortikale Fehlentwicklungen in den ersten Lebensjahren sind weniger das Resultat von Umweltfaktoren, sondern häufiger das Resultat von Sinnesdysfunktionen.
- Wichtiger als die Bereitstellung von anspruchsvollen Lernumgebungen ist daher im ersten Lebensjahr, dass die Sinnesfunktionen der Kinder in Vorsorgeuntersuchungen geprüft werden.
- Das Ziel der Frühförderung muss sein, die Grundlagen für den Wissenserwerb in Bereiche zu legen, in denen kein privilegiertes Lernen erwartet werden kann.

Auch wenn die Gehirnforschung faszinierende Befunde über die menschliche Informationsverarbeitung liefert, lassen sich für die Gestaltung von vorschulischen und schulischen Lerngelegenheiten nur sehr allgemeine Folgerungen ableiten. Bildungseinrichtungen wurden etabliert, damit Schüler in wenigen Jahren Wissen erwerben und anwenden können, dessen Entwicklung die Menschheit Jahrhunderte oder Jahrtausende gekostet hat. Damit dies gelingt, müssen Lehrer fachspezifisches pädagogisches Inhaltswissen erwerben und zur Aufbereitung von Lerngelegenheiten heranziehen. Erkenntnisse aus der Wissenschaftsgeschichte sowie der kognitiven Psychologie können Lehrern beim Aufbau des fachspezifischen pädagogischen Inhaltswissens weiterhelfen.

---

<sup>1</sup> Konstruktiv-kritische Kommentare zu dem Text kamen dankenswerterweise von Rainer Bösel, Gerald Hüther, Andrea Rodenbeck und Frank Rösler.

### **Kapitel 3: Wie verhalten sich neurophysiologische, kognitionswissenschaftliche und pädagogische Erklärungen zueinander? Überlegungen zum Problem der Reduktion von Theorien**

#### *Wichtige Stichworte:*

- Nicht-Reduzierbarkeit kognitionswissenschaftlicher und pädagogischer Erklärungen auf neurophysiologische Erklärungen.
- Unterschied zwischen privilegiertem und nicht-privilegiertem Lernen.
- Neurophysiologische Untersuchungen beschreiben zwar die Rahmenbedingungen, unter denen erfolgreiches Lernen stattfinden kann, sie sind aber zu unterbestimmt, um selber konkrete Anleitungen für die Gestaltung von Lerngelegenheiten geben zu können.

In diesem Kapitel geht es um die Frage, welche Konsequenzen sich aus neurophysiologischen Untersuchungen des menschlichen Gehirns für kognitionswissenschaftliche und pädagogische Theorien ableiten lassen. Im Rahmen wissenschaftstheoretischer Überlegungen wird dafür argumentiert, dass neurophysiologische Untersuchungen zwar die Rahmenbedingungen beschreiben können, unter denen erfolgreiches Lernen stattfinden kann, dass sie aber aus prinzipiellen Gründen zu unterbestimmt sind, um konkrete Anleitungen für die Gestaltung von Lerngelegenheiten bzw. des Schulunterrichts geben zu können. Im ersten Abschnitt wird erläutert, warum es sich bei kognitionswissenschaftlichen und pädagogischen Theorien um eigenständige Erklärungsebenen handelt, die sich grundsätzlich nicht vollständig auf neurophysiologische Erklärungen reduzieren lassen. In diesem Zusammenhang wird ebenfalls das Konzept der Supervenienz dargestellt, mit dessen Hilfe die besondere Art der Abhängigkeit charakterisiert wird, die für das Verhältnis geistiger Zustände (Überzeugungen, Absichten etc.) zu Hirnzuständen (neuronalen Aktivierungsmustern, Verknüpfungen von Neuronen etc.) kennzeichnend ist. Der zweite Abschnitt konzentriert sich auf die Bedeutung neurophysiologischer Untersuchungen für Kognitionswissenschaft und Pädagogik. Da geistige Zustände stets durch bestimmte Hirnzustände realisiert sind, lassen sich im Rahmen neurophysiologischer Untersuchungen natürlich eine Reihe von Anleitungen formulieren, die in kognitionswissenschaftlicher und pädagogischer Hinsicht relevant sind. So ist es zum Beispiel im Prinzip möglich, bestimmte Hirnzustände zur frühzeitigen Diagnose bestimmter kognitiver Entwicklungsstörungen heranzuziehen, die sich erst in einem späteren Entwicklungsstadium im Verhalten manifestieren. Auf diese Weise können neurophysiologische Untersuchungen dazu beitragen, Entwicklungsstörungen frühzeitig zu erkennen, sodass man rechtzeitig Fördermaßnahmen ergreifen kann, um zu erwartenden Fehlentwicklungen vorzubeugen. In diesen Fällen kann uns die Hirnforschung zwar etwas darüber sagen, unter welchen neurophysiologischen Bedingungen bestimmte Fördermaßnahmen ergriffen werden müssen. Aber wie diese Fördermaßnahmen im Einzelnen gestaltet werden müssen, kann nur im Rahmen kognitionswissenschaftlicher und pädagogischer Theorien ausgearbeitet werden. Im dritten Abschnitt wird dafür argumentiert, dass neurophysiologische Untersuchungen im Hinblick auf die Lehr-Lern-Forschung aus prinzipiellen Gründen unterbestimmt sind, weil diese Untersuchungen das Vorwissen der Lernenden sowie weitere kulturelle Faktoren nicht berücksichtigen können, die für die Gestaltung von Lerngelegenheiten entschei-

dend sind. Für diese Argumentation ist die Unterscheidung zwischen privilegiertem und nicht-privilegiertem Lernen von Bedeutung. Privilegiertes Lernen liegt dann vor, wenn durch biologische Entwicklungsprogramme festgelegt ist, durch welche Umweltbedingungen bestimmte Lernprozesse ausgelöst werden und auf welche Weise diese Lernprozesse anschließend ablaufen. Hingegen fällt unter den Begriff des nicht-privilegierten Lernens der Erwerb von Inhalten und Fähigkeiten wie Lesen, Schreiben und Rechnen, auf die uns die Evolution noch nicht vorbereiten konnte und um die es im Schulunterricht geht. Um zu wissen, wie man Lerngelegenheiten bzw. den Schulunterricht gestalten muss, um damit die Bedingungen für das nicht-privilegierte Lernen zu verbessern, muss vor allem das Vorwissen der Lernenden berücksichtigt und zu bestimmten Lernzielen und Anforderungen in Beziehung gesetzt werden. Da dieses Vorwissen ebenso wenig wie die Anforderungen und Lernziele im Zuge neurophysiologischer Beschreibungen des Gehirns erfasst werden kann, ist die Hirnforschung prinzipiell zu unterbestimmt, um konkrete Anleitung zur Gestaltung von Lerngelegenheiten zu liefern. Das menschliche Gehirn stellt nämlich im Kontext des nicht-privilegierten Lernens nur ein Teilsystem dar, über das hinausgegangen werden muss, um weitere Faktoren wie das Vorwissen zu berücksichtigen, die für das nicht-privilegierte Lernen von Bedeutung sind.

#### **Kapitel 4: Bildgebende Verfahren in den kognitiven Neurowissenschaften**

*Wichtige Stichworte:*

- PET, MRT und fMRT sind für die Erforschung von schulischem Lernen nicht geeignet, weil sie aufgrund mangelnder Bewegungsfreiheit, hoher Strahlenbelastung oder hoher Geräuschkentwicklung bei Kindern nicht oder nur sehr eingeschränkt anwendbar sind.
- Bildgebenden Verfahren ist gemeinsam, dass sie nur in abgeschirmten Laboren und nicht in schulischen oder schulnahen Lernumgebungen angewendet werden können.

Eine zentrale Voraussetzung für die Identifikation der neuronalen Korrelate kognitiver Funktionen besteht natürlich darin, dass es geeignete bildgebende Verfahren gibt, die die Struktur des Gehirns sowie dessen Funktionen in vivo abbilden können. In diesem Kapitel wird eine Übersicht über die derzeit verfügbaren bildgebenden Verfahren gegeben, wozu die folgenden Methoden zählen: (1) Positronen-Emissions-Tomographie (PET), (2) Magnetresonanztomographie (MRT), (3) funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT), (4) Transcraniale Nahe-Infrarot-Spektroskopie (NIRS), (5) Elektroencephalographie (EEG), (6) Magnetoencephalographie (MEG). Diese Übersicht ist nach den folgenden Aspekten gegliedert: Grundlagen (Art und Ursprung des gemessenen Biosignals; Grundprinzip der Messung), räumliche und zeitliche Auflösung, praktische Anwendungsaspekte, Aussagekraft (Validität der Methode) sowie einer abschließenden Diskussion der Vor- und Nachteile. Am Ende des Kapitels findet sich zudem eine tabellarische Übersicht über die wesentlichen Merkmale der dargestellten bildgebenden Verfahren. PET, MRT und fMRT sind entweder aufgrund der hohen Strahlenbelastung oder aufgrund der hohen Geräuschkentwicklung bei Kindern nicht oder nur sehr eingeschränkt anwendbar und können daher in der Lehr-Lern-Forschung nicht eingesetzt werden. Andere Ver-

fahren wie NIRS, EEG und MEG haben zwar den Vorteil, dass sie bei Kindern anwendbar und auch für viele kognitive Aufgaben einsetzbar sind. Aber sie haben dafür den Nachteil, dass sie sich entweder noch in der Entwicklung befinden (NIRS), eine vergleichsweise geringe räumliche Auflösung bieten (EEG) oder mit sehr hohen Kosten verbunden sind (MEG). Zudem muss die Erfassung neurophysiologischer Daten gegenwärtig noch in abgeschirmten Laboren stattfinden, sodass kognitive Prozesse und deren neuronale Korrelate noch nicht in schulischen oder schulnahen Lernumgebungen erfasst werden können. Abschließend wird in diesem Kapitel hervorgehoben, dass es keinesfalls ausreicht, Kindern oder Erwachsenen während kognitiver Aktivität „ins Gehirn zu schauen“, sondern dass diese Verfahren nur dann aussagekräftige Ergebnisse liefern können, wenn sorgfältig geplante Untersuchungsdesigns zur Anwendung kommen.

## Kapitel 5: Gehirnentwicklung

*Wichtige Stichworte:*

- Gehirnentwicklung besteht sowohl im Wachstum neuer synaptischer Verbindungen als auch in der Beseitigung nicht benötigter Verbindungen.
- Erfahrungserwartende und erfahrungsabhängige Plastizität des Gehirns.
- Kritische oder sensible Phasen in der Gehirnentwicklung sind nur bei genetisch gesteuerten Entwicklungsprozessen zu erwarten.
- Die in den kritischen und sensiblen Phasen benötigten Stimuli sind universell verfügbar und im Allgemeinen in jeder normalen Umwelt vorhanden.

Dieses Kapitel führt in die Prozesse der Gehirnentwicklung ein, die für die pädagogische Arbeit mit dem sich entwickelnden Menschen relevant sind. Im ersten Abschnitt wird zunächst ein allgemeiner Überblick über die auf der Ebene der Nervenzellen ablaufenden Grundprozesse der Gehirnentwicklung gegeben. Anschließend befasst sich der zweite Abschnitt mit der Entwicklung von zwei bestimmten Regionen des cerebralen Kortex, nämlich mit dem primären visuellen Kortex und dem mittleren frontalen Gyrus. Diese beiden Regionen, die bislang von allen menschlichen Hirnarealen am besten untersucht sind, sind besonders interessant, weil sich an ihnen wichtige Unterschiede zwischen den Entwicklungsverläufen in unterschiedlichen Hirnregionen darstellen lassen. Während nämlich zum Zeitpunkt der Geburt die Neuronendichte beider Areale noch sehr ähnlich ist, nimmt die Dichte des frontalen Areals deutlich langsamer ab als die Dichte des visuellen Kortex. In diesem Zusammenhang wird zudem verdeutlicht, dass nicht nur die Bildung neuer synaptischer Verbindungen zwischen den Nervenzellen, sondern auch die Eliminierung nicht benötigter Synapsenverbindungen für die Entwicklung des Gehirns von entscheidender Bedeutung ist. Gehirnentwicklung findet also nicht nur statt, indem die Synapsendichte steigt, sondern auch, indem wichtige synaptische Verknüpfungen (durch Ummantelung mit Myelin) verstärkt und unnötige Verbindungen wieder beseitigt werden. Im dritten und vierten Abschnitt geht es um äußere Faktoren, die die Gehirnentwicklung beeinflussen. Besonders wichtig ist dabei die Unterscheidung zwischen der erfahrungserwartenden und der erfahrungsabhängigen Plastizität des Gehirns. Die erfahrungserwartende Plastizität des Gehirns beruht auf genetisch festgelegten Entwicklungsmechanismen, die bestimmte äußere

Stimuli benötigen, um in Gang gesetzt zu werden. Ein Beispiel hierfür sind die Mechanismen, die die Entwicklung des Sehvermögens regeln, indem sie die Verknüpfung von Neuronen im visuellen Kortex steuern. Diese Entwicklungsmechanismen werden nämlich nur dann aktiviert, wenn die betreffenden Personen bestimmte visuelle Eindrücke erhalten. Andernfalls bleiben die betreffenden Entwicklungen aus. Ein charakteristisches Merkmal der erfahrungserwartenden Plastizität ist daher ihre Altersabhängigkeit und Irreversibilität. Nur wenn das Gehirn in einem genetisch festgelegten Entwicklungsabschnitt bestimmte Stimuli erhält, finden bestimmte Entwicklungsprozesse statt. Je nachdem, wie ausgeprägt diese Altersabhängigkeit und Irreversibilität sind, bezeichnet man diese Zeitfenster entweder als „kritische“ oder als „sensible Phasen“: Lassen sich bestimmte Entwicklungsdefizite zu einem späteren Zeitpunkt grundsätzlich nicht mehr nachholen, spricht man von kritischen Phasen. Wird hingegen eine bestimmte Entwicklung des Gehirns in einem bestimmten Entwicklungsabschnitt lediglich besonders begünstigt, sodass sie zu einem späteren Zeitpunkt – wenn auch mit größerem Lernaufwand – im Prinzip nachgeholt werden kann, dann bezeichnet man dieses Zeitfenster als sensible Phase. In diesem Zusammenhang müssen zwei besonders wichtige Punkte in Bezug auf die kritischen Phasen hervorgehoben werden: (1) Kritische Phasen sind nur bei Entwicklungsprozessen zu erwarten, die genetisch festgelegt sind. Aus diesem Grund kann es kritische Phasen nur für die Entwicklung grundlegender Vermögen wie beispielsweise den Fähigkeiten zur Unterscheidung von Sprachlauten oder Gesichtern sowie der Fähigkeit zum dreidimensionalen Sehen geben. Kritische Phasen gibt es also nur für das privilegierte Lernen, bei dem biologisch festgelegt ist, welche Faktoren bestimmte Lernprozesse auslösen und wie diese Lernprozesse anschließend ablaufen. Hingegen ist das nicht-privilegierte Lernen, um das es im Schulunterricht geht, davon grundsätzlich nicht betroffen. Denn auf den Erwerb der Inhalte, um die es im Schulunterricht geht – wie Lesen, Schreiben und Rechnen – hat die Evolution unser Gehirn gar nicht vorbereiten können, weil es diese Kulturtechniken erst seit einem entwicklungs geschichtlich relativ kurzen Zeitraum gibt. (2) Bei den Stimuli, die Organismen innerhalb der kritischen Phasen erhalten müssen, damit bestimmte Entwicklungsmechanismen in Gang gesetzt werden, handelt es sich um universell verfügbare Reize, die in jeder normalen Umwelt vorkommen. Diese Reize fehlen nur dann, wenn Organismen unter extrem depravierten Bedingungen gehalten werden – wie zum Beispiel in den Experimenten mit jungen Katzen, bei denen sich der visuelle Kortex nicht normal entwickelte, weil ihnen in der kritischen Phase die Augen zugeklebt wurden. Aufgrund der universellen Verfügbarkeit dieser Stimuli muss man sich also nicht aktiv darum bemühen, Kindern während der kritischen bzw. sensiblen Phasen besonders viele Reize einer bestimmten Art zu präsentieren. Man muss aber auch darauf achten, dass ihnen diese Reize nicht vorenthalten werden, weil es sonst zu irreversiblen Fehlentwicklungen kommen kann – wie dies zum Beispiel der Fall ist, wenn Säuglingen und Kleinkindern während der Entwicklung des visuellen Kortex bei Operationen über längere Zeiträume die Augen abgedeckt werden oder wenn während der Entwicklung der für das Hören zuständigen Hirnareale Mittelohrentzündungen unerkannt bleiben. Im Unterschied zur erfahrungserwartenden Plastizität des Gehirns, die genetisch bestimmt ist und daher interindividuell sehr ähnlich ab-

läuft, ist die erfahrungsabhängige Plastizität nicht auf bestimmte Zeitfenster festgelegt. Am Ende dieses Kapitels werden eine Reihe von Tierversuchen dargestellt, die zeigen, wie sich die Organisation der Nervenzellen in Abhängigkeit von verschiedenen Erfahrungen in unterschiedlicher Weise verändert.

## **Kapitel 6: Die zentrale Exekutive und das Frontalhirn**

*Wichtige Stichworte:*

- Drei-Komponenten-Modell des Arbeitsgedächtnisses.
- Erklärung von Unterschieden in der kognitiven Leistungsfähigkeit durch Unterschiede in der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses.
- Die Arbeitsgedächtniskapazität ist der beste Prädiktor für Intelligenz.
- Lokalisierung der zentralen Exekutive im Frontalhirn.

Eine zentrale Fragestellung der Kognitionspsychologie besteht darin, wie man die Prozesse der Informationsverarbeitung im Gehirn modellieren muss, um sowohl kognitive Leistungen als auch Leistungsstörungen erklären zu können. Die derzeit beste verfügbare Theorie zur Beantwortung dieser Frage ist das Drei-Komponenten-Modell des Arbeitsgedächtnisses, mit dem die vorübergehende Speicherung und Verarbeitung von Informationen erklärt wird. Nach diesem Modell besteht das Arbeitsgedächtnis aus einem zentralen Exekutivsystem sowie aus zwei abhängigen Subsystemen, nämlich der so genannten „phonologischen Schleife“ und dem „visuell-räumlichen Skizzenblock“. Während die phonologische Schleife die Funktion besitzt, sprachlich bzw. phonologisch kodierte Informationen vorübergehend zu speichern und zu verarbeiten, dient der visuell-räumliche Skizzenblock zur Speicherung und Verarbeitung visueller und räumlicher Informationen. Die zentrale Exekutive ist das Steuerorgan, das unter anderem die Interaktion der beiden genannten Teilsysteme regelt, wobei sie wesentlich dafür verantwortlich ist zu kontrollieren, ob die jeweiligen Ziele durch mentale Operationen auf effiziente Weise erreicht werden. Die zentrale Exekutive wird daher als die Grundlage komplexer kognitiver Leistungen angesehen. Das Drei-Komponenten-Modell wird dazu herangezogen, um die Unterschiede zwischen der kognitiven Leistungsfähigkeit verschiedener Personen mit den Unterschieden ihrer Arbeitsgedächtniskapazität zu erklären. Auf der Basis von Tests, mit denen zunächst die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses gemessen wurde, konnte nämlich festgestellt werden, dass ein enger Zusammenhang zwischen dieser Kapazität und bestimmten kognitiven Leistungen – wie zum Beispiel Lese- und Sprachverständnis, rechnerisches und schlussfolgerndes Denken, Vokabellernen, räumliches Vorstellungsvermögen – besteht. Leistungsunterschiede in diesen Bereichen lassen sich also mit Unterschieden in der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses erklären. Die Arbeitsgedächtniskapazität ist damit der beste Prädiktor für Intelligenz. In der Hirnforschung hat man sich bemüht, die neuronalen Korrelate dieses Modells des Arbeitsgedächtnisses zu identifizieren, indem man die einzelnen Funktionen dieses Modells im Gehirn lokalisiert. Beispielsweise ließ sich durch Untersuchung von Patienten, die aufgrund verschiedener Gehirnläsionen unterschiedliche kognitive Defizite zeigten, nachweisen, dass Kurz- und Langzeitgedächtnis im Gehirn in unterschiedlichen Bereichen angesiedelt sind. Während neurophysiologische Belege dafür sprechen, dass sich die phonologische Schleife in der linken Hemisphäre der

Großhirnrinde befindet, wird die zentrale Exekutive im Frontalhirn lokalisiert, weil Schädigungen dieses Bereichs zu kognitiven Defiziten in den folgenden Bereichen führen: Aufmerksamkeit, motorische Kontrolle, räumliche Orientierung, Kurzzeitgedächtnis, Lernen, Kreativität, schlussfolgerndes Denken und zielgerichtetes Handeln. Darüber hinaus konnte mit bildgebenden Verfahren nachgewiesen werden, dass bei diesen kognitiven Leistungen das Frontalhirn besonders aktiv ist.

## Kapitel 7: Zur Lokalisierbarkeit kognitiver Funktionen

*Wichtige Stichworte:*

- Unterschiede hinsichtlich der Lokalisierbarkeit grundlegender und höherer kognitiver Funktionen.
- Bei höheren kognitiven Funktionen spricht die Überlappung der aktivierten Gehirnregionen dagegen, einem bestimmten Hirnareal genau eine kognitive Funktion zuzuordnen.
- Die auf der psychologischen Ebene differenzierbaren höheren kognitiven Funktionen haben keine eindeutigen neuronalen Entsprechungen.
- Ein und derselbe Gehirnzustand kann als Teil eines Netzwerks in Abhängigkeit von anderen aktiven Regionen unterschiedliche Funktionen annehmen.
- Neurophysiologische Indikatoren für verschiedene Problemlösungsstrategien sowie für Lernprozesse.

In diesem Kapitel geht es um die Frage, ob sich nicht nur das universell anwendbare Arbeitsgedächtnis, sondern auch qualitativ differenzierbare kognitive Funktionen – wie zum Beispiel mathematische Leistungen – im Gehirn lokalisieren lassen, indem man ihnen neuronale Entsprechungen eindeutig zuordnet. Verhält es sich beispielsweise so, dass bei mathematischen Leistungen andere Hirnregionen beteiligt sind als beim Textverstehen? Dies könnte für die Lehr-Lern-Forschung von Bedeutung sein. Denn wenn dies tatsächlich der Fall wäre, dann könnte man durch neurophysiologische Untersuchungen zum Beispiel überprüfen, ob Schüler bei bestimmten Aufgabentypen bereits adäquate Lösungsstrategien einsetzen oder versuchen, die Lösung auf suboptimalem Weg zu erreichen. Die Voraussetzung für eine solche Untersuchung besteht natürlich darin, dass es für eine bestimmte kognitive Leistung ein korrespondierendes neuronales Aktivierungsmuster gibt, das als Indikator für eine bestimmte Art des Vorgehens beim Problemlösen verwendet werden kann. Zahlreiche Untersuchungen zeigen aber, dass es durchaus fraglich ist, ob man alle psychischen Prozesse und Funktionen bestimmten Hirnarealen eindeutig zuordnen kann oder ob möglicherweise beträchtliche Unterschiede in der Lokalisierbarkeit zwischen grundlegenden Funktionen (z.B. Farbwahrnehmung, motorische Prozesse etc.) und höheren kognitiven Funktionen existieren – sei es bei einer Gliederung dieser Funktionen nach inhaltlichen Gesichtspunkten (verbal, numerisch, figural, räumlich etc.) oder nach den involvierten Prozessen (Aufmerksamkeit, Gedächtnis, schlussfolgerndes Denken etc.). Diese höheren kognitiven Funktionen lassen sich nämlich im Unterschied zu den grundlegenden Funktionen nicht eindeutig bestimmten Hirnregionen zuordnen. Die neurophysiologischen Befunde sprechen also gegen das so genannte „Schrankmodell“ des Ge-

hirns, wonach es für jede kognitive Funktion genau eine Schublade gibt. Außerdem muss beachtet werden, dass selbst die Zuordnung bestimmter grundlegender kognitiver Funktionen zu bestimmten Hirnarealen nur bedeutet, dass diese Areale an bestimmten Leistungen systematisch beteiligt sind. Aber das heißt nicht, dass ausschließlich diese Areale beteiligt sind. Nicht zuletzt wegen der starken Vernetzung verschiedener Hirnregionen kann davon ausgegangen werden, dass jede komplexe kognitive Leistung das koordinierte Zusammenspiel verschiedener Areale erfordert. Verschiedene Studien zur Aufmerksamkeit, Wahrnehmung, Vorstellung und Sprache belegen, dass nur sehr allgemeine topographische Zuordnungen möglich sind. Beispielsweise konnte gezeigt werden, dass beim Lösen von Aufmerksamkeits- und Arbeitsgedächtnisaufgaben vorwiegend präfrontale und parietale Regionen aktiv sind. Aber auch hier spricht der Umstand, dass die bei unterschiedlichen kognitiven Aufgaben aktivierten Gehirnregionen deutlich überlappen, dagegen, einem bestimmten Hirnareal genau eine kognitive Funktion zuzuordnen. Ein weiteres Beispiel für die uneindeutige Korrespondenz zwischen kognitiver Funktion und Gehirnregion ist das so genannte Broca-Areal, das nicht nur bei der Sprachproduktion und beim Sprachverstehen, sondern auch beim Erleben von Musik, bei der Rhythmuswahrnehmung, beim Vorstellen von Bewegungsabläufen sowie bei visuell-räumlichen Leistungen aktiv ist. Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass die auf der psychologischen Ebene differenzierbaren höheren kognitiven Funktionen keine eindeutigen neuronalen Entsprechungen haben und dass ein und derselbe Gehirnzustand als Teil eines Netzwerks in Abhängigkeit von anderen aktiven Regionen unterschiedliche Funktionen annehmen kann. Einen Ausgangspunkt für die Anwendung bildgebender Verfahren in der Lehr-Lern-Forschung zur Lokalisierung kognitiver Funktionen im Gehirn stellt aber möglicherweise die recht klare Abgrenzung verbaler Informationsverarbeitung von visuell-räumlichem Denken dar. Dieser Unterschied könnte möglicherweise dazu herangezogen werden, um auf der neurophysiologischen Ebene zum Beispiel unterschiedliche Strategien beim Lösen von Mathematikaufgaben zu identifizieren, die auf der Verhaltensebene nicht auseinander gehalten werden können. Da außerdem bekannt ist, dass sich die Aktivierungsmuster im Gehirn in Abhängigkeit von Lernen verändern, ist ebenfalls die Entwicklung von neurophysiologischen Indikatoren für Lernprozesse denkbar.

## **Kapitel 8: Aktivierungsveränderungen durch Lernen**

*Wichtige Stichworte:*

- In der Regel führen Lernprozesse zu einer Abnahme der Gehirnaktivierung.
- In manchen Fällen führt Lernen auch zu einer Aktivierungsverlagerung.
- Das Ausmaß der Aktivierungsabnahme korreliert positiv mit der kognitiven Leistungssteigerung.

Ein zentrales Merkmal von Lernprozessen besteht im Übergang von kontrollierter zu automatisierter Informationsverarbeitung. Welche Veränderungen entsprechen diesem Übergang auf der neurophysiologischen Ebene? Die Frage nach den neuronalen Korrelaten von Lernprozessen lässt sich in die folgenden drei Fragestellungen aufgliedern: (1) Wie verändert sich das Aktivierungsausmaß infolge von Lernprozessen? (2) Wie verändert sich das topographische Aktivie-

rungsmuster infolge von Lernprozessen? (3) Womit korrelieren die Aktivierungsänderungen? Die erste Frage kann auf der Basis neurophysiologischer Untersuchungen vergleichsweise gut beantwortet werden. Es hat sich nämlich gezeigt, dass Lernen in der Regel zu einer Abnahme der Aktivierung führt. Der Umstand, dass mit weniger Aktivierung eine bessere Leistung erzielt wird, lässt sich durch eine Steigerung der neuronalen Effizienz erklären, die dadurch zu Stande kommt, dass nur noch aufgabenrelevante Regionen aktiviert werden. In Bezug auf die zweite Frage hat sich gezeigt, dass in manchen Fällen eine Aktivierungsverlagerung – zum Beispiel von den präfrontalen Regionen hin zu den für die jeweiligen Aufgaben relevanten Arealen – stattfindet. Hinsichtlich der dritten Frage haben Untersuchungen ergeben, dass ein positiver Zusammenhang zwischen dem Ausmaß der Aktivierungsabnahme und der Leistungssteigerung besteht. Die Personen mit der größten Leistungssteigerung wiesen also die stärksten Aktivierungsabnahmen auf. Die Aktivierungsabnahme als neurophysiologisches Korrelat des Lernens ist damit auch ein Indikator für interindividuelle Unterschiede beim Lernerfolg. Lassen sich diese Ergebnisse, die überwiegend aus der Untersuchung kurzer Lernphasen bei der Automatisierung einfacher kognitiver Aktivitäten stammen, auch auf längerfristige Lernphasen übertragen? Dies wäre für die Lehr-Lern-Forschung besonders interessant, denn schulisches Lernen findet überwiegend in längeren Zeiträumen statt. Da es aber bisher nur wenige Untersuchungen gibt, die Rückschlüsse auf die Auswirkungen längerfristigen Lernens auf neurophysiologische Veränderungen erlauben, ist die Generalisierbarkeit dieser Befunde bislang fraglich. Die Erforschung der neuronalen Grundlagen von Lernprozessen steht also noch am Anfang. Eine interessante Ausnahme stellt eine Studie zu den Gehirnaktivierungsmustern bei Analphabeten und Alphabeten dar, denen die Aufgabe gestellt wurde, sich verschiedene Pseudowörter zu merken. Es zeigte sich nämlich, dass sich die Unterschiede in bestimmten kognitiven Leistungen in unterschiedlichen Aktivierungsmustern widerspiegeln.

## Kapitel 9: Das Dopaminsystem

*Wichtige Stichworte:*

- Dopamin ist ein Neurotransmitter, der u.a. für die Speicherung von Lerninhalten im Gedächtnis wichtig ist.
- Dopaminerge Neuronen werden durch Belohnungsreize aktiviert.
- Bisherige Untersuchungen zur Rolle des Dopaminsystems beim Lernen stützen sich auf Tierversuche, die Ergebnisse sind daher auf menschliches Lernen nicht ohne weiteres übertragbar.

Das Dopamin ist ein Neurotransmitter, der nach dem gegenwärtigen Forschungsstand vor allem mit motorischen Prozessen sowie mit Motivations- und Gedächtnisprozessen in Verbindung gebracht wird. In Tierversuchen konnte gezeigt werden, dass dopaminerge Neuronen vor allem dann aktiviert werden, wenn Belohnungsreize dargeboten werden. Bleibt die Belohnung hingegen aus, dann wird die Aktivität der dopaminergen Neuronen gehemmt. Diese Reaktionen sind wichtig für die Speicherung von Lerninhalten im Gedächtnis. Die bisherigen Ergebnisse in Bezug auf die Rolle des Dopaminsystems für Lern- und Gedächtnisprozesse stützen sich allerdings meist auf Tierversuche, bei denen

„Lernen“ in erster Linie Konditionierungsprozesse umfasst. Aus diesem Grund ist es unklar, ob und in welcher Weise diese Ergebnisse auf den Bereich des schulischen Lernens übertragbar sind. Auf dem jetzigen Forschungsstand lassen sich daher aus den vorliegenden Untersuchungen zum Dopaminsystem noch keine Konsequenzen für die Lehr-Lern-Forschung ableiten.

### **Kapitel 10: Direkte Hirn-Computer-Kommunikation und Neurofeedback: Zur Anwendbarkeit moderner Neurofeedback-Technologie in der Lehr-Lern-Forschung**

*Wichtige Stichworte:*

- Mit der modernen Neurofeedback-Technologie lassen sich über eine Gehirn-Computer-Schnittstelle durch Gedanken z.B. Roboter, Rollstühle oder Computercursor steuern.
- Diese Technologie wird bei Menschen mit pathologischen Störungen eingesetzt, um durch Selbstregulation Störungsmuster in der eigenen Hirnaktivität zu beseitigen.
- Es ist eine interessante offene Forschungsfrage, ob sich z.B. durch EEG-Feedback kognitive Leistungsverbesserungen herbeiführen lassen.

In diesem Kapitel geht es um die moderne Neurofeedback-Technologie, mit der über eine Gehirn-Computer-Schnittstelle durch Gedanken zum Beispiel Roboter, Rollstühle oder Computercursor gesteuert werden können. Im Mittelpunkt steht die Frage, ob sich Gehirnaktivitäten so beeinflussen lassen, dass Lernvorgänge effizienter ablaufen. Wäre dies möglich, dann ließe sich das Gehirn auch unspezifisch auf das Lernen vorbereiten. Die Neurofeedback-Technologie beruht darauf, dass die eigene Gehirnaktivität beeinflusst wird, indem die elektrische Gehirnaktivität kontinuierlich erfasst und in Form von visuellen oder akustischen Signalen rückgemeldet wird. Beispielsweise lässt sich durch EEG-Signale ein Computercursor steuern, indem man die eigene Gehirntätigkeit – durch unbewusst bleibende Prozesse – gezielt beeinflusst. Diese Technologie lässt sich bei pathologischen Fällen wie bei Epilepsie, Aufmerksamkeitsstörungen und Hyperaktivität einsetzen, indem die betroffenen Personen trainiert werden, beim Auftreten bestimmter Störungsmuster in der eigenen Hirnaktivierung durch Selbstregulation „normale“ Aktivierungsmuster herzustellen. Es gibt zwar bislang nur wenige Studien, die sich mit der Wirkung von EEG-Feedback auf kognitive Leistungen befassen, aber es scheint möglich zu sein, durch EEG-Feedback Leistungsverbesserungen herbeizuführen. Es wäre daher interessant, durch weitere Untersuchungen in dieser Richtung herauszufinden, ob direkte Gehirn-Computer-Schnittstellen eine neue Form des Lernens ermöglichen, die ergänzend zum Schulunterricht angeboten werden könnte.

### **Kapitel 11: Ergebnisse des Workshops „Lehr-Lern-Forschung aus neurowissenschaftlicher Perspektive“ im November 2004 in Berlin**

Im Rahmen der Expertiseerstellung wurde vom 19. bis 20. November 2004 in Berlin ein Workshop veranstaltet, zu welchem Wissenschaftler aus verschiedenen Forschungsdisziplinen eingeladen wurden, wissenschaftliche Wunschprojekte mit Implikationen für schulisches Lernen unter Verwendung von neurowissenschaftlichen Methoden zu skizzieren und zu diskutieren. Zum Teilneh-

merkreis zählten: (a) Hirnforscher, die über umfangreiche Erfahrung in der Interpretation von bildgebenden Verfahren verfügen, (b) Kognitionsforscher, die sich mit dem Erwerb und der Nutzung von Wissen befassen und (c) Fachdidaktiker und Erziehungswissenschaftler, deren Forschungsgebiet die Gestaltung von Lerngelegenheiten in zentralen Inhaltsgebieten darstellt. Ziel des Workshops war es, die skizzierten Forschungsperspektiven zur Zusammenarbeit zwischen Lehr-Lern-Forschern und Hirnforschern weiter zu konkretisieren und mögliche interdisziplinäre Forschungsverbunde zu konstituieren. In diesem Kapitel sind die am Workshop teilnehmenden Wissenschaftler angeführt; überdies werden die im Rahmen des Workshops verwendeten Materialien vorgestellt.

## **Kapitel 12: Resümee und Ausblick: Was können Lehr-Lern-Forschung und Hirnforschung voneinander erwarten?**

### *Wichtige Stichworte:*

- In Tierversuchen werden gegenwärtig die neuronalen Grundlagen des Lernens durch Konditionierung erforscht, und es ist davon auszugehen, dass viele dieser Erkenntnisse auch auf das Lernen durch Konditionierung beim Menschen übertragbar sind.
- In der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit schulischem Lernen steht nicht Konditionierung im Mittelpunkt, sondern verständnisvolles, sinnstiftendes Lernen auf der Grundlage von Symbolsystemen. Über die neuronalen Grundlagen dieser weitgehend dem Menschen vorbehaltenen Form des Lernens ist wenig bekannt.
- In der empirischen Lehr-Lern-Forschung liegen allgemein anerkannte Ergebnisse über die Rahmenbedingungen von verständnisvollem Lernen und gutem Unterricht vor, die für die jeweiligen Inhaltsbereiche umgesetzt werden müssen.

Es werden noch einmal prinzipielle Fragen erörtert, und obwohl es auf die vorangegangenen Kapitel Bezug nimmt, ist es auch für sich genommen lesbar. Zunächst wird betont, dass es sich bei neurophysiologischen Untersuchungen an Tieren um Lernen durch Konditionierung handelt. Diese Form des Lernens gibt es auch bei Menschen im Allgemeinen und bei Schulkindern im Besonderen, aber Ziel der Schule ist nicht die Konditionierung, sondern das verständnisvolle Lernen. Allein deshalb spielen Erkenntnisse über die neurophysiologischen Grundlagen des Konditionierens in der Lehr-Lern-Forschung eine untergeordnete Rolle. Schulisches Lernen bedeutet die Übernahme von kulturell tradiertem Wissen, welches an Symbolsysteme wie Sprache, Schrift, Bilder und mathematische Zeichen gebunden ist. Über die hirnpfysiologischen Grundlagen dieser dem Menschen vorbehaltenen Form des Lernens ist vergleichsweise wenig bekannt. Zwar können neuere hirnpfysiologische Methoden Einblicke in das Gehirn bieten, während ein Mensch liest, rechnet oder über naturwissenschaftliche Gesetzmäßigkeiten nachdenkt, aber für sich genommen sind solche Daten wenig aussagekräftig. Gleichzeitig wurden in der empirischen Lehr-Lern-Forschung in den letzten Jahren viele neue Erkenntnisse gewonnen, die die Rahmenbedingungen für die Gestaltung und Optimierung von schulischen Lerngelegenheiten betreffen. Entgegen anders lautenden Behauptungen gibt es unter empirischen Lehr-Lern-Forschern keine grundlegenden Kontroversen hin-

sichtlich der Rahmenbedingungen von verständnisvollem Lernen und gutem Unterricht. Die häufig geäußerte Vorstellung, wonach die Hirnforschung zur Klärung theoretischer Kontroversen in der Pädagogik beitragen könne, trifft nicht zu. Die Rahmenbedingungen für verständnisvolles Lernen sind dank einer Vielzahl von empirischen Studien recht gut geklärt. Forschungsbedarf besteht vor allen Dingen bei der konkreten Umsetzung dieser Rahmenbedingungen für die Gestaltung von inhaltsbezogenen Lerngelegenheiten und deren Transfer in die Schule. Dazu kann die Hirnforschung nichts beitragen.

### **Kapitel 13: Jenseits einer unmittelbaren Anwendbarkeit: Mögliche Forschungsfragen, bei denen eine Zusammenarbeit zwischen Neurowissenschaften und Lehr-Lern-Forschung wünschenswert ist**

#### *Wichtige Stichworte:*

- Wenn die Neurowissenschaften die dem Menschen vorbehaltenen Hirnfunktionen besser verstehen möchten, sollte die Zusammenarbeit mit der empirischen Lehr-Lern-Forschung gesucht werden.
- Auch wenn die Neurowissenschaften nicht sagen können, wie gute Lerngelegenheiten aussehen, kann die Lehr-Lern-Forschung mittelfristig mit Hilfe neurophysiologischer Methoden interessante Erkenntnisse darüber gewinnen, wie sich schulische Lerngelegenheiten auf das Gehirn auswirken.

Obwohl ein kurzfristiger Nutzen neurowissenschaftlicher Erkenntnisse für die Verbesserung des schulischen Lernens nicht zu erwarten ist, ist aus der Sicht der Grundlagenforschung ein Dialog zwischen den Neurowissenschaften und der Lehr-Lern-Forschung wünschenswert. Wenn sich die Neurowissenschaften mit den Hirnfunktionen bei typisch menschlichen Formen des Lernens befassen, dann drängt sich schulisches Lernen als Untersuchungsgegenstand geradezu auf. Die vielfältigen Untersuchungsparadigmen und Aufgabenstellungen, die in der empirischen Lehr-Lern-Forschung in den letzten Jahren entwickelt wurden, können Neurowissenschaftlern Hinweise auf interessante Vorgänge im menschlichen Gehirn geben. Lehr-Lern-Forscher hingegen können durch den Blick in das Gehirn einer Person, die gerade eine schulbezogene Anforderung bewältigt, neue Erkenntnisse darüber gewinnen, was manche schulische Anforderung so schwer macht. Am Beispiel von zehn möglichen Forschungsfragen wird erörtert, wo Erkenntnisfortschritte durch eine Zusammenarbeit zwischen den Neurowissenschaften und der Lehr-Lern-Forschung zu erwarten sind. Abschließend werden organisatorische Vorschläge für die Umsetzung einer Forschungsförderung gemacht.

## **2. Was suchen und finden wir im Gehirn? Chancen und Grenzen einer neuropsychologischen Lehr-Lern-Forschung**

### **2.1 Lernvorgänge im Gehirn – eine faszinierende Perspektive**

Mit Hilfe bildgebender Verfahren zu sehen, wie das Gehirn auf bestimmte Informationen reagiert, ist zweifellos eine faszinierende Angelegenheit. Manche neueren Erkenntnisse der Gehirnforschung sind zudem beruhigend, weil sie optimistisch stimmen, was die geistige Flexibilität und Plastizität des Gehirns über die Lebensspanne hinweg angeht. So scheint das Gehirn in der Lokalisierung bestimmter geistiger Funktionen eher flexibel zu sein. Durch Krankheit oder Unfälle ausgelöste Läsionen gehen nicht zwangsweise mit dauerhaften irreparablen Schäden in der geistigen Funktionsfähigkeit einher. Auch die Dichotomie der Hirnhälften (linke Seite sprachlich, rechte Seite räumlich-visuell) ist weniger determiniert, als dies lange Zeit angenommen wurde. Blakemore und Frith (2005) geben einen exzellenten Überblick über neurowissenschaftliche Forschungsergebnisse, die auch für Lehr-Lern-Forscher von Interesse sind. Mit bemerkenswerter Klarheit weisen die Autorinnen aber auch darauf hin, dass sich aus derartigen Ergebnissen noch keine Folgerungen für die Gestaltung von Lerngelegenheiten ableiten lassen.

Zu den interessantesten Ergebnissen der neueren Gehirnforschung gehört, dass wir uns bei der Erforschung höherer geistiger Prozesse, die dem Menschen vorbehalten sind, nicht auf die Betrachtung der grauen Zellen in der Großhirnrinde beschränken dürfen. Dazu gehört beispielsweise, dass sich die Funktion des Kleinhirns nicht auf die Regelung des Gleichgewichts beschränkt, sondern dass es auch an anspruchsvollen Lern- und Denkvorgängen beteiligt ist. In der psychologischen Lernforschung häufen sich Befunde, die zeigen, dass es enge Zusammenhänge zwischen Körperhandlungen und Denken gibt, wie zum Beispiel beim Gestikulieren. Neuere Erkenntnisse über die Steuerung der Motorik durch das Gehirn wird auch dazu beitragen, die Beziehung zwischen Denken und Handeln besser zu verstehen. Auch neuere Erkenntnisse zur Rolle des Schlafs bei der Konsolidierung von Gedächtnisinhalten sind für die Lehr-Lern-Forschung von großem Interesse (Wagner, Gais, Haider, Verleger, & Born, 2004). Zu welcher Tageszeit welche Arten von Inhalten am besten gelernt werden sollten und wie Pausen sinnvoll in den Lernprozess integriert werden können, sind Fragen von großer praktischer Relevanz.

Es kann erwartet werden, dass die Zusammenführung von Befunden aus der Psychologie und der Gehirnforschung mittelfristig zur Entwicklung integrativer Theorien des Denkens und Verhaltens führt.

Auch bezüglich der kindlichen Entwicklung in den ersten Monaten und Jahren hat die Gehirnforschung – allen voran die Arbeiten von Peter Huttenlocher – interessante Erkenntnisse gebracht. Insbesondere beeindruckt die Eigidynamik der Gehirnentwicklung bei Kindern (z.B. Huttenlocher & Dabholkar, 1997). Sofern deren körperliche und emotionale Grundbedürfnisse befriedigt werden und die Sinnesfunktionen intakt sind, vollziehen sich viele Verän-

derungen im Gehirn auf vorprogrammierte Weise. So nehmen im ersten Lebensjahr die Verschaltungen zwischen Synapsen in einem später nicht mehr erreichten Ausmaß zu. Vom dritten Lebensjahr an setzt dann ein rapider Abbau ein, der sich in abgeschwächter Form bis zur Pubertät fortsetzt. Zu den weitreichenden Irrtümern des letzten Jahrzehnts gehörte es, die Zunahme der Synapsendichte mit einer erhöhten Lernfähigkeit gleichzusetzen und in dem bald darauf einsetzenden Abbau von Synapsenverbindungen erste Zeichen geistiger Trägheit zu sehen. Tatsächlich ist die beschriebene Veränderung der Synapsendichte nicht zwangsläufig an Reiz-Input gebunden, und in den Fällen, in denen Reiz-Input benötigt wird, ist dieser von so universeller Natur, dass er in einer Jurte in der Mongolei, einer Hütte in Afrika, einem Plattenbau in Berlin oder einer Villa in Beverly Hills zur Verfügung steht. So wissen wir inzwischen, dass Kinder aus dem sprachlichen Input, den sie im ersten Lebensjahr hören, die Fähigkeit zum Erkennen von Lauten der Muttersprache entwickeln. In westlichen Kulturen erfolgt üblicherweise der sprachliche Input, indem ausgiebig auf den Säugling eingeredet wird, wohl wissend, dass er nichts davon versteht. Obwohl in manchen anderen Kulturkreisen diese Art von direkter Kommunikation mit dem Säugling nicht üblich ist, lernen die Kinder trotzdem Sprechen. Offensichtlich reicht das Hören von sprachlicher Interaktion zwischen Dritten ebenfalls aus.

Die frühkindliche Entwicklung stellt zwar keine besonders anspruchsvollen Erwartungen an die Umgebung, aber sie reagiert empfindlich auf künstliche Eingriffe und Störungen. Wurden beispielsweise die Eierschalen von noch nicht fertig ausgebrüteten Vögeln geöffnet, führte die vorzeitige Lichteinwirkung zu einer verbesserten Sehfähigkeit der Tiere. Gleichzeitig waren sie aber dauerhaft in ihrer Hörfähigkeit beeinträchtigt (Lickliter, 2000). Erklärt werden kann dies damit, dass die für die Verarbeitung akustischer Information vorgesehenen Neuronen vom visuellen System besetzt werden. Diese Ergebnisse zeigen eindrucksvoll, wie eigendynamisch sich die Gehirnentwicklung im Normalfall vollzieht.

Sofern körperliche und emotionale Grundbedürfnisse des Säuglings befriedigt sind, lassen sich kortikale Fehlentwicklungen in den ersten Lebensjahren nicht mit Umweltfaktoren erklären, sondern sind häufig das Resultat von Sinnesdysfunktionen. Schielen im Säuglingsalter ist nicht allein ein Schönheitsfehler, und eine Mittelohrentzündung im ersten Lebensjahr ist mehr als nur schmerzhaft: Sind beide Augen nicht richtig koordiniert, kann es bei der Belegung von Neuronen im visuellen Cortex zu Asymmetrien kommen, die die Sehfähigkeit langfristig beeinträchtigen. Ist die Hörfähigkeit beeinträchtigt, kann die Fähigkeit zur Differenzierung von Lauten so nachhaltig gestört werden, dass auch noch Jahre später der Schriftspracherwerb darunter leidet.

Derartige Ergebnisse der neurobiologischen Forschung sind von großer Bedeutung für den Umgang mit Säuglingen und Kleinkindern. Eine optimale Entwicklung ermöglicht man Kindern im ersten Lebensjahr nicht durch die Bereitstellung von komplexen und anspruchsvollen Lernumgebungen – die im besten Falle keinen Schaden anrichten –, sondern indem man ihre Sinnesfunktionen in Vorsorgeuntersuchungen prüfen lässt. Eine Beeinträchtigung der Hör- und Sehfähigkeit muss frühzeitig erkannt und behandelt werden. Ist eine Heilung nicht möglich, das heißt ist ein Kind dauerhaft blind und/oder taub, müs-

sen rechtzeitig Kompensationsmaßnahmen eingeleitet werden wie zum Beispiel der Aufbau einer Zeichensprache. Inzwischen wissen wir, dass sich taube Kinder tauber Eltern, die von Anfang an in Zeichensprache kommunizieren, besser entwickeln als taube Kinder nicht-tauber Eltern. Sofern es keine Anzeichen für eine beeinträchtigte Hör- und Sehfähigkeit der Kinder gibt, muss man sich wenig Gedanken über die Lerngelegenheiten von Säuglingen und Kleinkindern machen. Wenn es sich anbietet – weil Personen mit unterschiedlichen Muttersprachen in der Familie leben –, sollte man dem Kind die Chance zur Mehrsprachigkeit geben, indem die verschiedenen Mitglieder der Familie konsequent ihre jeweilige Muttersprache mit dem Kind sprechen. Zu den wenigen Bereichen, bei denen das sich schließende Zeitfenster eine angemessene Metapher für die geistige Entwicklung herausgestellt hat, gehört der Zweitspracherwerb. Mit Hilfe von bildgebenden Verfahren konnten zwischen Erwachsenen, die eine Zweitsprache in den ersten drei Lebensjahren erworben haben, und solchen, die erst einige Jahre später damit begannen, Unterschiede in der Sprachverarbeitung festgestellt werden, auch wenn sich auf der Leistungsebene keine Unterschiede zeigten.

Die erwähnten Ergebnisse zum Zweitspracherwerb unterstreichen aber auch die Bedeutung der Bereichsspezifität des Lernens. Es gibt Kompetenzen und Inhaltsbereiche, deren Grundlagen bereits angelegt sind – man spricht auch von Start-up-Mechanismen –, sodass das Lernen in diesen Bereichen privilegiert ist. Sprechen und Laufen gehören dazu, Prozesse der visuellen Mustererkennung, aber auch einfache Formen der Quantifizierung sowie Grundformen der sozialen Interaktion, zum Beispiel Empathie und Aggression.

Die vielleicht interessantesten Ergebnisse können bei Castelli et al. (2002) nachgelesen werden. Ein Blick in das Gehirn von älteren Autisten, die Aufgaben zur Perspektivübernahme inzwischen lösen konnten, zeigte eine deutlich verlangsamte Verarbeitung von Information über soziale Interaktion, verglichen mit Menschen mit geistiger Behinderung. Nicht-autistische Menschen sind mit Start-up-Mechanismen ausgestattet, die eine sehr schnelle Verarbeitung von Information über soziale Interaktion ermöglicht. Bei Autisten hingegen fehlen diese Start-up-Mechanismen, und sie müssen deshalb Wissen über zwischenmenschliche Interaktion mühsam über andere Lernwege aufbauen.

Dass sich inzwischen auch auf kortikaler Ebene die Unterscheidung zwischen privilegiertem und nicht-privilegiertem Lernen vornehmen lässt, ist für die Betrachtung des schulischen Lernens von besonderer Bedeutung. Die Institution Schule wurde ja gegründet, um nicht-privilegiertes Lernen zu unterstützen oder überhaupt erst zu ermöglichen.

## **2.2 Auf den Inhalt kommt es an: Analyse von Wissensdomänen als zentrale Aufgabe der Lehr-Lern-Forschung**

Die Gene der Spezies Mensch haben sich in den letzten 40.000 Jahren nicht wesentlich verändert, das zur Verfügung stehende Wissen hingegen beträchtlich. Allerdings vergingen etwa 35.000 Jahre bis zur Nutzung von Schriftzeichen. Zahlensymbole, aus deren Eigenleben sich viel später die Mathematik entwickelte – man denke an die Bedeutung der Null – und auf deren Grundla-

gen wiederum Naturwissenschaften und Technik entstanden, kamen erst später hinzu. Analytische Geometrie oder Newtons Gesetze der Mechanik – beides zentrale Bestandteile des Curriculums in der Sekundarstufe – gehören erst seit wenigen Jahrhunderten zum Kulturgut der Menschheit. Von normal begabten Schulkindern werden in wenigen Jahren geistige Sprünge erwartet, die sich in der Menschheitsgeschichte über Jahrtausende vollzogen und an deren Entwicklung geniale Geister beteiligt waren. Ermöglicht wird dies durch die Bereitstellung von professionellen Lern- und Übungsgelegenheiten, in denen Wissen angemessen portioniert über die Jahre aufgebaut werden kann (Stern & Schumacher, 2004).

Nicht-privilegiertes Lernen ist zeitaufwendig, daher ist Frühförderung ange-sagt, und nicht etwa deshalb, weil das kindliche Gehirn ganz unspezifisch bes- ser lernt. Dabei geht es allerdings nicht darum, Lernstoff einfach vorzuverlegen. Den Schriftspracherwerb erleichtert man nicht, indem man bereits mit dreijäh- rigen Kindern Buchstaben paukt. Geübt werden kann aber der Umgang mit Stiften, und mit gezielten Sing- und Sprechspielen lässt sich die akustische Struktur unserer Sprache bewusst machen, was nachweislich das Lesenlernen erleichtert. Eine sinnvolle Vorbereitung auf das Fach Mathematik besteht nicht in der Vorgabe von Rechenaufgaben, sondern in der spielerischen Sensibilisie- rung der Kinder für mathematische Muster in ihrer Umgebung. So kann recht- zeitig der unseligen Tendenz entgegengewirkt werden, Mathematik vorwiegend als das korrekte Ausführen von Rechenprozeduren zu verstehen. Auf naturwis- senschaftliches Verständnis können Kinder vorbereitet werden, indem ihnen be- stimmte Erfahrungen ermöglicht werden, zum Beispiel dass der Wasserspiegel in einem Gefäß steigt, wenn ein Gegenstand eingetaucht wird. Darauf kann im Sachunterricht der Grundschule zurückgegriffen werden, wenn für das Schwim- men und Sinken von Gegenständen Erklärungen erarbeitet werden, die dann einige Jahre später das Verständnis von physikalischen Begriffen wie Dichte und Auftrieb erleichtern.

Eine sinnvolle Frühförderung muss also darauf abzielen, die Grundlagen für den Wissenserwerb in Bereichen zu legen, in denen kein privilegiertes Lernen erwartet werden kann.

### **2.3 Gute Lehrer wissen, wie Schüler lernen**

Dass gute Lehrer wissen sollten, wie Lernen funktioniert, ist von Vertretern der Gehirnforschung häufig zu hören. In der Lehr-Lern-Forschung wird dieses An- liegen ebenfalls vertreten. Der Begriff des *pedagogical content knowledge* (fachspezifisches pädagogisches Inhaltswissen) ist seit vielen Jahren in der Lehr- Lern-Forschung etabliert. Darunter versteht man die Zusammenführung von Wissen über den Inhalt und Wissen über Pädagogik (Staub & Stern, 2002). Gu- te Lehrer haben eine Ahnung von dem Vorwissen, das ihre Schüler über den unterrichteten Inhaltsbereich mitbringen, und berücksichtigen dies. Sie ahnen auch, auf welchen Missverständnissen bestimmte Fehler der Lernenden beru- hen, und sie können auf Fehler und Defizite ihrer Schüler mit gezielten Übungs- aufgaben oder Erklärungen reagieren. Wissen über Neurotransmitter oder die Rolle von Hippocampus und Mandelkern bei der Informationsverarbeitung al-

lein reicht nicht aus, um die Schwierigkeiten der Schüler zu verstehen. Für jeden unterrichteten Inhaltsbereich muss fachspezifisches pädagogisches Wissen erarbeitet werden, und von der Wissenschaftsgeschichte und der Entwicklungspsychologie können Lehrer hier mehr profitieren als von der Gehirnforschung.

Auch wenn man Parallelen zwischen Wissenschaftlern, die der Natur eine Gesetzmäßigkeit abringen, und lernenden Kindern nicht überstrapazieren sollte, so findet man doch manchmal Ähnlichkeiten zwischen wissenschaftlichen Irrtümern und Fehlvorstellungen von Schülern. Als Beispiel wird gern die Impetustheorie angeführt, die von Wissenschaftlern zur Erklärung der Bewegung von Objekten herangezogen wurde, bevor Newtons Mechanik die Physik revolutionierte. Die der Impetustheorie verwandte Vorstellung eines sich verbrauchenden Schwungs von in Bewegung versetzten Objekten entspricht einer weit verbreiteten Vorstellung von Schülern und auch erwachsenen Laien. Ähnliche Parallelen gibt es auch bezüglich der Vorstellungen von chemischen Reaktionen bei der Verbrennung: In der Wissenschaft ging man lange Zeit davon aus, dass eine neue Substanz (Phlogiston) entsteht, eine Annahme, die auch bei Laien noch immer verbreitet ist. Wenn Lehrer die Entstehungsgeschichte des zu unterrichtenden Inhaltsbereichs besser kennen, werden sie sensibel dafür sein, dass Schüler nicht in zwei Stunden Unterricht 200 Jahre wissenschaftlichen Fortschritt nachholen können.

Auch neuere Ansätze in der Entwicklungspsychologie können Lehrern helfen zu verstehen, warum sich Schüler mit manchen Inhalten so schwer tun. Bereichsübergreifende Entwicklungstheorien wie die von Piaget sind in den Hintergrund getreten. Die Frage, worin sich die Kognition von Kindern und Erwachsenen unterscheidet, wird heute eher mit „anders wissen“ als mit „besser denken“ beantwortet. Kinder benutzen zwar oft die gleichen Begriffe wie Erwachsene, aber sie verstehen nicht selten etwas anderes darunter. Am besten lässt sich dies am Gewichtsverständnis demonstrieren. Kinder bejahen zwar die Frage, ob ein Haufen Reis Gewicht hat, aber sie verneinen die Frage, ob ein einzelnes Reiskorn Gewicht hat. Was aus der Perspektive eines Erwachsenen, der die Schule besucht hat, idiotisch klingt, macht für die Kinder Sinn. Sie setzen nämlich „Gewicht haben“ und „sich schwer anfühlen“ gleich und sind deshalb auch der Meinung, dass für eine Ameise ein Reiskorn Gewicht hat. Dass diese körperbezogene Auffassung von Gewicht nicht mit der Unterentwicklung des kindlichen Gehirns erklärt werden kann, sondern ein Lerndefizit widerspiegelt, konnte kürzlich von Boedeker (2004) gezeigt werden. Auch erwachsene Menschen auf der Pazifikinsel Trobriand, die nie eine Schule besucht hatten, hatten keinen von subjektiven Eindrücken losgelösten Gewichtsverständnis. Voraussetzung für die Entwicklung eines physikalischen Begriffs von Gewicht ist die Verfügbarkeit eines Konzepts von „Messung“ sowie einer entsprechenden Metrik. Erst die Integration von mathematischem Wissen und Wissen über Objekte ergibt ein physikalisches Konzept von Gewicht.

Auch Schwierigkeiten beim Verstehen mathematischer Inhalte lassen sich entwicklungspsychologisch erklären. Wie das Lernen der Sprache wird auch das Lernen des Zählens von genetischen Programmen gesteuert. Vorschulkinder lernen auch ohne systematische Instruktion zählen. Es ist ihnen unmittelbar einsichtig, dass sich größere Zahlen auf größere Mengen beziehen. Zwar ver-

wechseln sie manchmal Zahlennamen, aber bestimmte Fehler, wie zum Beispiel das Benennen zweier unterschiedlich großer Mengen mit dem gleichen Zahlennamen, machen sie nie. Die im Laufe der kulturellen Entwicklung entstandene Mathematik hingegen ist nicht intuitiv einsichtig. Kinder, die gelernt haben, dass 8 größer als 7 ist, müssen bei der Einführung der Bruchrechnung erkennen, dass gilt:  $6/7 > 6/8$ . Auch dass Multiplikation vervielfachen und Division aufteilen bedeutet, ist intuitiv einsichtig. Dass aber die Multiplikation mit einer Zahl, die kleiner als 1 ist, zu einer Verkleinerung und die Division mit einer derartigen Zahl zu einer Vergrößerung führt, ist nicht intuitiv einsichtig. Lehrer, die die Unterscheidung zwischen intuitivem und kulturell tradiertem Wissen ernst nehmen, können besser auf die Schwierigkeiten ihrer Schüler reagieren.

## 2.4 Anregende Lernumgebungen

Auf die Frage, wie man Schüler dazu bringt, das Einmaleins, die binomischen Formeln, den Satz des Pythagoras, ein Gedicht, die Vokabeln und Grammatikregeln einer Fremdsprache, die Hauptstädte Europas oder die Formel für Kraft und Auftrieb zu lernen, würden Lehrer und Psychologen wahrscheinlich ähnliche Antworten geben. Aus der Gedächtnispsychologie wissen wir, dass man in kleineren Schritten üben sollte und die Übungszeit verteilen muss. Verstärkung in Form von Belohnung und Bestrafung werden mit der Zeit dazu führen, dass unerwünschte Antworten seltener und erwünschte öfters genannt werden. Ungleich schwerer ist die Frage zu beantworten, wie man Schüler dazu bringt, beim Schreiben eines Essays in der Fremdsprache die gelernten Vokabeln zu benutzen und die Grammatikregeln zu berücksichtigen. Unter welchen Bedingungen lernen Schüler, die Frage, warum sich ihre Beine wie Blei anfühlen, wenn sie aus dem Schwimmbcken steigen, unter Zuhilfenahme ihres Wissens über Auftrieb zu erklären?

Auf die Frage, wie Lerngelegenheiten gestaltet sein müssen, damit Wissen zur Bewältigung neuer Anforderungen herangezogen werden kann, gibt die Gehirnforschung keine Antwort. Mit Spaß und guter Laune ist es keineswegs getan. Die bei TIMSS und PISA nachgewiesenen Defizite deutscher Schüler in der selbständigen und flexiblen Anwendung des in der Schule erworbenen Wissens lassen sich nicht mit Störungen in der Dopaminausschüttung erklären, sondern mit dem wenig anregenden Unterricht.

Aus internationalen Vergleichsstudien wie auch aus Schulexperimenten wissen wir inzwischen, wie man Schüler fesseln und bei der Stange halten kann: Man konfrontiert sie mit Anforderungen, die sie noch nicht auf Anhieb bewältigen können, für deren Lösung sie aber bereits Vorwissen mitbringen. Möglichkeiten zur Aktivierung dieses Vorwissens werden durch gezielte Übungs- und Gesprächsangebote gegeben. Irrtümer und Fehler auf Seiten der Schüler sind zugelassen und werden konstruktiv vom Lehrer genutzt. Auf diese Weise erhalten die Schüler Gelegenheit, ihr bestehendes Wissen zu erweitern, zu revidieren und an die spezielle Anforderung anzupassen. Wie solche Lernumgebungen zu gestalten sind, muss für jeden Inhaltsbereich erarbeitet werden und erfordert die gleichberechtigte Zusammenarbeit zwischen Lehrern, Fachdidaktikern und Kognitionswissenschaftlern.

### **3. Wie verhalten sich neurophysiologische, kognitionswissenschaftliche und pädagogische Erklärungen zueinander? Überlegungen zum Problem der Reduktion von Theorien**

#### **3.1 Einleitung**

Welche Konsequenzen lassen sich aus neurophysiologischen Untersuchungen des menschlichen Gehirns für kognitionswissenschaftliche und pädagogische Theorien ableiten? Können allein auf der Grundlage der Hirnforschung konkrete Anleitungen für die Optimierung der Wissensvermittlung im Schulunterricht bereitgestellt werden? Oder sind diese Untersuchungen aus prinzipiellen Gründen in Bezug auf kognitionswissenschaftliche und pädagogische Erklärungen zu unterbestimmt, um solche Anleitungen aufstellen zu können? Zur Beantwortung dieser Fragen werde ich zunächst auf einige wissenschaftstheoretische Überlegungen zu den Unterschieden und der Autonomie verschiedener Erklärungsebenen eingehen.

#### **3.2 Die Verschiedenheit und Autonomie unterschiedlicher Erklärungsebenen**

Es ist stets möglich, ein und dieselbe Sache aus verschiedenen theoretischen Perspektiven zu beschreiben. Betrachten wir das Beispiel eines Schachcomputers. Ein solches Gerät lässt sich auf einer physikalischen, einer funktionalen und einer intentionalen Ebene beschreiben. Jede Erklärungsebene zeichnet sich durch ihre besondere Fragestellung sowie durch ihre eigenen Objekt-, Eigenschafts- und Relationstypen aus, denn auf jeder Ebene werden zu Erklärungszwecken Entitäten eingeführt, von denen auf den anderen Ebenen nicht die Rede ist.

Thematisiert man einen Schachcomputer auf der physikalischen Erklärungsebene, dann geht es darum, Ursache-Wirkung-Beziehungen zwischen verschiedenen physikalischen Zuständen herauszufinden und auf diese Weise zu erklären, nach welchen Naturgesetzen zum Beispiel bestimmte Ladungszustände hervorgerufen werden. Auf der funktionalen Ebene ist hingegen von ganz anderen Objekt- und Relationstypen die Rede. Hier geht es nicht um Elektronen, Materieteilchen und kausale Beziehungen zwischen physikalischen Zuständen. Vielmehr werden auf dieser Ebene Objekte nach funktionalen Kriterien beispielsweise als UND-Schalter individuiert und die logischen Beziehungen zwischen ihnen untersucht. Auf der intentionalen Ebene werden wiederum ganz andere Objekte thematisiert, nämlich Überzeugungen, Absichten und Entschlüsse, und es geht darum, die kognitiven Beziehungen herauszufinden, die zwischen diesen intentionalen Zuständen bestehen.

Die Entscheidung, welche dieser Ebenen gewählt wird, hängt in erster Linie davon ab, welche Erklärungsziele verfolgt werden. Möchte man herausfinden, welche Materialien sich zum Bau eines Schachcomputers eignen, dann wählt

man die physikalische Erklärungsebene. Geht es darum, den Schaltplan und das Schachprogramm zu entwerfen, muss man die funktionale Erklärungsebene wählen, auf der die Bestandteile des Rechners nach funktionalen Gesichtspunkten zum Beispiel als Widerstände und Verstärker individuiert werden. Bin ich hingegen daran interessiert zu lernen, wie man den Computer beim Schachspielen am besten schlägt, dann nützt mir das Wissen von seinem physikalischen und funktionalen Aufbau wenig. Stattdessen sollte ich mir auf der intentionalen Ebene überlegen, welche Absichten er hat, welche Strategien er verfolgt und wie viele Züge er im voraus plant. Keine dieser unterschiedlichen Erklärungsebenen ist für sich genommen besser oder angemessener als die andere. Vielmehr hängt es primär von unseren Erklärungszielen ab, welche Ebene wir wählen. Bei einer solchen Wahl ist natürlich auch der Gesichtspunkt der Einfachheit leitend, wie zum Beispiel der amerikanische Philosoph Daniel Dennett (1987) hervorhebt. Zwar mag es möglich sein, die Schachzüge eines Computers auf der Basis seiner physikalischen Eigenschaften zu berechnen. Aber dieses Vorgehen ist ungleich aufwendiger und zeitintensiver, als wenn man solche Voraussagen auf der intentionalen Ebene macht.

Jeder höherstufige Zustand lässt sich durch mehrere Zustände der jeweils darunter liegenden Erklärungsebene realisieren. Zum Beispiel kann die funktionale Eigenschaft, ein Verstärker zu sein, durch ganz unterschiedliche physikalische Systeme wie Transistorröhren und Mikrochips realisiert werden. Ebenso lassen sich UND-Schalter durch verschiedene elektrische, hydraulische und pneumatische Systeme realisieren. In gleicher Weise gilt, dass auch ein und derselbe intentionale Zustand wie zum Beispiel das Wissen von einer bestimmten Schachregel durch ganz unterschiedliche Systeme wie verschiedene Programmiersprachen oder unterschiedliche Hirnzustände verschiedener Personen realisiert werden kann. Um der Möglichkeit der multiplen Realisierbarkeit höherstufiger Zustände theoretisch Rechnung zu tragen, wird ihr Verhältnis zu niedrigerstufigen Zuständen durch eine asymmetrische Relation gekennzeichnet, die in der modernen Philosophie des Geistes als Supervenienz bezeichnet wird (siehe J. Kim, 2005). Demnach superveniert ein Zustand M auf einem Zustand P, wenn die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- (1) Zustand M befindet sich gegenüber Zustand P auf einer höherstufigen Erklärungsebene.
- (2) Das Vorliegen von Zustand P ist hinreichend für das Vorliegen von Zustand M.
- (3) Aber umgekehrt ist das Vorliegen von Zustand M nicht hinreichend für das Vorliegen von Zustand P, denn Zustand M kann auf der darunter liegenden Erklärungsebene nicht nur durch Zustand P, sondern auch noch durch andere Zustände realisiert sein.

Folglich korrespondiert jedem Unterschied zwischen Zuständen auf der höheren Erklärungsebene ein Unterschied zwischen Zuständen auf der darunter liegenden Ebene. Dies ist zum Beispiel in dem folgenden Fall gegeben: Dem auf der kognitionswissenschaftlichen Ebene beschreibbaren Unterschied zwischen Autismus und Schizophrenie entspricht ein Unterschied auf der neurophysiologischen Erklärungsebene. Weiterhin ergibt sich aus dem Supervenienzmodell, dass nicht jedem Unterschied zwischen niedrigerstufigen Zuständen ein Unter-

schied zwischen Zuständen höherer Erklärungsebenen entspricht. Dies lässt sich damit illustrieren, dass zum Beispiel Dyslexie – das heißt: Lese- und Rechtschreibschwäche – unterschiedliche neurophysiologische Ursachen haben kann. Sie kann nämlich sowohl durch Störungen im visuellen System als auch durch Störungen im auditiven System hervorgerufen werden. In dem einen Fall haben die betroffenen Personen Schwierigkeiten, Buchstaben zu erkennen; in dem anderen Fall haben sie Probleme mit dem Verstehen von Sprachlauten. In diesem Beispiel haben wir zwar einen Unterschied auf der neurophysiologischen Erklärungsebene, aber keinen Unterschied auf der psychologischen Ebene, weil beide neurophysiologischen Ursachen die gleiche Leistungsstörung hervorrufen.

Um die Beschreibungen verschiedener Erklärungsebenen zueinander in Beziehung zu setzen, ist es erforderlich, mit den Begriffen der jeweils höheren Erklärungsebene zu beginnen. Ich muss beispielsweise schon über funktionale Begriffe verfügen, um physikalische Zustände als Realisierungen eines UND-Schalters identifizieren zu können. Ebenso muss ich bereits kognitive Begriffe verstehen, um Aktivitäten des Gehirns zum Beispiel als Vorgänge der Verarbeitung räumlich-visueller Information oder als Gedächtnisprozesse interpretieren zu können. Die Richtung, in der diese Beziehungen hergestellt werden, verläuft also von oben nach unten. Aus diesem Grund gelangt man mit den Begriffen der jeweils höheren Erklärungsebene auf den unteren Ebenen zu Einteilungen, zu denen man allein mithilfe der Begriffe dieser unteren Ebenen nicht gekommen wäre. Dies lässt sich durch die folgenden Beispiele veranschaulichen:

- Keine physikalische Beschreibung reicht aus, um zu definieren, was es heißt ein Stuhl zu sein. Denn bei der Eigenschaft, ein Stuhl zu sein, handelt es sich um eine funktionale Eigenschaft, die grundsätzlich durch eine unbestimmte Anzahl verschiedener physikalischer Objekte realisierbar ist. Würde man also versuchen, diese Eigenschaft mit physikalischen Begriffen zu definieren, dann würde man sich auf einige konkrete physikalische Realisierungen festlegen – und damit ginge die Möglichkeit zur multiplen Realisierung durch unbestimmt viele physikalische Objekte verloren. Stünden uns also zur Beschreibung der Wirklichkeit allein physikalische Begriffe zur Verfügung, dann würden wir nicht zu der Einteilung in Stühle und Nicht-Stühle kommen, zu der wir mithilfe unserer funktionalen Begriffe gelangen.
- In gleicher Weise gilt, dass sich anhand neurophysiologischer Beschreibungen nicht definieren lässt, was es heißt sich in einem bestimmten kognitiven Zustand zu befinden. Würden wir ausschließlich über neurophysiologische Begriffe verfügen, dann kämen wir niemals auf die Idee, dass diejenigen Zustände des Gehirns, die wir anhand kognitiver Begriffe unter ein bestimmtes Konzept bringen, von anderen Hirnzuständen in wesentlichen Hinsichten verschieden sind, die nicht unter dieses Konzept fallen. Dies lässt sich wiederum mit dem Beispiel der Dyslexie illustrieren: Wir benötigen psychologische Begriffe, um auf der kognitionswissenschaftlichen Erklärungsebene die für Dyslexie charakteristische Leistungsstörung zu bestimmen. Auf der Grundlage dieser begrifflichen Festlegung können wir anschließend die neuronalen Korrelate dieser Leistungsstörung identifizieren – nämlich Störungen im visuellen oder auditiven System. Allein mit neurophysiologischen Begriffen ließe sich aber nicht erklären, warum gerade diese beiden neuronalen

Korrelate und nicht auch noch andere Hirnzustände unter ein bestimmtes Konzept fallen.

Da die Begriffe der physikalischen bzw. der neurophysiologischen Erklärungsebene allein nicht ausreichen, um zu den dargestellten Einteilungen zu kommen, lassen sich höherstufige Begriffe also nicht auf Begriffe niedrigerer Erklärungsebenen reduzieren. Dies gilt ganz allgemein für alle Erklärungsebenen. Ebenso wenig wie sich kunsthistorische, juristische und ökonomische Kategorien vollständig auf physikalische Begriffe zurückführen lassen, können auch kognitionswissenschaftliche und pädagogische Konzepte nicht auf neurophysiologische Begriffe reduziert werden. In diesem Sinne sind die unterschiedlichen Erklärungsebenen also autonom.

### 3.3 Die Bedeutung neurophysiologischer Untersuchungen für Kognitionswissenschaft und Pädagogik

Der entscheidende Vorzug des dargestellten Supervenienz-Modells liegt darin, dass es die beiden folgenden Aspekte vereint: Erstens trägt es dem Umstand Rechnung, dass sich höherstufige Beschreibungen nicht auf Beschreibungen niedrigerer Erklärungsebenen reduzieren lassen. Zweitens wird mit diesem Modell berücksichtigt, dass höherstufige Zustände stets durch Zustände niedrigerer Stufen realisiert werden und dass aus diesem Grund auf den unteren Erklärungsebenen durchaus Bedingungen formuliert werden können, die Objekte erfüllen müssen, um höherstufige Eigenschaften besitzen zu können. Dies lässt sich wieder mit dem Beispiel des Stuhls veranschaulichen: Zwar ist die Eigenschaft, ein Stuhl zu sein, eine funktionale Eigenschaft, aber damit etwas ein Stuhl sein kann, muss es auch bestimmte physikalische Voraussetzungen erfüllen. Aus diesem Grund lassen sich auf der physikalischen Erklärungsebene Anforderungen an die Form, Größe und Festigkeit formulieren, die Objekte erfüllen müssen, um als geeignete Kandidaten für die Eigenschaft, ein Stuhl zu sein, infrage zu kommen.

Diese Überlegung lässt sich auf das Verhältnis der neurophysiologischen Erklärungsebene zur kognitionswissenschaftlichen und pädagogischen Ebene übertragen. Da kognitive Prozesse stets durch entsprechende Vorgänge im menschlichen Gehirn realisiert werden, lassen sich im Rahmen neurophysiologischer Untersuchungen Erklärungen und Anleitungen entwickeln, die in kognitionswissenschaftlicher und pädagogischer Hinsicht relevant sind. Dies gilt insbesondere für die Diagnose und Erklärung kognitiver Leistungsstörungen auf der Basis neurophysiologischer Untersuchungen. Im Folgenden werde ich auf sechs verschiedene Fälle eingehen, um die kognitionswissenschaftliche und pädagogische Bedeutung neurophysiologischer Untersuchungen zu illustrieren.

#### *(1) Neurophysiologische Erklärungen für entwicklungspezifische kognitive Defizite*

Neurophysiologische Untersuchungen können neue Erklärungen für Phänomene liefern, die auf der kognitionswissenschaftlichen Ebene bereits bekannt und untersucht sind. Ein aktuelles Beispiel ist die Studie von Judy DeLoache (2004), in der die mangelnde Fähigkeit von 18 bis 30 Monate alten Kleinkindern, verkleinerte Modelle von Stühlen, Rutschen, Autos etc. als

verkleinerte Modelle zu erkennen und entsprechend zu handeln, in Beziehung gesetzt wird zu der neurophysiologischen Einsicht, dass visuelle Informationen im Gehirn in zwei unterschiedlichen Systemen, nämlich im ventralen und im dorsalen System, verarbeitet werden, die in diesem Entwicklungsstadium noch nicht ausreichend miteinander verbunden sind.

(2) *Neurophysiologische Erklärungen für kognitive Leistungsstörungen*

Neurophysiologische Untersuchungen können Erklärungen für kognitive Leistungsstörungen liefern. Dies lässt sich wiederum am Beispiel der Lese- und Rechtschreibschwäche illustrieren. Die meisten Kinder mit Dyslexie haben eine verminderte phonologische Bewusstheit. Das heißt sie haben Schwierigkeiten, zusammengesetzte Sprachlaute in Wörtern zu erkennen und zu erzeugen. Kinder mit solchen phonologischen Defiziten zeichnen sich zudem durch deutlich geringere neuronale Aktivitäten im temporal-parietalen Bereich aus, wenn sie beispielsweise mit Aufgaben beschäftigt sind, bei denen es darum geht zu entscheiden, ob sich bestimmte Buchstaben und Silben reimen (siehe z.B. Simos et al., 2002). Da die Aktivierung in dieser Hirnregion mit besserer Lesefähigkeit zunimmt, lässt sich Dyslexie also mit einer verminderten Hirntätigkeit in diesem Bereich erklären (siehe auch Shaywitz et al., 2002). In diesem Zusammenhang ist außerdem wichtig, dass neurophysiologische Untersuchungen möglicherweise dadurch für pädagogische Maßnahmen Bedeutung gewinnen können, dass sie uns Hinweise auf die Art der neuronalen Ursachen kognitiver Leistungsstörungen geben. Zum Beispiel hat sich gezeigt, dass Dyslexie nicht auf einer Fehlentwicklung des phonologischen Systems, sondern auf einer verlangsamten Entwicklung dieses Systems beruht (Goswami, 2004). Da es denkbar ist, dass man auf verlangsamte Entwicklungen mit anderen Trainingsmaßnahmen als auf Fehlentwicklungen reagiert, lassen sich aus solchen Einsichten möglicherweise Konsequenzen für die Beseitigung von Leistungsstörungen ableiten.

(3) *Verschiedene Ursachen kognitiver Leistungsstörungen*

Es ist möglich, dass eine kognitive Leistungsstörung verschiedene neuronale Ursachen hat. Während sich also auf der Verhaltensebene keine Unterschiede feststellen lassen, können im Zuge neurophysiologischer Untersuchungen bei verschiedenen Personen unterschiedliche Ursachen dieser Störung identifiziert werden. Dies ist wiederum im Fall der Dyslexie gegeben, der sowohl Störungen im visuellen System als auch Störungen im auditiven System zu Grunde liegen können. Entsprechend diesen Unterschieden müssen verschiedene Trainingsmaßnahmen ergriffen werden, um die kognitive Störung zu beseitigen. Auf diese Weise können neurophysiologische Untersuchungen also Konsequenzen für Trainings- bzw. Unterrichtsmaßnahmen haben, wobei sie allerdings noch nichts über die inhaltliche Beschaffenheit dieser Maßnahmen aussagen. Vielmehr erfahren wir durch solche Untersuchungen in erster Linie, dass wir verschiedene Trainingsmaßnahmen ergreifen müssen, um kognitive Störungen zu beseitigen.

(4) *Frühzeitige Diagnose kognitiver Entwicklungsstörungen anhand neurophysiologischer Befunde*

Es mag im Prinzip möglich sein, anhand neurophysiologischer Befunde kognitive Entwicklungsstörungen frühzeitig zu diagnostizieren, bevor sie sich auf der Verhaltensebene zeigen. Dies setzt voraus, dass es einen eindeutigen Zusammenhang zwischen dem Auftreten bestimmter Hirnzustände zu einem bestimmten Entwicklungszeitpunkt und dem späteren Auftreten bestimmter Leistungsstörungen gibt. Gegenwärtig lassen jedoch die neurophysiologischen Methoden noch keine zuverlässige Frühdiagnose von Sprachstörungen im Einzelfall zu.

(5) *Entscheidung zwischen konkurrierenden kognitionswissenschaftlichen Erklärungen*

Neurophysiologische Befunde können in manchen Fällen herangezogen werden, um zu entscheiden, welcher von zwei konkurrierenden kognitionswissenschaftlichen Erklärungen der Vorzug gegeben werden soll. Erklärt zum Beispiel Theorie A Dyslexie mit Störungen in der visuellen Wahrnehmung und Theorie B mit Störungen beim Sprachverstehen, dann ist es möglich, durch neurophysiologische Untersuchungen der entsprechenden Hirnareale herauszufinden, welche dieser beiden Erklärungen zutrifft (Goswami, 2004).

(6) *Das Trainieren von Vorläuferfähigkeiten*

Neurophysiologische Untersuchungen haben gezeigt, dass bestimmte Hirnareale, die später bei Erwachsenen wichtige Funktionen für das Rechnen übernehmen, bei Kindern besonders aktiviert werden, wenn sie ihre Finger abzählen (Dehaene, 1997). Dieser Befund ist vereinbar mit der Annahme, dass es sich beim Rechnen mit Fingern um eine mathematische Vorläuferfähigkeit handelt, deren Förderung sich positiv auf den Kompetenzerwerb auswirkt. Sollte sich diese Prognose in längsschnittlich angelegten Trainingsstudien als zutreffend herausstellen, dann würden sich aus neurophysiologischen Einsichten Anleitungen für die Unterrichtsgestaltung ergeben.

Die dargestellten Fälle verdeutlichen, dass neurophysiologische Untersuchungen für kognitionswissenschaftliche und pädagogische Überlegungen durchaus von Bedeutung sind, weil sich mit ihnen Unterschiede herausfinden lassen, die auf der Verhaltensebene nicht beobachtbar sind. Dabei ist zu beachten, dass stets vorausgesetzt wird, dass der Zusammenhang zwischen kognitiven Leistungen und Hirnzuständen empirisch so gut belegt ist, dass das Vorliegen eines bestimmten neuronalen Zustands tatsächlich als Voraussetzung für das Vorliegen einer bestimmten kognitiven Leistung angesehen werden kann. Es muss also ausgeschlossen werden, dass es Fälle gibt, in denen eine kognitive Leistung vorliegt, während die entsprechenden Hirnzustände fehlen. Außerdem ist es in diesem Zusammenhang wichtig zu beachten, dass sich viele der dargestellten Fälle auf die Diagnose und Erklärung von kognitiven Leistungsstörungen richten. Von der unbestreitbaren Kompetenz der Neurophysiologie hinsichtlich der Diagnose und Erklärung pathologischer Fälle darf aber nicht vorschnell darauf geschlossen werden, dass ihr damit auch für die Gestaltung von Lerngelegenheiten im normalen Schulunterricht die gleichen Kompetenzen zukommen. Hinzu kommt, dass neurophysiologische Untersuchungen keine Aussagen darüber machen, wie Trainings- und Unterrichtsmaßnahmen inhaltlich gestaltet sein

müssen, um kognitive Leistungsstörungen zu beseitigen. Zwar sagen sie etwas darüber, unter welchen Bedingungen bestimmte kognitive Leistungen nicht vorliegen und liefern uns damit Informationen darüber, wann Fördermaßnahmen ergriffen werden müssen. Sie sagen uns aber nichts darüber, was im Einzelnen unternommen werden muss, um die Leistungsstörungen zu beheben. Wie diese Fördermaßnahmen inhaltlich gestaltet werden, muss daher im Rahmen kognitionswissenschaftlicher und pädagogischer Theorien ausgearbeitet werden. Das gilt selbst für den Fall, dass in neurophysiologischen Untersuchungen Hirnareale identifiziert werden, die bei der Bewältigung bestimmter Anforderungen erhöhte Aktivitäten zeigen, wie weiter oben am Beispiel des Rechnens mit Fingern erörtert wurde. Allein aus dem Befund, dass durch das Abzählen der Finger bei Kindern Hirnareale aktiviert werden, die im Erwachsenenalter für das Ausführen von Rechenoperationen relevant sind, lässt sich aber noch nicht ableiten, dass die späteren Rechenleistungen gezielt durch das Üben des Fingerabzählens in der Kindheit verbessert werden können. Aus der Tatsache, dass man seine Hände beim Essen sowie beim Schreiben benutzt, würde man ja auch nicht schließen, dass Essen eine gezielte Übung für das spätere Schreiben ist. Dass am Zustandekommen zweier Kompetenzen die gleichen physiologischen Grundlagen beteiligt sind, lässt noch keinerlei Schlüsse über Fördermöglichkeiten zu. Bezüglich der Entwicklung der Rechenleistungen kann angenommen werden, dass diese von einer ganzen Reihe weiterer Kontextfaktoren abhängt, die im Zuge der Beschreibung des menschlichen Gehirns gar nicht erfasst werden. Im Folgenden werde ich auf diese Kontextfaktoren näher eingehen und dafür argumentieren, dass neurophysiologische Untersuchungen prinzipiell zu unterbestimmt sind, um konkrete Anleitungen für die Wissensvermittlung im Schulunterricht bereitzustellen.

### **3.4 Die prinzipielle Unterbestimmtheit neurophysiologischer Untersuchungen im Hinblick auf die Lehr-Lern-Forschung**

Die bisherigen Überlegungen gingen von der Voraussetzung aus, dass es sich um ein und dasselbe Objekt handelt, das auf verschiedenen Erklärungsebenen untersucht wird. Diese Voraussetzung ist aber nicht erfüllt, wenn es um Fragen optimaler Unterrichtsgestaltung geht. In diesem Kontext kommt dem menschlichen Gehirn nämlich nur die Rolle eines Teilsystems zu. Dieses Teilsystem ist zwar unentbehrlich, aber da es eben nur einen Teil eines größeren Zusammenhangs darstellt, kann seine Beschreibung prinzipiell nicht sämtliche Aspekte erfassen, die für das Aufstellen konkreter Anleitungen für die Wissensvermittlung im Schulunterricht relevant sind.

Dies liegt vor allem daran, dass es im Schulunterricht um die Vermittlung von Wissen in Bereichen geht, in denen kein privilegiertes Lernen erwartet werden kann. Privilegiertes Lernen liegt dann vor, wenn durch biologische Entwicklungsprogramme festgelegt ist, durch welche Umweltbedingungen bestimmte Lernprozesse ausgelöst werden und auf welche Weise diese Lernprozesse anschließend ablaufen. Das Sprechen sowie viele motorische Fähigkeiten, wie das aufrechte Gehen, werden auf diese Weise erlernt. Beim nicht-privilegierten Lernen hingegen ist nicht biologisch festgelegt, welche Faktoren be-

stimmte Lernprozesse auslösen und wie diese Lernprozesse ablaufen. Diese Unterscheidung zwischen privilegiertem und nicht-privilegiertem Lernen entspricht der Differenzierung, die Uta Frith (2001) zwischen „fast route learning“ und „slow route learning“ trifft. Während beim „fast route learning“ Lernprozesse durch spezifische, biologisch festgelegte Start-up-Mechanismen gesteuert werden, erfolgt das „slow route learning“ nach allgemeinen Lernprinzipien. Der Evolutionspsychologe David Geary (1996) kennzeichnet denselben Unterschied mit dem Begriffspaar „primary and secondary abilities“. Das nicht-privilegierte Lernen betrifft alle Inhalte und Fähigkeiten, um deren Vermittlung es im Schulunterricht geht – wie zum Beispiel Lesen, Schreiben und Mathematik. Auf den Erwerb dieser Fähigkeiten hat die Evolution unser Gehirn nämlich nicht vorbereiten können, weil es diese Kulturtechniken erst seit einem entwicklungsgeschichtlich relativ kurzen Zeitraum gibt. Folglich muss die Beschreibung der Voraussetzungen für diese Art des Lernens über die Beschreibung der Bedingungen, die auf Seiten des menschlichen Gehirns erfüllt werden müssen, hinausgehen und zusätzlich weitere externe Faktoren einbeziehen, die für erfolgreiches nicht-privilegiertes Lernen relevant sind.

Bei den Voraussetzungen des nicht-privilegierten Lernens handelt es sich in erster Linie um Wissensvoraussetzungen. Damit Kindern im Schulunterricht beispielsweise das physikalische Konzept der Dichte beigebracht werden kann, müssen sie bereits über andere physikalische Konzepte wie Gewicht und Volumen verfügen. Ebenso verhält es sich, wenn man ihnen erklären will, dass Wale nicht zu den Fischen, sondern zu den Säugetieren gehören. Denn um verstehen zu können, dass Tiere nicht anhand ihres Lebensraums, sondern anhand der Art und Weise ihrer Fortpflanzung klassifiziert werden, müssen Kinder bereits über entsprechende Kenntnisse über die Fortpflanzung verfügen. Wenn Kinder, die gelernt haben, dass die Zahl 7 kleiner ist als die Zahl 8, verstehen sollen, dass  $\frac{2}{7}$  größer ist als  $\frac{2}{8}$ , dann ist dies nur möglich, wenn sie bereits Erfahrung damit gemacht haben, dass Zahlen sich auf unterschiedliche Einheiten beziehen können. Die Beschreibung solcher Wissensvoraussetzungen lässt sich aber grundsätzlich nicht auf Beschreibungen neurophysiologischer Zustände reduzieren. Denn ebenso wenig, wie sich die Eigenschaft, ein Stuhl zu sein, anhand rein physikalischer Begriffe definieren lässt, kann mithilfe eines rein neurophysiologischen Vokabulars beschrieben werden, was es heißt, zum Beispiel Wissen über die Art und Weise der Fortpflanzung von Säugetieren zu haben. Wir brauchen daher psychologische Begriffe, um diese Wissensvoraussetzungen beschreiben zu können.

Ein weiterer wichtiger Punkt liegt darin, dass eine wesentliche Voraussetzung für nicht-privilegiertes Lernen darin besteht, dass die betreffende Wissensbasis gut organisiert ist. Wann eine Wissensbasis gut organisiert ist, kann aber prinzipiell nur unter Bezugnahme auf die Anforderungen und Lernziele beurteilt werden, die einer Person vorgegeben werden. Die Eigenschaft, gut organisiert zu sein, ist nämlich keine intrinsische Eigenschaft, die einer Wissensbasis unabhängig von konkreten Aufgabenstellungen und Lernsituationen zukommt. Vielmehr handelt es sich dabei um eine relationale Eigenschaft, die wir einer Wissensbasis nur dann zuschreiben können, wenn wir gleichzeitig auch präzisieren, in Bezug auf welche konkreten Anforderungen und Lernziele eine Wissensbasis gut organisiert sein soll. Das Vokabular, mit dem diese Anforder-

rungen und Lernziele dargestellt werden, ist aber nicht auf neurophysiologische Begriffe reduzierbar, weil es sich bei diesen Anforderungen und Lernzielen um kulturelle Faktoren handelt, die außerhalb des Gehirns liegen. Aus diesem Grund kann es prinzipiell keine neurophysiologischen Kriterien dafür geben, wann eine Wissensbasis gut organisiert ist. Stattdessen benötigen wir psychologische Begriffe, um die Anforderungen und Lernziele zu beschreiben, auf die wir uns beziehen müssen, um die Organisation von Wissensvoraussetzungen qualifizieren zu können.

Diese Überlegungen lassen sich mit dem folgenden Beispiel veranschaulichen: Was muss ich wissen, um bei einer Regatta gewinnen zu können? Nun, zuerst einmal muss ich die physikalischen Eigenschaften meines Bootes – zum Beispiel seine Segelfläche, seinen Tiefgang und die Größe seines Kiels oder Schwerts – kennen, um sein Verhalten unter bestimmten Wind- und Wasserbedingungen vorhersehen zu können. Ohne diese Kenntnisse weiß ich nicht, was ich meinem Boot abverlangen kann – und ich brauche diese Kenntnisse auch, um einschätzen zu können, welche Leistungen ausfallen, wenn bestimmte physikalische Voraussetzungen nicht erfüllt sind – wenn zum Beispiel das Ruder gebrochen oder der Mast geknickt ist. Darüber hinaus benötige ich für meine erfolgreiche Teilnahme an einer Regatta aber auch noch Wissen von den Verkehrsregeln für korrektes Segeln – zum Beispiel Wissen von den Vorfahrtsregeln – sowie Kenntnisse von Strategien für erfolgreiches Segeln und von den Absichten und Kenntnissen meiner Konkurrenten. Bei den zuletzt genannten Voraussetzungen handelt es sich um Wissen, das sich nicht auf Kenntnisse der physikalischen Eigenschaften meines Segelboots reduzieren lässt, weil sich dieses Wissen auf Faktoren bezieht, die außerhalb meines Segelboots liegen. Damit lässt sich die folgende Analogie zum menschlichen Gehirn formulieren:

Ebenso, wie das Segelboot im Kontext einer Regatta ein Teilsystem innerhalb eines größeren Zusammenhangs ist, ist auch das Gehirn im Kontext des nicht-privilegierten Lernens ein Teilsystem, das in einem größeren Zusammenhang steht. Und ebenso, wie die Kenntnis der physikalischen Eigenschaften des Segelboots für sich genommen nicht hinreichend ist, um Anleitungen für eine erfolgreiche Teilnahme an einer Regatta aufstellen zu können, können auch neurophysiologische Beschreibungen des Gehirns für sich genommen prinzipiell nicht ausreichen, um konkrete Anleitungen für die optimale Wissensvermittlung im Schulunterricht aufzustellen. Vielmehr sind sie in Bezug auf solche Anleitungen aus prinzipiellen Gründen unterbestimmt.

Aus diesem Grund kann die Hirnforschung auch nicht das für die Lehr-Lern-Forschung sein, was die Physik für die Ingenieurwissenschaften ist. Schließlich geht es – um bei der dargestellten Analogie zu bleiben – nicht um eine Anleitung zum Bau eines Segelboots, sondern um Anleitungen zum effizienten Einsatz eines Boots in einem komplexen kulturellen Kontext.

Betrachten wir ein anderes Beispiel: Ein bestimmter Bauer weiß so ziemlich alles, was es gegenwärtig an gesicherten biologischen Erkenntnissen über Weizen gibt. Nun überlegt er sich, was er mit dem Weizen machen soll, den er dieses Jahr auf seinen Feldern geerntet hat. Dies sind seine wichtigsten Optionen:

- (1) Soll er den Weizen zu Whisky verarbeiten?
- (2) Soll er ihn als Saatgut aufbewahren?

- (3) Soll er Viehfutter daraus machen?
- (4) Oder soll er ihn an Raiffeisen verkaufen?

Sein Wissen über die biologischen Eigenschaften des Weizens reicht nicht aus, um ihm für diese Entscheidung eine konkrete Anleitung an die Hand zu geben. Denn ebenso wie das Segelboot im Fall der Regatta ist der Weizen in diesem Beispiel nur ein Teilsystem, das in einem größeren Zusammenhang steht. Aus diesem Grund ist das biologische Wissen allein zu unterbestimmt, um eine Anleitung für die Entscheidung des Bauern bereitstellen zu können. Stattdessen müssen eine ganze Reihe weiterer Aspekte wie zum Beispiel ökonomische Faktoren einbezogen werden, deren Beschreibung über die Beschreibung des Weizens hinausgeht.

Eine interessante Illustration dieses Sachverhalts findet sich auch bei John Morton und Uta Frith (2001). Sie verdeutlichen am Beispiel der Dyslexie, dass wir uns bei der Beschreibung dieses Phänomens nicht auf die neurophysiologische Erklärungsebene beschränken dürfen, sondern die kognitionswissenschaftliche Ebene miteinbeziehen müssen, um den Einfluss kultureller Faktoren zu erklären. So treten Lese-Rechtschreib-Störungen seltener bei Kindern mit Italienisch als Muttersprache auf als bei Kindern mit Englisch als Muttersprache. Erklärt wird dies damit, dass die Regeln der Graphem-Phonem-Korrespondenz im Italienischen einfacher sind als im Englischen.

### 3.5 Schlussbetrachtung

Um die Wissensvermittlung im Schulunterricht optimal gestalten zu können, müssen Pädagogen Folgendes wissen:

- (1) Welche Anforderungen an das Vorwissen von Kindern sind mit bestimmten Lernzielen verbunden? Über welche Konzepte müssen sie bereits verfügen, und wie muss ihre Wissensbasis organisiert sein, damit sie in der Lage sind, bestimmte Probleme zu lösen?
- (2) Wie ist das Vorwissen der Kinder tatsächlich beschaffen? Über welche intuitiven Begriffe und Erklärungen verfügen sie? Welche Missverständnisse und Fehler sind zu erwarten, wenn Kinder mit diesem Wissen bestimmte Aufgaben zu bewältigen versuchen?
- (3) Worin besteht das Lernziel? Auf welche Weise sollte die Wissensbasis der Kinder strukturiert sein, nachdem das Lernziel erreicht ist?

Diese Kenntnisse sind die Voraussetzung dafür, um die Frage beantworten zu können, wie Lerngelegenheiten bzw. wie der Unterricht gestaltet werden muss, damit bereits vorhandenes Wissen zur Bewältigung neuer Aufgaben herangezogen werden kann. Die Hirnforschung kann solche Kenntnisse nicht bereitstellen, weil sie aus den beiden dargestellten Gründen prinzipiell zu unterbestimmt ist, um konkrete Anleitungen liefern zu können:

- (1) Da kognitionswissenschaftliche und pädagogische Theorien gegenüber neurophysiologischen Erklärungen auf höheren Erklärungsebenen angesiedelt sind, ist es prinzipiell nicht möglich, kognitionswissenschaftliche und pädagogische Erklärungen vollständig auf neurophysiologische Erklärungen zu reduzieren.

- (2) Im Kontext des kulturellen Lernens stellt das menschliche Gehirn ein Teilsystem dar, das in einem größeren Zusammenhang steht. Die Beschreibung der Voraussetzungen für kulturelles Lernen muss deshalb über die Beschreibung des Gehirns hinausgehen und weitere Faktoren wie das Vorwissen des Lernenden einbeziehen. Unter anderem benötigen wir kognitionswissenschaftliche Begriffe, um zu beurteilen, ob die Wissensbasis einer Person für die Bewältigung einer gestellten Anforderung angemessen ist.

Die prinzipielle Unterbestimmtheit der Neurophysiologie in Bezug auf die Gestaltung von Lerngelegenheiten mindert natürlich deren Wert in keiner Weise – ebenso wenig, wie der Wert der Physik dadurch gemindert wird, dass sich beispielsweise juristische, ökonomische und kunsthistorische Kategorien grundsätzlich nicht auf physikalische Begriffe reduzieren lassen. Vielmehr ist diese Unterbestimmtheit lediglich der Ausdruck der Autonomie der verschiedenen Erklärungsebenen. Hinzu kommt, dass die Hirnforschung ungeachtet dieser Unterbestimmtheit für kognitionswissenschaftliche und pädagogische Theorien durchaus von Bedeutung ist, weil sich mit ihr kognitive Leistungsstörungen diagnostizieren und erklären sowie Vorläuferfähigkeiten von kognitiven Leistungen identifizieren lassen. Die Hirnforschung stellt damit wichtige Einsichten für die Lehr-Lern-Forschung bereit, indem sie die neurophysiologischen Rahmenbedingungen beschreibt, unter denen erfolgreiches Lernen stattfinden kann.

## 4. Bildgebende Verfahren in den kognitiven Neurowissenschaften

Neurowissenschaftliche Methoden haben vor allem aufgrund herausragender technischer Weiterentwicklungen in den letzten Jahren in einer Reihe von traditionellen psychologischen Forschungsfeldern Einzug gehalten und zur Ausbildung neuer Forschungszweige (z.B. der „kognitiven Neurowissenschaften“) beigetragen (Raichle, 1998, 2003; Savoy, 2001). Von besonderer Bedeutung und Faszination erscheinen in diesem Kontext bildgebende Verfahren, welche sowohl die Struktur des Gehirns als auch seine Funktion in vivo abbilden können. Vor allem die Möglichkeit, mit funktionellen bildgebenden Methoden dem Gehirn „beim Denken zusehen“ zu können, resultierte in einer Fülle von Forschungsarbeiten, die sich mit einem breiten Spektrum psychischer Prozesse, von Wahrnehmung bis hin zu Gedächtnis und anderen intellektuellen Funktionen, beschäftigten (vgl. den Review-Artikel von Cabeza & Nyberg, 2000). Da bildgebende Verfahren in der Erforschung der geistigen Leistung eine immer größere Rolle spielen, ist eine Auseinandersetzung mit deren Grundlagen unumgänglich, um sowohl ihre Aussagekraft als auch ihre Anwendungsmöglichkeiten abschätzen zu können. Dieses Kapitel soll mit einem Überblick über die derzeit am häufigsten eingesetzten Verfahren diesen Zweck erfüllen:

- Positronen-Emissions-Tomographie (PET),
- Magnetresonanztomographie (MRT),
- funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT),
- Transcraniale Nahe-Infrarot-Spektroskopie (NIRS),
- Elektroencephalographie (EEG),
- Magnetoencephalographie (MEG).

Dabei gliedert sich die Darstellung der Verfahren in folgende Unterpunkte: In den Grundlagen sollen Art und Ursprung des gemessenen Biosignals sowie das Grundprinzip der Messung erläutert werden. Als gesonderter Punkt wird die räumliche und zeitliche Auflösung des Verfahrens behandelt, soweit diese für die Beurteilung von Anwendbarkeit und Aussagekraft erforderlich sind. Im daran anschließenden Abschnitt zur Anwendung wird auf praktische Anwendungsaspekte, Untersuchungsdesigns sowie Einschränkungen in der Anwendbarkeit näher eingegangen. Im Unterpunkt Aussagekraft sollen vor allem Fragen nach der Validität der Methode und der damit verbundenen Untersuchungsdesigns angesprochen werden. Zuletzt wird ein kurzer Überblick über die mit dem Verfahren verbundenen Vor- und Nachteile gegeben, soweit sie nicht bereits hinsichtlich der anderen Aspekte diskutiert wurden. Es wird explizit darauf hingewiesen, dass dieser Überblick über die verschiedenen bildgebenden Verfahren keinesfalls den Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Auch die Grundlagen der Verfahren werden zur besseren Nachvollziehbarkeit in vereinfachter Form vorgestellt. Für detailliertere Ausführungen sei auf die einschlägige Literatur verwiesen (z.B. Jäncke, 2005; Toga & Mazziotta, 2002).

## 4.1 Positronen-Emissions-Tomographie (PET)

Die Positronen-Emissions-Tomographie (PET, engl.: Positron Emission Tomography; vgl. Posner & Raichle, 1994) gehört zu den ersten Verfahren, die für die funktionelle Bildgebung entwickelt wurden. Vorwiegend wurde und wird diese Methode für die Messung der Gehirnaktivierung über verschiedene indirekte Parameter (z.B. Veränderungen im zerebralen Blutfluss oder Glukosestoffwechsel) eingesetzt – bis Mitte der 1990er Jahre war PET die dominierende bildgebende Methode in den kognitiven Neurowissenschaften. Mit dem Aufkommen und der zunehmenden Verfügbarkeit der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) ist die Anwendungshäufigkeit dieser Methode jedoch deutlich zurückgegangen, was vor allem darauf zurückzuführen ist, dass mit der fMRT eine nicht-invasive Methode mit vergleichbarer Funktion und Aussagekraft zur Verfügung steht. Allerdings machen technische Weiterentwicklungen, welche mittlerweile auch die Messung neurochemischer Parameter erlauben, dieses Verfahren noch immer interessant für die kognitiven Neurowissenschaften.

### *Grundlagen*

Wird ein bestimmtes Gehirnareal, etwa im Zuge von kognitiven Anforderungen, aktiviert, kommt es zu einem gesteigerten Energie- und Sauerstoffverbrauch in dieser Region. Um diesem erhöhten Verbrauch nachkommen zu können, muss vermehrt Glukose und Sauerstoff über die Blutbahn ins Gehirn gelangen, was über die Erweiterung der Blutgefäße und den damit verbundenen Anstieg des regionalen zerebralen Blutflusses (engl.: regional Cerebral Blood Flow, rCBF) und Blutvolumens (engl.: regional Cerebral Blood Volume, rCBV) erreicht wird. Über die Messung von Glukose- oder Sauerstoffkonzentration kann somit indirekt die Aktivierungsverteilung im Gehirn bestimmt werden. Jedoch senden organische Moleküle wie Glukose oder Sauerstoff keine messbaren elektromagnetischen Signale aus, weswegen diese Moleküle für die PET-Messung radioaktiv markiert werden müssen. Die Markierung geschieht über die Verwendung von künstlich hergestellten Isotopen (Radionukliden), welche mit den organischen Substanzen (bspw. Glukose oder Sauerstoff) kombiniert werden und so genannte „Tracer“ (Radiopharmaka) bilden. Die hier verwendeten Isotope werden in Teilchenbeschleunigern (Zyklotronen) durch Beschuss mit Ionen hergestellt und sind instabil, das heißt sie geben kontinuierlich und in zufälliger Richtung Positronen ab (Positronenemission). Nach Injektion der Tracer in die Arteria carotis oder Zuführung über die Atemluft gelangen diese über die Blutbahn ins Gehirn und verteilen sich dort entsprechend dem Energie- und Sauerstoffbedarf. Im menschlichen Gewebe kollidieren die von den Isotopen emittierten Positronen mit den umliegenden Elektronen, wodurch jeweils zwei Gammaphotonen freigesetzt werden, die in entgegengesetzter Richtung ( $180^\circ$ ) abgestrahlt werden. Die Photonenenergie ist dabei so stark, dass die Photonen weitgehend unbeeinflusst von Gehirngewebe und Knochen durch den Schädel schleudern und mit Hilfe entsprechender Detektoren im PET-Scanner (bestehend aus einer Probandenliege und einer konzentrischen Röhre) gemessen werden können. Die entgegengesetzte Flugrichtung der Photonen und deren

zeitliche Koinzidenz ermöglichen dabei die Bestimmung des Ortes der Positronenemission und damit der aktivierten Gehirnregionen.

Da die Energieversorgung des Gehirns beinahe ausschließlich über den Glukosestoffwechsel gedeckt wird, erwies sich die Messung des regionalen zerebralen Glukosemetabolismus als besonders geeignet für die Untersuchung des Energieverbrauchs in verschiedenen Gehirnregionen während kognitiver Prozesse. Hierzu wird radioaktiv markierte Glukose (18-Fluorodeoxyglucose, FDG) verwendet, die wie normale Glukose in die Zellen transportiert und dort als Energieträger verwendet wird. Allerdings erfolgt der vollständige Abbau dieses künstlich hergestellten Glukoseanalogons wesentlich langsamer, weswegen es zu einer vorübergehenden intrazellulären Akkumulation in den entsprechenden Gehirnarealen kommt. Dadurch lässt sich die räumliche Verteilung des Energieverbrauchs – und der damit einhergehenden neuronalen Aktivität – innerhalb eines spezifischen Zeitraums bestimmen.

#### *Räumliche und zeitliche Auflösung*

Die räumliche Auflösung der PET hängt in erster Linie von technischen Gegebenheiten (Größe und Anzahl der Detektoren) ab. Allerdings lässt sich die Auflösung durch technische Verbesserungen im Scanner nicht unendlich steigern, da hier auch die Art des verwendeten Isotops von Bedeutung ist. Je nach Isotop können die emittierten Positronen gewisse Distanzen (im Bereich von wenigen Millimetern) zurücklegen bevor sie mit einem Elektron kollidieren und Gammaphotonen abgestrahlt werden. Praktische Schätzungen der räumlichen Auflösung liegen bei etwa  $1 \text{ cm}^3$ , was deutlich unter den Möglichkeiten der fMRT liegt. Die zeitliche Auflösung wird durch die Halbwertszeit des Isotops determiniert, welche im Bereich von wenigen Minuten (z.B. 2 Minuten bei mit  $^{15}\text{O}$  markiertem Sauerstoff) bis zu Stunden (z.B. 110 Minuten bei FDG) liegen kann. Schätzungen für die untere Grenze liegen etwa bei 45 bis 60 Sekunden.

#### *Anwendung*

Im Gegensatz zu allen anderen hier dargestellten Verfahren verlangt eine PET-Messung die Injektion (oder Inhalation) von radioaktiv markierten Substanzen, was den Probanden zum einen einer gewissen Dosis ionisierender Strahlung aussetzt und zum anderen – im häufigen Falle intraarteriell verabreichter Tracer – als unangenehm erlebt wird. Im Besonderen erlegt die Verwendung von Tracern diesem Verfahren wesentliche Einschränkungen auf. So dürfen aus ethischen und medizinischen Gründen nur eine begrenzte Anzahl an PET-Messungen pro Jahr bei gesunden Erwachsenen durchgeführt werden. Für Kinder und Frauen im gebärfähigen Alter sind derartige Messungen in den meisten Fällen gänzlich untersagt (mit Ausnahme von medizinischen Indikationen), was die Untersuchung von Entwicklungsverläufen oder Geschlechterunterschieden mit dieser Methode kaum möglich macht. Neben der Strahlenexposition führte die meist als unangenehm empfundene Prozedur der Tracer-Verabreichung zu der Vermutung, dass sich nur besonders „hartgesottene“ Personen freiwillig zu PET-Untersuchungen melden, deren Repräsentativität für die Gesamtpopulation infrage zu stellen ist.

Die experimentelle Vorgehensweise in PET-Untersuchungen hängt sehr stark vom verwendeten Untersuchungsdesign und den zu ermittelnden Parame-

tern (bzw. den Tracer-Eigenschaften) ab und reicht von einer Einzelmessung nach einer längeren Phase kognitiver Aktivität (z.B. 30 Minuten bei FDG) bis hin zu mehrfachen Messungen mit jeweils erneuter Injektion oder Inhalation (z.B. bis zu 30 Messungen bei Verwendung von radioaktiv markiertem Sauerstoff). Bei allen Untersuchungsdesigns ist es allerdings erforderlich, dass der Zeitraum, für welchen die Positronenemission gemessen wird, mit den interessierenden (kognitiven) Anforderungen ausgefüllt sein muss, um Rückschlüsse auf die zu Grunde liegenden Gehirnareale und deren Aktivität ziehen zu können. Um die Gehirnaktivierung während interessierender kognitiver Funktionen isolieren zu können, finden häufig Designs Anwendung, die sich der Subtraktionsmethode bedienen. Bei diesen wird die Verteilung des Energie- oder Sauerstoffverbrauchs während einer Experimentalbedingung mit jener während einer Kontrollbedingung verglichen (vgl. die Erläuterungen im Rahmen der fMRT für eine detailliertere Darstellung und Kritik dieses Ansatzes).

#### *Aussagekraft*

Bei der PET werden entweder über hämodynamische Veränderungen oder über den Glukosemetabolismus Rückschlüsse auf die zu Grunde liegende neuronale Aktivität gezogen, was weitgehend dieselben Einschränkungen in Bezug auf die Aussagekraft des PET-Signals mit sich bringt wie bei der fMRT (siehe dazu die Ausführungen zur fMRT). Im Allgemeinen sprechen die Befunde jedoch für eine gute Kopplung zwischen neuronaler Aktivierung und der regionalen Blutflussveränderung samt ihren Parametern; die molekularen Grundlagen für deren Vermittlung sind jedoch noch nicht gänzlich geklärt (Heeger & Ress, 2002; S.-G. Kim, 2003; Raichle, 1998). Die Aussagekraft von PET-Studien ist weiterhin durch die oben dargestellten räumlichen und zeitlichen Auflösungen gemindert; Zeitintervalle von 30 bis 45 Sekunden machen die Untersuchung von Verläufen kognitiver Prozesse, welche sich in der Regel über Millisekundenbereiche erstrecken, unmöglich. Betrachtet man lediglich die kumulierte Aktivität über einen bestimmten Zeitraum, kann sich – insbesondere bei längeren Zeitperioden im Minutenbereich – die Abgrenzung der interessierenden kognitiven Prozesse von anderen „Aktivitäten“ schwierig gestalten.

#### *Vor- und Nachteile*

Für die zunehmende Ablösung des PET-Verfahrens durch die fMRT lassen sich als primär ausschlaggebend anführen, dass es sich (a) bei PET um eine (quasi-)invasive Methode handelt, die (b) eine Strahlenbelastung der Probanden unweigerlich mit sich bringt. Auch die schlechtere räumliche und zeitliche Auflösung lässt PET im Vergleich zu fMRT als mittlerweile technisch überholtes Verfahren erscheinen. Der Bedarf an Tracern verschiedenster Art macht diese Methode zusätzlich kostenintensiver im Betrieb als andere Verfahren, da die Tracer aus logistischen Problemen (die Positronenemission beginnt sofort nach Herstellung) direkt vor Ort hergestellt werden müssen, was nur mit der entsprechenden Apparatur (Zyklotron) realisierbar ist.

Allerdings seien auch die Stärken dieses Verfahrens erwähnt. So ist ein PET-Scan im Gegensatz zur fMRT mit keiner nennenswerten Geräuschkulisse verbunden, was sowohl die Darbietung auditorischer Stimuli unproblematisch macht als auch für die Probanden eine angenehmere (und damit ökolo-

gisch validere) Untersuchungsumgebung schafft. Des Weiteren lassen sich bei Verwendung entsprechender Designs eine Vielfalt von Testinstrumenten einsetzen, die in einem Magnetresonanztomographen nicht anwendbar wären. Dies gilt insbesondere dann, wenn erst nach einem bestimmten Zeitraum kognitiver Aktivität, während dessen beispielsweise radioaktiv markierte Glukose in den aktiven Regionen akkumuliert wird, ein PET-Scan durchgeführt wird. Des Weiteren stellt PET eine sensitivere Methode als fMRT dar, da beinahe jede Positronenemission bzw. jede Gammaphotonenstrahlung detektiert werden kann. Die vielfältige Anwendbarkeit dieses Verfahrens, vor allem die zunehmende Möglichkeit, auch Verteilungen von Neurotransmittern (wie Dopamin oder Serotonin) und deren Rezeptoren untersuchen zu können (z.B. Paterson & Nordberg, 2000), dürften dieses Verfahren noch lange nicht in der Historie der Neurowissenschaften verschwinden lassen.

## 4.2 Magnetresonanztomographie (MRT, MRI)

Die Magnetresonanztomographie (MRT; engl.: Magnetic Resonance Imaging, MRI) erlaubt die dreidimensionale Abbildung von Gehirnstrukturen. Dabei macht sich dieses Verfahren den Effekt der magnetischen Kernresonanz zu Nutze, welcher bereits seit den 1950er Jahren in der organischen Chemie bei Analyseverfahren Anwendung findet. Die für die strukturelle Bildgebung notwendige Technik wurde im Jahr 1973 von Lautenbur in der internationalen Zeitschrift *Nature* vorgestellt und revolutionierte damit die medizinische Diagnostik. Seit den 1980er Jahren gehört die MRT zum festen Repertoire medizinischer Diagnoseinstrumente. Doch nicht nur in der Medizin, auch in den kognitiven Neurowissenschaften erwies sich dieses Verfahren als die wohl am besten geeignete Methode zur Darstellung und Vermessung struktureller Merkmale des menschlichen Gehirns, wie beispielsweise Gehirnvolumen, Anteile weißer und grauer Gehirnsubstanz oder bestimmter anatomische Strukturen. Im Besonderen erfuhr jener Teil der neurowissenschaftlichen Forschung, welcher als „kognitive Neuroanatomie“ bezeichnet wird und sich mit Struktur-Funktionsbeziehungen im menschlichen Gehirn beschäftigt, enormen Aufwind durch die Entwicklung dieser Methode.

### *Grundlagen*

Atomkerne mit einer ungeraden Zahl von Protonen und Neutronen haben die Eigenschaft, einen permanenten Drehimpuls um die eigene Achse (Kernspin oder Spin) auszuführen. Jeder Atomkern, der einen Spin aufweist, erzeugt auch ein schwaches Magnetfeld. Da sich jedoch die Spins der Atomkerne zufällig im Raum orientieren, kompensieren sie sich gegenseitig, weswegen im Normalfall kein magnetisches Feld um ein organisches Gewebe messbar ist. Voraussetzung für die Nutzung von Magnetresonanz (MR-) Signalen ist daher zunächst die Ausrichtung der Spins entlang eines externen statischen Magnetfelds, welches eine parallele oder antiparallele Orientierung der Spins bewirkt. Parallel ausgerichtete Kerne befinden sich in einem niedrigeren Energiezustand als antiparallel ausgerichtete. Nach anfänglichen Fluktuationen einzelner Kerne zwischen höheren und niedrigeren Energiezuständen befinden sich letztendlich mehr

Atomkerne eines Gewebeabschnitts im niedrigeren Energiezustand, woraus eine statische Nettomagnetisierung parallel zum externen Magnetfeld resultiert. Allerdings ist diese Ausrichtung nie vollständig parallel oder antiparallel, es verbleibt eine Kreiselbewegung der Kerne um den Vektor des externen Magnetfelds, was als Präzession bezeichnet wird.

Die Ausrichtung der Kerne an einem externen statischen Magnetfeld stellt lediglich den ersten Schritt bei der MRT dar, da das Verharren der Kerne in diesem dynamischen Verhältnis (mehr parallel als antiparallel, auch Equilibrium genannt) noch keine messbaren Signale ermöglicht. Ein MR-Signal entsteht erst, wenn sich die Magnetisierungsachse der Kerne vorübergehend verschiebt und sich die Magnetisierung anschließend wieder in Richtung Equilibrium bewegt. Diese vorübergehende Verschiebung wird über hochfrequente magnetische Impulse (Radio Frequency, RF-Impulse) unterschiedlicher Stärke und Dauer erreicht; die Magnetisierung der Atomkerne kippt aus ihrer parallelen Ausrichtung, worauf sich eine zum statischen Feld transverse (im optimalen Fall um  $90^\circ$  gekippte) Magnetisierung ergibt. Des Weiteren kommt es zur Synchronisation der Kreiselbewegung bzw. Präzession. Klingt der Impuls ab, richten sich die Kerne wieder nach dem statischen Magnetfeld aus, worauf eine elektromagnetische Resonanzwelle (FID, Free Induction Decay) erzeugt wird. Dieser FID wird von spulenförmigen Antennen im Magnetresonanztomographen gemessen und bildet die Grundlage der MR-Signaldetektion.

Für das Abklingen der Transversalmagnetisierung sind zwei unabhängige Vorgänge verantwortlich. (1) Die Spin-Gitter-Wechselwirkung (T1-Zeit) bezeichnet die Energieabgabe an das umliegende Gewebe. (2) Unter Spin-Spin-Wechselwirkung (T2-Zeit) versteht man den Abbau der synchronen Präzession der Kerne. Beide Zeiten sind gewebeabhängig (z.B. sind die T1 und T2-Zeiten kürzer für die weiße als für die graue Hirnsubstanz). Diese Spezifität ermöglicht die Differenzierung von Gewebearten und anatomischen Strukturen. Über verschiedene Gewichtungen von T1 und T2 kann überdies der Kontrast im MR-Bild variiert werden.

Obwohl grundsätzlich alle Atomkerne, welche einen Spin aufweisen, für die MRT geeignet sind, werden in praxi ausschließlich im menschlichen Gewebe vorkommende Wasserstoffkerne genutzt. Dies ist vor allem in der hohen Konzentration von Wasser im menschlichen Körper und in der Tatsache begründet, dass Wasserstoffkerne den größten magnetischen Moment aufweisen.

#### *Räumliche und zeitliche Auflösung*

MR-Signale werden sequenziell von Gewebeschichten gemessen, die anschließend zu einem dreidimensionalen Bild des menschlichen Gehirns zusammengefügt werden. Jede Schicht muss dabei mehrmals nacheinander angeregt werden, um ein MR-Bild zu erhalten. Diese Schichten sind üblicherweise ca. 1 bis 10 mm dick und enthalten ein Raster von einzelnen Messpunkten, so genannte Voxel. Je größer und feiner das Voxel-Gitter pro Schicht ist, desto höher ist die räumliche Auflösung – häufige Anwendung finden Raster von  $256 \times 256$  Voxel. Die Signalstärke der einzelnen Messpunkte ist durch die Anzahl der Kerne pro Voxel determiniert: Je größer ein Voxel, desto mehr Kerne liefern das MR-Signal und desto stärker ist dieses. Die räumliche Auflösung ist nicht nur eine Frage technischer Parameter – vielmehr gilt, dass für eine höhere Auflösung bei gleich

bleibendem Signal-Rauschen-Abstand die Akquisitionszeit erhöht werden muss; bei einer Akquisitionszeit von 1 bis 2 Sekunden beträgt sie etwa  $1.25 \times 1.25 \times 5$  mm. Da sich im Gegensatz zur funktionellen MRT die klassische MRT darauf beschränkt, strukturelle Informationen des menschlichen Gehirns zu gewinnen, spielt die zeitliche Auflösung eine untergeordnete Rolle. In jedem Fall müssen die Atomkerne mit den RF-Impulsen wiederholt stimuliert werden, um genügend Daten für ein exaktes neuroanatomisches Abbild des jeweiligen Gehirns zu erhalten.

### *Anwendung*

Wie bei PET ist eine MRT-Messung stets an das Labor gebunden. Der Proband oder die Probandin legt sich dafür in den Tomographen, einer Röhre mit ca. 60 cm Durchmesser. Während der Messung mit einer regulären Dauer zwischen 20 und 40 Minuten muss der Kopf möglichst unbewegt bleiben um Aufnahmeartefakte zu verhindern. Da derartige Bewegungsartefakte massive Probleme bei der Auswertung bedingen können, wurden bereits verschiedene Vorrichtungen vorgeschlagen, um dem Kopf zu immobilisieren. Neben Beißstangen oder Kopfschalen wird der Kopf des Probanden in den meisten Fällen lediglich mittels weicher Schaumstoffkeile fixiert. Der Messvorgang selbst geht mit einer hohen Geräusentwicklung einher (laute Klopfgeräusche verursacht durch Elektromagneten in der Röhre), weswegen im Regelfall zum Schutz Kopfhörer und/oder Ohrstöpsel benutzt werden. Die einengende Umgebung im Tomographen sowie die hohe Geräusentwicklung können Angstgefühle auslösen, was die Verabreichung von Beruhigungsmitteln in manchen Fällen notwendig macht. Vor allem bei (Klein-)Kindern stößt die praktische Anwendbarkeit dieses Verfahrens an ihre Grenzen. So ist bei Kindern unter fünf Jahren für die Durchführung einer MRT-Untersuchung im medizinischen Bereich üblicherweise eine Sedierung oder Vollnarkose notwendig um Bewegungsartefakte und die mit dem Messvorgang verbundene Stresssituation zu vermeiden.

### *Aussagekraft*

Die MRT gilt gegenwärtig als State-of-the-art-Verfahren zur Darstellung und Vermessung struktureller Merkmale des Gehirns. Was vor den 1970er Jahren lediglich über Untersuchungen von Gehirnen post-mortem möglich war, kann nun jederzeit und wiederholt mit Hilfe dieses Verfahrens, zudem mit einer hohen Genauigkeit, realisiert werden.

### *Vor- und Nachteile*

Den bereits angeführten Stärken dieses Verfahrens stehen jedoch hohe Kosten für Anschaffung, Betrieb und Wartung sowie potenzielle (wenn auch unwahrscheinliche) Gesundheitsrisiken gegenüber. Bezug nehmend auf den letztgenannten Aspekt sind zwei Einflussquellen zu beachten. Zum einen sind die Probanden starken statischen Magnetfeldern ausgesetzt, welche jedoch bis zu 4 Tesla (üblicherweise werden MRT mit einer Feldstärke von 1.5 Tesla verwendet) nicht gesundheitsbeeinträchtigend sind. Zum anderen sind minimale intracraniale Erwärmungseffekte durch die RF-Impulse zu beobachten. Die Betrachtung der bisherigen Literatur lässt auf keine Gesundheitsrisiken durch diese Effekte schließen, allerdings kann aus Mangel an Längsschnittuntersuchun-

gen keine absolute Sicherheit darüber herrschen. Die erfolgreiche und unproblematische Anwendung der MRT seit dem Beginn der 1980er Jahre lassen jedoch Gesundheitsrisiken als äußerst unwahrscheinlich erscheinen. Wie eingangs erwähnt spielt die MRT heute eine bedeutsame Rolle für die Untersuchung von Zusammenhängen zwischen Gehirnstrukturen und kognitiven Funktionen. Unterschiede in der Größe verschiedener anatomischer Merkmale lassen sich millimetergenau messen und mit verschiedenen kognitiven Maßen in Beziehung setzen. So fanden beispielsweise Haier et al. (2004) beachtliche Zusammenhänge zwischen dem Anteil grauer Substanz in frontalen Gehirnregionen und dem Intelligenzniveau der Probanden. Andere Untersuchungen legen nahe, dass Lernprozesse auch mit makrostrukturellen Veränderungen einhergehen können, wie etwa bei Taxifahrern (Maguire et al., 2000) oder Musikern (Gaser & Schlaug, 2003) gezeigt werden konnte.

### 4.3 Funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT, fMRI)

Die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT, engl.: functional Magnetic Resonance Imaging, MRI) stellt eine Erweiterung der MRT um die Messung funktioneller Parameter des Nervensystems dar. Mit diesem Verfahren kann mit ähnlich hoher räumlicher Auflösung die neuronale bzw. Gehirnaktivierung gemessen werden. Die Entwicklung der fMRT lässt sich auf Anfang der 1990er Jahre datieren, wo erstmalig Versuche unternommen wurden, aus hämodynamischen Veränderungen im Gehirn Rückschlüsse auf die zu Grunde liegende neuronale Aktivität zu ziehen (vgl. Aine, 1995; Raichle, 1998).

#### *Grundlagen*

Die Grundlage für die Messung zerebraler Aktivität bildet das BOLD-Signal (Blood Oxygen Level Dependent), welches von Ogawa und Mitarbeitern im Jahr 1990 beschrieben wurde. Sie beobachteten, dass sich Blutgefäße in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt (Oxygenisierungsgrad) des Bluts unterschiedlich gut mit MRT abbilden lassen. Dieses Phänomen lässt sich darauf zurückführen, dass sauerstoffreiches Blut (mit hoher Konzentration von Oxyhämoglobin) andere magnetische Eigenschaften aufweist als sauerstoffarmes (mit hoher Konzentration von Desoxyhämoglobin).

Wird ein bestimmtes Gehirnareal, etwa im Zuge von kognitiven Anforderungen, aktiviert, kommt es zu einem gesteigerten Energie- und Sauerstoffverbrauch in dieser Region. Dieser bewirkt eine Erweiterung der Blutgefäße und einen Anstieg von regionalem zerebralen Blutfluss (rCBF) und Blutvolumen (rCBV). Der dadurch entstehende Zufluss an sauerstoffreichem Blut übersteigt den Sauerstoffbedarf der Neuronenpopulationen des aktivierten Gehirnareals. Daher befindet sich in den aktivierten Arealen Blut mit einem erhöhten Anteil an Oxyhämoglobin und einem verringerten Anteil an Desoxyhämoglobin. Desoxyhämoglobin verhält sich paramagnetisch (verändert das magnetische Feld seiner unmittelbaren Umgebung und hat eine höhere magnetische Suszeptibilität), während Oxyhämoglobin diamagnetisch ist und diese Effekte nicht zeigt. Die unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften äußern sich darin, dass ein Anstieg an Desoxyhämoglobin mit einer Abnahme, ein Abfall an

Desoxyhämoglobin mit einem Anstieg des MR-Signals korreliert. Die durch den regional gesteigerten Blutfluss aktivitätsabhängige Verschiebung des Gleichgewichts zwischen Oxy- und Desoxyhämoglobin stellt die BOLD-Antwort dar, welche mit Hilfe eines MRT gemessen werden kann.

#### *Räumliche und zeitliche Auflösung*

Die räumlichen Auflösungen liegen bei Scannern mit einem Magnetfeld von 1.5 Tesla etwa bei 5 mm<sup>3</sup> und verbessern sich bei Einsatz von Hochfeld-MR-Scannern (mit Feldstärken von bspw. 4 Tesla und mehr). Ein prinzipieller Nachteil dieses Verfahrens besteht in der eingeschränkten zeitlichen Auflösung. Diese Restriktion ist jedoch nicht primär technischer Natur – durch neue Methoden können Bilder in Abständen von weniger als 100 ms aufgenommen werden –, sondern steht mit den gemessenen physiologischen Veränderungen ursächlich in Zusammenhang. Wird ein bestimmtes Areal aktiv, findet sich ein charakteristischer Zeitverlauf des BOLD-Signals, welcher verschiedenen physiologischen Prozessen zugeordnet wird. Vor dem eigentlichen Signalanstieg durch den gesteigerten Blutfluss wird manchmal auch ein kurzzeitiger Abfall des Signals beobachtet, welcher den erhöhten Sauerstoffverbrauch (Zunahme der Desoxy- und Abnahme der Oxyhämoglobinkonzentration) abbilden soll. Erst nach einer zeitlichen Verzögerung von etwa 2 Sekunden erhöht sich der regionale Blutfluss, wobei nun die Versorgung mit oxygenisiertem Blut den tatsächlichen Verbrauch übersteigt, weswegen es zum oben beschriebenen Ungleichgewicht zwischen Oxy- und Desoxyhämoglobin und zur Ausbildung des BOLD-Signals kommt. Auch wenn die Annahme verbreitet ist, dass die erste Signalantwort (vor der Erhöhung des Blutflusses) stärker mit der neuronalen Aktivität zusammenhängt, wird die zweite Signalveränderung (der Anstieg des regionalen Blutflusses) als reliables und valides Maß für die zu Grunde liegende Gehirnaktivierung betrachtet. Dies ist unter anderem auf eine inkonsistente Befundlage in Bezug auf die Existenz der ersten Signalveränderung und die Notwendigkeit des Einsatzes von Hochfeld-MR-Scannern zur Detektion derselben zurückzuführen. Bei Betrachtung der eigentlichen (zeitverzögerten) BOLD-Antwort ergibt sich natürlich das Problem, dass mit Hilfe dieses Verfahrens lediglich bestimmt werden kann, wo neuronale Aktivität stattfindet und nicht wann und wie lange. Dieser zeitliche Aspekt ist aber gerade bei kognitiven Informationsverarbeitungsprozessen von Relevanz, zeigt sich doch in MEG- und EEG-Studien, dass neuronale Reaktionen auf Stimuli binnen kurzer Zeit (300–800 ms) nach dem Präsentationszeitpunkt wieder abklingen. Auch für elementar-kognitive Aufgaben (Aufgaben, welche binnen einer oder weniger Sekunden gelöst werden können) erscheint die zeitliche Auflösung der fMRT unzureichend für die Abbildung des Prozessverlaufs während der kognitiven Bearbeitung.

#### *Anwendung*

fMRT-Untersuchungen benötigen die gleiche Untersuchungsumgebung wie MRT-Messungen (der Proband muss im Tomographen liegen), was den Einsatz verschiedener Untersuchungsparadigmen beträchtlich erschwert. Visuelle Stimuli können nicht in der üblichen Form auf einem Computermonitor dargeboten, sondern müssen mittels einen über den Augen angebrachten Spiegel, wel-

cher den außerhalb der Röhre befindlichen Computermonitor reflektiert, präsentiert werden. Antworten des Probanden können in den meisten Fällen nur über eine Tastatur gegeben werden, welche jedoch aufgrund der notwendigen Einschränkung von Kopfbewegungen zur Vermeidung von Bewegungsartefakten nicht direkt gesehen werden kann; der Proband muss sich daher vor dem eigentlichen Messvorgang die Lage der Antworttasten einprägen (z.B. welcher Finger auf welcher Taste liegt). Die laute Umgebung im Tomographen sowie Bewegungsartefakte machen eine mündliche Beantwortung meist unmöglich. Auch die Darbietungsform von Stimuli ist durch die Geräuschkulisse teilweise eingeschränkt. Es erfordert beispielsweise spezielle Stimulationsgeräte, um auditives Material so darzubieten, dass auch subtilere Unterschiede (in Tonhöhe, oder, vor allem bei Sprachstudien relevant, feine Unterschiede in der Sprachmelodie oder Betonung) wahrgenommen werden können. Eine weitere Einschränkung besteht in der geringen Stärke von BOLD-Signalen auf einen einzelnen Stimulus, was vor allem bei Vorhandensein einer beschränkten Anzahl an Stimuli problematisch sein kann.

Der geringen Stärke des BOLD-Signals auf einzelne Stimuli muss allerdings unabhängig von anderen Nachteilen begegnet werden, da in der Regel nur über die Aggregation von mehreren Messzeitpunkten bzw. Bildern Veränderungen im Blutfluss reliabel erfasst werden können. Zur Realisierung dieser Aggregation finden üblicherweise zwei Arten von Designs Anwendung: Blockdesigns und event-related Designs. Seit Beginn der fMRT-Forschung werden Blockdesigns eingesetzt, in denen verschiedene Untersuchungsbedingungen blockweise alternierend vorgegeben werden. Entweder werden in diesem Design verschiedene Experimentalbedingungen miteinander verglichen (bspw. kognitive Aufgaben desselben Typs jedoch mit unterschiedlicher Komplexität), oder es wird im einfachsten Fall eine Experimentalbedingung einer Kontrollbedingung (z.B. Ruhebedingung) gegenübergestellt. Die statistische Auswertung besteht im Vergleich des BOLD-Signals zwischen den Untersuchungsbedingungen. Neben dem Blockdesign finden zunehmend häufig auch ereignisbezogene (event-related) Designs Anwendung. Im Gegensatz zum Blockdesign werden hier Stimuli (bzw. Aufgaben) unterschiedlicher Untersuchungsbedingungen nicht blockweise aggregiert, sondern einzeln und in bestimmter Abfolge präsentiert. Die mit den einzelnen Stimuli (bzw. Aufgaben) einhergehenden (ereigniskorrelierten) BOLD-Antworten werden anschließend aggregiert und – genauso wie beim Blockdesign – zwischen verschiedenen Experimentalbedingungen verglichen. Ein wesentlicher Vorteil dieser Vorgangsweise besteht darin, dass die Aggregation von Signalen einzelner Stimuli sowohl nach a priori festgelegten Kriterien (bspw. Aufgaben desselben Typs werden jeweils zusammengefasst) als auch a posteriori (bspw. erfolgreich gelernte vs. nicht gelernte Stimuli) erfolgen kann. Dieses Design erlaubt daher in der Regel einen größeren Spielraum bei der Analyse der die kognitiven Prozesse begleitenden Gehirnaktivierung. Das mit diesem Design verbundene Problem der langsamen BOLD-Antwort (Abklingen des BOLD-Signals auf einen Stimulus erst nach 10–12 s) wurde inzwischen mit statistischen Analyseverfahren gelöst, sodass auch kurze Intervalle von 1 bis 4 Sekunden zwischen den Stimuli realisierbar sind (Savoy, 2001).

*Aussagekraft*

Wohl die bedeutendste Frage im Zusammenhang mit der Aussagekraft von fMRT-Studien ist jene nach der Beziehung zwischen neuronaler Aktivität und dem gemessenen BOLD-Signal, welches Veränderungen im lokalen Blutfluss abbildet. Nur dann, wenn auf Basis empirischer Befunde angenommen werden kann, dass diese physiologischen Phänomene stets miteinander einhergehen und das BOLD-Signal diese reliabel abbildet, kann dieses Verfahren seine Stärken ausspielen. Jüngere Überblicksarbeiten zu den Kopplungen zwischen neuronaler Aktivität, Veränderungen im zerebralen Blutfluss und hämodynamischer Parameter sprechen generell für die Validität dieses Verfahrens (z.B. Logothetis et al., 2001), wenngleich die Mechanismen des Zusammenspiels dieser Variablen nicht vollends geklärt sind (vgl. Heeger & Ress, 2002; S.-G. Kim, 2003; Raichle, 1998). Dies kann unter anderem darauf zurückgeführt werden, dass bereits auf der Kriteriumsebene (betrachtet man das fMRT-Signal als Prädiktor) noch Ungewissheit über die Beziehungen zwischen verschiedenen Indikatoren neuronaler Aktivität (lokale Feldpotenziale, Feuerraten, synaptische Aktivität etc.) herrscht (Heeger & Ress, 2002).

Die Aussagekraft von fMRT-Studien hängt darüber hinaus auch von der Qualität des eingesetzten Untersuchungsdesigns ab. Sowohl das Block- als auch das event-related Design verfolgen das Ziel, die neuronalen Grundlagen kognitiver Prozesse oder Funktionen zu untersuchen. Da das menschliche Gehirn quasi permanent aktiv ist, ergibt sich die Notwendigkeit des Vergleichs verschiedener Untersuchungsbedingungen oder zumindest einer Experimental- und einer Kontrollbedingung. Wesentlich ist, dass sich beide Bedingungen ausschließlich in der interessierenden kognitiven Funktion unterscheiden und nicht hinsichtlich irrelevanter Aspekte. Anders formuliert bedeutet dies, dass die Untersuchungsbedingungen dergestalt sein müssen, dass Aktivierungsunterschiede zwischen den Bedingungen relativ eindeutig auf den Prozess oder die Funktion von Interesse zurückzuführen sein müssen. Da sowohl inhaltlich als auch statistisch häufig die Aktivierung während einer Bedingung von der Aktivierung während einer anderen Bedingung abgezogen wird, spricht man auch von Subtraktionsmethode (vgl. Raichle, 1998). Diese Vorgehensweise gerät jedoch häufig unter Kritik (z.B. Poldrack, 2000; Sergent, 1994), da komplexere kognitive Prozesse nicht immer eine einfache additive Funktion von elementaren Prozessen darstellen. Besonders ungeeignet erscheint der Vergleich einer Bedingung mit kognitiven Anforderungen und einer einfachen Ruhebedingung. Da nicht abgeschätzt werden kann, welche kognitiven Prozesse während der Ruhebedingung ablaufen, herrscht auch keine Klarheit darüber, was – sowohl auf kognitiver als auch neurophysiologischer Ebene – von der kognitiven Anforderungsbedingung subtrahiert wird. So haben beispielsweise Binder et al. (1999) gefunden, dass während einer Ruhebedingung Regionen, welche mit Sprachproduktion assoziiert sind, aktiv sind, was die Autoren auf „mentale Selbstgespräche“ zurückführten.

*Vor- und Nachteile*

Die Vor- und Nachteile der weiter oben beschriebenen MRT treffen auch weitgehend auf die fMRT zu. Die Tatsachen, dass es sich um eine non-invasive Me-

thode handelt, die im Vergleich zu PET deutlich geringere Kosten verursacht und Aktivierungsmessungen mit hoher räumlicher Auflösung im Rahmen von verschiedenen Untersuchungsdesigns erlaubt, und dass die MRT-Hardware weit verbreitet ist, machen fMRT zur Methode erster Wahl für viele Forscher in den kognitiven Neurowissenschaften. Trotz der vielen Vorteile dieses Verfahrens sollten auch die Nachteile und Einschränkungen sowohl hinsichtlich Anwendbarkeit und Aussagekraft nicht übersehen werden, welche den ergänzenden oder kombinierten Einsatz von anderen Verfahren für das Verstehen des Ablaufs und der Lokalisation kognitiver Prozesse und Funktionen unerlässlich machen.

#### 4.4 Transcraniale Nahe-Infrarot-Spektroskopie (NIRS)

Transcraniale Nahe-Infrarot-Spektroskopie (transcranial Near-InfraRed-Spectroscopy, NIRS) kann zweifelsohne zu den jüngeren Errungenschaften in den bildgebenden Verfahren gezählt werden. Obwohl das Nahe-Infrarot-Licht bereits vor ca. 200 Jahren erstmalig entdeckt wurde (vgl. McClure, 2003, für einen historischen Überblick), kann der Zeitpunkt, zu dem man sich erstmalig mit der Anwendung dieser Lichtfrequenz für funktionelle Bildgebung beschäftigt hat, auf 1977 datiert werden (Experiment mit Katzen von Jöbsis, 1977). Anfang der 1990er Jahre berichteten vier unabhängige Forschergruppen von der Möglichkeit, auch die Gehirnaktivierung im Menschen mit Hilfe dieser Methode zu untersuchen, im Jahr 1995 wurde die erste Studie veröffentlicht, die sich mit motorischer Gehirnaktivierung beschäftigte (vgl. Koizumi et al., 1999). Zum heutigen Zeitpunkt erscheint dieses Verfahren ein hoffnungsvoller Kandidat für die zukünftige kognitiv-neurowissenschaftliche Forschung zu sein (vgl. Boas, 2004).

##### *Grundlagen*

NIRS ermöglicht die Messung kortikaler Aktivierung über die damit einhergehenden physiologischen Veränderungen mit optischen Methoden. Licht mit Wellenlängen zwischen 700 und 1000 nm (Nahe-Infrarot-Licht) durchdringt biologisches Gewebe (Kopfhaut, Schädelknochen) in einem ausreichenden Maß, sodass Veränderungen in Absorptions- und Reflektionsparametern im Kortex bedingt durch neuronale Aktivierung gemessen werden können. Insbesondere lassen sich zwei Arten von mit kortikaler Aktivität assoziierten Signalen messen: (1) Intrazelluläre Veränderungen: Wenn Neuronen feuern, ändern sich die Lichtstreuungseigenschaften der neuronalen Membranen (Stepnoski et al., 1991). Dieses Signal tritt sehr schnell nach Stimulusdarbietung auf (im Millisekundenbereich) und ist mit ereigniskorrelierten Potenzialen (EKPs, vgl. Abschnitt 4.5 zum EEG) vergleichbar. Allerdings sind diese Reaktionen sehr schwach, sodass die ereigniskorrelierten optischen Signale nur über Mittelung über viele (z.B. 1000) Darbietungsdurchgänge sichtbar gemacht werden können. (2) Intravaskuläre Veränderungen. Wie bereits weiter oben beschrieben führt eine Zunahme der Gehirnaktivierung zu regional gesteigertem Blutfluss und Blutvolumen und letztlich zu einer Veränderung des Verhältnisses von Oxy- und Desoxyhämoglobinkonzentration im Blut. Diese physiologische Re-

aktion geschieht deutlich langsamer und tritt erst nach ca. 2 Sekunden ein. Oxy- und Desoxyhämoglobin zeichnen sich nicht nur durch verschiedene magnetische Eigenschaften, sondern auch durch unterschiedliche Reflektions- und Absorptionscharakteristiken von sichtbarem, jedoch vor allem von Nahe-Infrarot-Licht aus, welche die Grundlage für die NIRS-Messung bilden.

Bei beiden Arten von Signalen wird über optische Fasern (Injektoren) Licht im Bereich der oben erwähnten Wellenlänge in einem Winkel von ca. 45° in den Schädel gestrahlt, und das reflektierte Licht wird mittels Optoden (Detektoren), die räumlich neben dem Injektor positioniert sind, gemessen. Bei Verwendung mehrerer Messpunkte (bzw. mehrerer Lichtinjektoren und -detektoren) werden die verschiedenen Lichtquellen über Frequenzmodulation differenziert. Da sich vor allem die Absorptions- und Reflektionsspektren von Oxy- und Desoxyhämoglobin stark unterscheiden, wird vorwiegend die langsamere, hämodynamische Reaktion mittels NIRS zur Bestimmung der kortikalen Aktivierung gemessen.

#### *Räumliche und zeitliche Auflösung*

Die topographische Auflösung hängt von der Anzahl der Messpunkte bzw. der verwendeten Lichtinjektoren und -detektoren ab und liegt derzeit im Zentimeterbereich. Räumlich betrachtet liefert den Hauptbeitrag für das NIRS-Signal die graue Substanz, insbesondere ihre äußeren Bereiche (bis ca. 20 mm unter der Schädeldecke). Daher ist dieses Verfahren derzeit auf die Messung der kortikalen Aktivität beschränkt. Die zeitliche Auflösung hängt von der gemessenen physiologischen Reaktion ab. Untersucht man die mit neuronaler Aktivität einhergehenden hämodynamischen Veränderungen, liegt die Auflösung wie bei fMRT und PET im Sekundenbereich, betrachtet man jedoch ereigniskorrelierte Signale, sind Auflösungen im Millisekundenbereich möglich.

#### *Anwendung*

Bei aktuellen Systemen sind die Lichtinjektoren und -detektoren in Abständen von 2 bis 3 cm nebeneinander in einer Matrix angeordnet. Jeweils zwischen Injektor und Detektor befindet sich der Messpunkt. Das Licht wird über optische Fasern mit Durchmessern zwischen 1 und 3 mm eingestrahlt, das reflektierte Licht von den daneben angeordneten Optoden gemessen. In den meisten Fällen sind die Fasern und Optoden in eine plastische Haube eingearbeitet, die ihren kontinuierlichen Kontakt mit der Schädeloberfläche sicherstellt. Das Hauptproblem bei NIRS sind Artefakte, die durch die Lichtabsorption von Haaren (Absorptionsrate zwischen 20 % und 50 %) entstehen. Daher ist es unabwendbar, dass die Injektoren und Detektoren zwischen den Haaren direkt auf der Kopfhaut platziert werden.

Die Messung der kortikalen Aktivierung mittels NIRS ist nach erfolgreicher Applikation kaum bedeutsamen Einschränkungen unterworfen. So spielen weder Muskel- noch Augenbewegungen eine Rolle, selbst Messungen beim Gehen oder Laufen sollen in Zukunft möglich sein. Auch Untersuchungen von Kindern verschiedenen Alters werden bereits erfolgreich vorgenommen (z.B. Baird et al., 2002). Es ist bei diesen – verglichen mit fMRT – weder eine Sedierung notwendig, noch sind sie – wie beispielsweise bei PET – gesundheitsschädigender Strahlung ausgesetzt. Insgesamt dürfte dieses Verfahren zukünftig eine Viel-

zahl von Untersuchungsmöglichkeiten im Bereich der kognitiven Neurowissenschaften eröffnen.

#### *Aussagekraft*

Den Hauptbeitrag für das NIRS-Signal liefert die graue Substanz, insbesondere ihr äußerer Bereich. In Studien mit gleichzeitiger Messung von PET oder fMRT und NIRS konnte für diese Regionen eine gute Übereinstimmung in den erfassten Signalen gefunden werden (Villringer et al., 1997; Strangman et al., 2002), auch multimethodale Messungen mit EEG erbrachten überzeugende Befunde zu Gunsten der Reliabilität und Validität dieses Verfahrens (z.B. Kennan et al., 2002). Neben dem Artefaktproblem durch Haare bestehen gegenwärtig noch Zweifel, ob und inwieweit Blutgefäße in der Kopfhaut das Signal beeinträchtigen und zu falschen Ergebnissen führen können; hier besteht ohne Zweifel noch Bedarf an weiteren Studien zur Quelle des NIRS-Signals.

#### *Vor- und Nachteile*

Die meisten Vorteile von NIRS wurden bereits im Zuge der Anwendungsbeschreibung erläutert. Dazu gehören die Nichtinvasivität und Ungefährlichkeit dieser Methode, die hohe zeitliche Auflösung, die Möglichkeit, verschiedene Parameter der kortikalen Aktivierung zu messen, die einfache Anwendbarkeit, die weitgehende Robustheit gegenüber Muskel- und Augen bzw. generell Bewegungsartefakten, die vergleichsweise niedrigen Kosten und ein breites Anwendungsspektrum. Die räumliche Auflösung ist derzeit allerdings auf kortikale Regionen beschränkt, des Weiteren besteht das Problem von Artefakten durch Haare. NIRS befindet sich derzeit noch in der Entwicklungsphase, obwohl bereits Systeme angeboten werden, deren Leistungsfähigkeit (und Preis) ein breites Spektrum abdecken. In naher Zukunft könnte dieses Verfahren jedoch eine ähnlich weite Verbreitung finden wie die Elektroencephalographie (EEG).

## 4.5 Elektroencephalographie (EEG)

Die Entwicklung der Elektroencephalographie (EEG) geht auf Hans Berger (1929) zurück, welcher in den 1920er Jahren erstmals Spannungsschwankungen („Hirnströme“) an der Schädeloberfläche von Menschen erfolgreich messen konnte. Heute kann dieses Verfahren auf eine reiche Entwicklungsgeschichte zurückblicken, die zur Etablierung des EEG als Standardverfahren sowohl in der medizinischen Forschung und Praxis als auch in der psychophysiologischen Forschung beigetragen hat.

#### *Grundlagen*

Grundlage für die an der Schädeloberfläche messbaren elektrischen Signale sind Aktivierungen von Neuronenverbänden. Für das EEG-Signal werden in erster Linie Pyramidenzellen verantwortlich gemacht, die entlang der kortikalen Schichten senkrecht zur Kortexoberfläche verlaufen (Axone nach unten, apikale Dendriten nach oben bis in die oberste Kortexschicht). Wenn ein Neuron (bzw. in diesem Falle eine Pyramidenzelle) feuert, entsteht ein extrazellulärer Stromfluss, der über einen intrazellulären Strompfad kreisförmig geschlossen

wird (mittels EEG wird sowohl der intra- als auch der extrazelluläre Stromfluss erfasst). Würden alle Neuronen ungeordnet feuern, wäre kein messbares EEG-Signal an der Schädeloberfläche vorhanden, da die durch Einzelzellen generierten Potenziale zu schwach sind. Es ist daher erforderlich, dass Tausende von Neuronen synchron feuern um entsprechend große EEG-Signale zu generieren. Die Potenziale treten überdies mit einer gewissen Rhythmizität auf, die von subkortikalen Strukturen (z.B. Alpha-Wellen durch den Thalamus) mitbedingt sind.

Elektroden auf der Schädeloberfläche können im Gegensatz zur Magnetoencephalographie (MEG, siehe unten) nur Spannungs- bzw. Potentialdifferenzen zwischen zwei Ableitungsorten messen, sind also stets referenzabhängig. In diesem Zusammenhang unterscheidet man bipolare versus monopolare Ableitungen. Während bei bipolaren Ableitungen die Potentialdifferenz zwischen zwei aktiven Elektroden (beide liegen über elektrisch aktiven Regionen auf der Schädeloberfläche) gemessen wird, leitet man bei monopolarer Montage aktive Elektroden gegen eine (inaktive) Referenzelektrode ab. Letztere wird an Orten platziert, von denen ursprünglich die Annahme vertreten wurde, dass sie keine EEG-Signale enthalten (z.B. Ohrfläppchen, Nasenspitze). Diese Sichtweise musste jedoch aufgegeben werden, da gezeigt wurde, dass kein Punkt am Körper elektrisch inaktiv ist (Nunez, 1995). Allerdings spielt das Referenzproblem bei aktuellen EEG-Systemen keine Rolle mehr, da die gemessenen EEG-Signale a posteriori je nach Fragestellung auf verschiedene Referenzen (bspw. das Mittel aller aktiven oder nur der umliegenden Elektroden) bezogen werden können.

#### *Räumliche und zeitliche Auflösung*

Die prinzipielle Stärke von EEG und MEG gegenüber den klassischen bildgebenden Verfahren wie PET oder fMRT liegt ohne Zweifel in der hohen zeitlichen Auflösung. Elektrophysiologische Prozesse können im Millisekundenbereich gemessen werden, was vor allem für die Untersuchung von Verläufen kognitiver Prozesse von besonderer Relevanz ist. Die konkret realisierte Zeitauflösung hängt wiederum vom Untersuchungsdesign bzw. den gemessenen Parametern ab (siehe dazu den Unterpunkt Anwendung). Die Frage nach der räumlichen Auflösung kann nicht so einfach beantwortet werden. Obgleich eine Beziehung zwischen der Anzahl der verwendeten Elektroden (von ca. 19 im klassischen 10-20-System nach Jasper, 1958, bis hin zu aktuellen Konfigurationen von 128) und der topographischen Auflösung besteht, sind die Quellen der gemessenen Potenziale und damit auch deren Lokalisierbarkeit noch immer ein umstrittenes Problem (siehe dazu den Unterpunkt Aussagekraft). Insbesondere kann davon ausgegangen werden, dass Elektrodenabstände von weniger als 2,5 cm (bzw. mehr als 128 Elektroden) keine zusätzlichen Informationen über der Aktivität bringen. Eine weitere Einflussgröße auf die räumliche Auflösung ist die Signalqualität (Ausmaß der Artefaktkontamination, Signal-Rauschen-Verhältnis).

#### *Anwendung*

Bei EEG-Untersuchungen werden Elektroden auf die vorgereinigte Kopfhaut positioniert, eine leitfähige Paste stellt den Kontakt zwischen Elektrode und Schädeloberfläche sicher. Die in den Elektroden erfassten elektrischen Signale

(im  $\mu\text{V}$ -Bereich) werden verstärkt und anschließend in digitalisierter Form aufgezeichnet. Die Anzahl der verwendeten Elektroden variiert in Abhängigkeit vom Untersuchungsgegenstand und bewegt sich von zwei Elektroden bis hin zu hochauflösenden Konfigurationen mit 128 Positionen – üblicherweise finden Elektrodenkonfigurationen zwischen 20 und 60 Ableitpositionen Anwendung. Der besondere Vorteil des EEG besteht in der weitgehenden Orts- bzw. Laborunabhängigkeit der Anwendung. Mobile EEG-Systeme, die – natürlich mit einer geringeren Elektrodenzahl – mittlerweile bereits in Handheld-Größe angeboten werden, eröffnen vielfältige Möglichkeiten zur Aufzeichnung der elektro-physiologischen Aktivität in unterschiedlichen Kontexten. Einschränkungen ergeben sich hier allerdings durch Artefakte unterschiedlicher Herkunft. Da die gemessenen elektrischen Signale äußerst schwach sind (im Bereich von 1 bis 200  $\mu\text{V}$ ), können sowohl externe elektrische Einstreuungen als auch Biosignale, welche nicht hirnelektrischer Natur sind, die Aufzeichnung und damit die Datenqualität massiv beeinträchtigen. Während mit Hilfe von so genannte Notch-Filtern die elektrische Netzeinstreuung mit 50 Hz unterdrückt werden kann, gibt es für Muskelartefakte derzeit noch keine optimale Möglichkeit, entsprechend kontaminierte Aufzeichnungen zu bereinigen, da diese ein breites Frequenzspektrum betreffen und größere Amplituden als das EEG-Signal aufweisen. Einfache Augenbewegungen (wie Blinzeln) können im Gegensatz zu allen anderen Muskelartefakten (a) gut lokalisiert und (b) mit Hilfe spezieller Auswertungsmethoden (z.B. regressionsanalytisch oder mittels Independent-Component-Analysis, ICA) vom EEG-Signal in ausreichendem Maß differenziert werden. Hinsichtlich der praktischen Anwendbarkeit kann man somit zusammenfassen, dass – obwohl mittlerweile mobile Systeme EEG-Untersuchungen auch im Feld technisch möglich machen – die Aufzeichnung nur unter kontrollierten Bedingungen (vor allem darf sich der Proband möglichst wenig während der Aufzeichnung bewegen) eine hohe Datenqualität erbringt, welche gerade für die Untersuchung von kognitiven Prozessen, die eine differenzierte Analyse der elektro-physiologischen Signale erfordert, Voraussetzung ist.

Aus dem EEG können verschiedene Parameter gewonnen werden, welche ebenso unterschiedliche Untersuchungsparadigmen verlangen. An dieser Stelle soll nur die grundlegende Unterscheidung von ereigniskorrelierten Potenzialen und Parametern oszillatorischer (rhythmischer) Gehirnaktivität Erwähnung finden, um die dazu notwendigen Untersuchungsdesigns und die Aussagekraft der verschiedenen Parameter zu illustrieren.

- (1) Ereigniskorrelierte Potenziale (EKP; engl.: Event-Related Potential, ERP, oder Evoked Potential, EP) stellen Reaktionen des Gehirns auf innere und äußere Ereignisse dar, welche innerhalb eines Zeitraums von ca. 500 bis 1000 ms auftreten. Diese sind im EEG in der Regel nicht sichtbar, da sie nur sehr geringe Amplituden (1–40  $\mu\text{V}$ ) aufweisen und von der stärkeren Spontanaktivität überlagert werden. Mit Hilfe der Mittelungstechnik lässt sich der Verlauf dieses Potenzials jedoch von der Hintergrundaktivität abheben. Diese Technik basiert auf der Beobachtung, dass der ereigniskorrelierte Potenzialverlauf immer zu einem definierten Zeitpunkt nach einem Ereignis auftritt und eine konstante charakteristische Verlaufsform zeigt. Wird ein Ereignis (z.B. ein visueller Stimulus) nun wiederholt (bspw. 100-mal) dargeboten, kann über Mittelung der EEG-Aktivität das EKP sichtbar ge-

macht werden, da sich die nicht mit dem Ereignis in Beziehung stehende und daher zufällige Hintergrundaktivität ausmittelt. Die charakteristische Verlaufsform von EKPs besteht aus positiven und negativen Komponenten (Amplitudenmaxima), welche mit unterschiedlichen neurophysiologischen Vorgängen in Beziehung gesetzt werden können (vgl. Rösler & Heil, 1998). Während frühe Komponenten (im Bereich unter 100 ms) eher die initiale Stimulusverarbeitung reflektieren und vorwiegend von physikalischen Stimuluseigenschaften abhängen, sind spätere Komponenten (ab 100 ms) mit kognitiven Funktionen (Sprache, Gedächtnis, Aufmerksamkeit) assoziiert (vgl. etwa. Studien zur Bedeutung der N400-Komponente bei der Sprachverarbeitung, z.B. Kutas & Federmeier, 2000). Latenzen und Amplituden erlauben hierbei eine Quantifizierung der Komponenten.

- (2) Bei der Untersuchung von oszillatorischer Gehirnaktivität betrachtet man die im Spontan-EEG vorkommenden Rhythmen, die sich funktional in verschiedene Frequenzbereiche unterteilen lassen. Je niedriger die Frequenz (etwa zwischen 0,5 und 40 Hz), desto stärker sind in der Regel die Amplituden (zwischen 1 und 200 $\mu$ V). Bereits bei visueller Inspektion einer EEG-Aufzeichnung kann man in Abhängigkeit vom Erregungs- bzw. Wachheitsgrad des Probanden unterschiedliche Frequenzen beobachten. Üblicherweise geht ein entspannter Wachzustand mit starker Dominanz von Frequenzen im Alpha-Band einher (ca. 8–13 Hz), kognitive oder körperliche Aktivität hingegen mit höheren Frequenzen (ca. 14–30 Hz, Beta-Band). Während des Schlafs kommt es zu einer Verlangsamung der Frequenzen und dem Auftreten von Delta-Aktivität mit Frequenzen zwischen 0,5 und 4 Hz. Eine einfache EEG-Auswertung besteht beispielsweise in der Analyse des Anteils bestimmter Frequenzkomponenten im EEG; in diesem Zusammenhang drückt die Bandleistung (engl.: bandpower) den relativen Anteil eines Frequenzbands am EEG-Signal aus. Die verschiedenen Frequenzbänder erwiesen sich als unterschiedlich sensitiv für die Abbildung kognitiver Prozesse und Funktionen. Veränderungen in der Bandleistung im Theta-Band (4–7 Hz) werden mit Gedächtnisprozessen assoziiert (z.B. Bastiaansen & Hagoort, 2003.), das Alpha-Band reagiert besonders sensitiv auf Aufmerksamkeits- und Informationsverarbeitungsprozesse (z.B. Klimesch, 1999), auch Beta- (14–30 Hz) und Gamma-Rhythmen (um 40 Hz) werden ebenso mit unterschiedlichen kognitiven Funktionen in Verbindung gebracht (z.B. Basar-Eroglu et al., 1996). Im Rahmen der Analyse oszillatorischer Aktivität hat vor allem die Messung der Leistungsveränderung in verschiedenen Bändern infolge von Ereignissen oder kognitiver Beanspruchung zunehmend an Bedeutung gewonnen. Hierbei wird die Bandleistung vor einem Ereignis (z.B. vor einer kognitiven Aufgabe) mit jener während des Ereignisses (z.B. während der Aufgabenbearbeitung) in Beziehung gesetzt (vgl. die Methode der ereignisbezogenen Desynchronisation nach Pfurtscheller & Aranibar, 1977). Veränderungen in der Leistung verschiedener Frequenzbänder werden als Aktivierungsmaß oder als Indikator für bestimmte kognitive Prozesse herangezogen. Von besonderer Bedeutung erwiesen sich hier Leistungsveränderungen im Alpha-Band, da das Ausmaß der Abnahme an Alpha-Aktivität als ein valides Maß für die kortikale Aktivierung verwendet werden kann (vgl. auch Laufs et al., 2003 zur Beziehung zwischen Alpha-Aktivität und

hämodynamischen Veränderungen). Eine andere Analysemöglichkeit der oszillatorischen Aktivität besteht in der Untersuchung von Synchronien zwischen Hirnregionen, die Auskunft darüber geben, welche kortikalen Areale funktional miteinander gekoppelt sind. Diese Analysen reichen etwa von der Bestimmung von Korrelationen zwischen EEG-Signalen (Kohärenzen, Rosenberg et al., 1998) über Zusammenhänge zwischen Frequenzbändern (Tallon-Baudry, 2003) bis hin zur Gerichtetheit des Signalverlaufs (Varela et al., 2001).

#### *Aussagekraft*

Das EEG misst die Summe aller elektrischen Ereignisse an der Schädeloberfläche. Dazu gehören nicht nur die elektrische Aktivität der Nervenzellen im Gehirn, sondern auch die elektrischen Signale anderer physiologischer Herkunft (wie z.B. Muskelspannungen). Die physiologischen Grundlagen des EEG sind bis heute noch nicht gänzlich erforscht, es existieren jedoch modellhafte Ansätze, welche die an der Schädeloberfläche gemessenen Phänomene gut erklären können. Auch die funktionale Bedeutung aller berechenbaren EEG-Parameter ist noch nicht vollständig verstanden. Während beispielsweise plausible Modelle für die Bedeutung der rhythmischen Alpha-Aktivität existieren (für Bandleistungsveränderungen im Alpha-Band vgl. Lopes da Silva & Pfurtscheller, 1999), ist die Rolle der Beta- und Gamma-Aktivität für kognitive Prozesse noch umstritten (Tallon-Baudry & Bertrand, 1999). Neben der Frage nach der funktionalen Bedeutung der EEG-Signale verbleibt die Frage nach den Quellen der neuronalen Aktivität im Gehirn. Obwohl zur Lösung dieses (inversen) Problems mittlerweile verschiedene mathematische Verfahren entwickelt wurden (z.B. Low Resolution Brain Electromagnetic Tomography, LORETA; Pascual-Marqui et al., 1999), ist bei der Interpretation derartiger Ergebnisse zu bedenken, dass es stets mehrere Lösungen gibt, deren Anzahl lediglich über theoretisch begründete Einschränkungen reduziert wird. Von diesen Methoden der Quellenlokalisierung abzugrenzen sind topographische EEG-Analysen oder EEG-Mapping-Verfahren. Diese EEG-Maps veranschaulichen die topographische Verteilung von EEG-Parametern auf der Schädeloberfläche, ohne jedoch auf die anatomischen Grundlagen zu verweisen. Trotz der eingeschränkten Aussagekraft dieser Mapping-Verfahren (im Vergleich zu aufwändigeren Methoden der Quellenlokalisierung) finden sie häufig Anwendung, da damit relativ einfach ein Eindruck von der topographischen Verteilung verschiedener Kennwerte (wie z.B. Bandleistungsveränderungen) gewonnen werden kann. Obwohl die an der Schädeloberfläche gemessenen Signale in der Regel nicht zwangsläufig den darunter liegenden kortikalen Regionen zuordenbar sind, verweisen topographische Unterschiede doch darauf, dass unterschiedliche Neuronenpopulationen an einer kognitiven Leistung beteiligt sind (z.B. Jost et al., 2004).

#### *Vor- und Nachteile*

Ein augenscheinlicher Vorteil des EEG im Vergleich zu anderen bildgebenden Verfahren besteht ohne Zweifel in der hohen zeitlichen Auflösung. Da weder mit radioaktiv markiertem Material noch mit künstlich erzeugten Magnetfeldern gearbeitet wird, besteht auch keine (potenzielle) gesundheitliche Beeinträchtigung durch die Anwendung, was sowohl wiederholte als auch länger andauern-

de Messungen möglich macht. Hinzu kommen die weite Verfügbarkeit von EEG-Systemen, ihre geringen Anschaffungs- und Betriebskosten sowie die Möglichkeit, mit mobilen Systemen EEG-Untersuchungen auch außerhalb des Labors durchführen zu können. Eine weitere Überlegenheit von EEG (und MEG) liegt in der Sensitivität gegenüber oszillatorischer Gehirnaktivität, welche für Verfahren wie PET oder fMRT gänzlich unsichtbar ist, aber für kognitive Informationsverarbeitungsprozesse zunehmend als hochgradig relevant angesehen wird (Basar et al., 2001). Als nachteilig zu erwähnen sind die geringe räumliche Auflösung und das Problem der Quellenlokalisation sowie die Anfälligkeit gegenüber Artefakten verschiedener Art, welche gerade beim Einsatz außerhalb des Labors augenscheinlich werden. Auch die weitgehende Einschränkung auf kortikale neuronale Aktivität lässt sich als weiterer Nachteil anführen, da keine gesicherten Aussagen über subkortikale Signale (bspw. limbisches System, Hippocampus) getroffen werden können.

#### 4.6 Magnetoencephalographie (MEG)

Verglichen mit dem EEG handelt es sich bei der Magnetoencephalographie um ein sehr junges Verfahren, was vor allem auf die späte Entwicklung der dafür erforderlichen SQUID-Detektoren zurückzuführen ist (Clarke, 1993). Mit MEG kann auf direkte Weise die neuronale Aktivität mit derselben zeitlichen Auflösung wie im EEG, allerdings mit höherer räumlicher Auflösung gemessen werden, was dieses Verfahren vor allem für die Untersuchung ereigniskorrelierter Aktivität prädestiniert.

##### *Grundlagen*

Dieses Verfahren basiert auf der Messung magnetischer Felder, welche durch die Bewegung elektrischer Ladungen in den Neuronen im Zuge ihrer Aktivität induziert werden (vgl. die Grundlagen des EEG). Die Stärke dieser Magnetfelder liegt um acht Größenordnungen ( $< 1$  picoTesla bzw.  $< 10^{-12}$  Tesla) unter jener des Erdmagnetismus, was hochempfindliche Detektoren (SQUIDs, Superconductive QUantum Interference Devices) zur Erfassung dieser Felder nötig macht. Die hohe Empfindlichkeit ergibt sich insbesondere aus der Superleitfähigkeit der magnetischen Spulen, bewirkt über eine massive Kühlung mit flüssigem Helium ( $-269^{\circ}\text{C}$ ), und zum anderen aus der Verwendung von speziellen Verstärkern, welche die in den Spulen induzierten schwachen Ströme sichtbar machen. Die induzierte Stromstärke ist dabei proportional zur Dichte der magnetischen Feldlinien und erlaubt Rückschlüsse auf die räumliche Entfernung der Quelle. Hervorhebenswert ist in diesem Zusammenhang, dass das Körpergewebe für die erfassten biomagnetischen Felder quasi transparent ist, weswegen es verglichen mit dem EEG-Signal zu keinen Verzerrungen durch unterschiedliche Leitfähigkeiten des Gehirngewebes (z.B. Schädelknochen, Liquor) kommt. Überdies können die biomagnetischen Felder referenzunabhängig gemessen werden, während das EEG-Signal immer aus einer Potenzialdifferenz besteht.

*Räumliche und zeitliche Auflösung*

Wegen der unverzerrten Verbreitung der magnetischen Feldlinien erlaubt das MEG-Verfahren eine genauere Lokalisation der Aktivitätsquellen mit Hilfe von mathematischen Verfahren. Es wird von räumlichen Auflösungen im Bereich von wenigen Millimetern berichtet, was auch die Möglichkeiten von klassischen bildgebenden Verfahren wie PET übertrifft. Um dies zu erreichen sind natürlich entsprechende Systeme erforderlich, welche eine Vielzahl von Magnetometern (etwa 256) beinhalten. Die zeitliche Auflösung ist – wie eingangs erwähnt – mit jener des EEG vergleichbar.

*Anwendung*

Wenngleich das MEG eine nicht-invasive, berührungsfreie Erfassung der Gehirnaktivierung ermöglicht, gestaltet sich die praktische Anwendung ungleich aufwendiger als bei EEG-Messungen. Zum einen ist dies durch die große Apparatur bedingt, welche einer „überdimensionalen Trockenhaube“ gleicht, zum anderen können Artefakte verschiedener Herkunft (Bewegungsartefakte und externe Magnetfelder) die Aufzeichnung in höherem Maß beeinträchtigen. Die notwendige Vermeidung von Bewegungsartefakten (z.B. Kopfbewegungen) schränkt ebenso wie bei anderen Verfahren die Untersuchungsmöglichkeiten ein; die Unterdrückung externer magnetischer Einstreuungen (z.B. durch Lampen, Aufzüge, Straßenbahnen, Motoren) erfordert zusätzlich die Durchführung in speziellen Messkabinen, die sowohl elektrisch als auch magnetisch ausreichend abgeschirmt sind (eine derartige Messkabine wiegt zwischen 7 und 12 Tonnen, was bei Bauvorhaben auch statisch Berücksichtigung finden muss). Hinsichtlich der Untersuchungsparadigmen und der bestimmbarer Parameter ist das MEG weitgehend vergleichbar mit dem EEG – auch hier können sowohl ereigniskorrelierte Kennwerte (event-related magnetic field, ERF) als auch Bandleistungsveränderungen untersucht werden.

Als besonders viel versprechend für die Untersuchung kognitiver Prozesse, jedoch mit einem erheblichen messtechnischen Aufwand verbunden, erwiesen sich kombinierte MEG- und EEG-Messungen. Da sich diese beiden Verfahren aufgrund ihrer Vor- und Nachteile ergänzen, erlaubt der kombinierte Einsatz eine noch bessere Lokalisation von Aktivitätsquellen (im Bereich von ca. 2 mm) sowie eine umfangreichere Erfassung neuronaler Aktivität (Jäncke, 2005).

*Aussagekraft*

Die Grundlagen des MEG-Signals sind überwiegend dieselben wie beim EEG. Verglichen mit den elektrischen Potenzialen zeichnen sich die biomagnetischen Signale durch eine günstigere Ausbreitungseigenschaft aus, da die magnetischen Feldlinien fast unbeeinflusst durch die verschiedenen Gewebetypen im Gehirn an die Oberfläche gelangen und dort von den Detektoren erfasst werden können. Die Dichte des magnetischen Feldes bzw. die in den Spulen induzierte Stromstärke hängt in erster Linie von der Entfernung des Generators ab: Je tiefer die neuronale Aktivität, desto geringer ist das Signal, was für die räumliche Lokalisation unter Verwendung mathematischer Modelle (wie z.B. LORETA, siehe oben) herangezogen werden kann. Ungeachtet dieser Vorteile bleibt jedoch eine Haupteinschränkung bestehen, nämlich dass nur ein Teil des Mag-

netfelds mit dem MEG erfasst werden kann. Es können grundsätzlich nur solche magnetischen Felder gemessen werden, deren Feldlinien senkrecht durch den Kopf in die Spulen gelangen. Senkrecht verlaufende Feldlinien entstehen nur dann, wenn die Aktivitätsquelle (bzw. der Stromfluss) tangential verläuft. Für die im Kortex befindlichen Pyramidenzellen ist diese Voraussetzung aufgrund ihrer Ausrichtung vor allem in den Hirnfurchen (Sulci) gegeben, für subkortikale Regionen (wie z.B. Thalamus) kompensieren sich die Effekte jedoch aufgrund der unterschiedlichen Neuronenanordnung. Aus diesem Grund muss man davon ausgehen, dass dieses Verfahren vor allem auf die Abbildung kortikaler Aktivierung beschränkt ist, während in das EEG-Signal auch die Aktivität von thalamischen und anderen subkortikalen Arealen Eingang findet (Jäncke, 2005).

#### *Vor- und Nachteile*

Das MEG erlaubt eine vollkommen berührungsfreie Messung der kortikalen Aktivierung. Da die erfassten biomagnetischen Felder das Körpergewebe unverzerrt durchdringen, kann eine hohe Genauigkeit bei der Quellenlokalisierung erreicht werden. Analog zum EEG besteht ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens darin, dass auch neuronale Aktivität erfasst werden kann, die nicht eindeutig mit hämodynamischen oder metabolischen Begleitphänomenen (wie z.B. Änderungen im zerebralen Blutfluss oder Glukosemetabolismus) einhergehen. Trotz dieser beachtlichen Vorteile sind MEG-Messungen mit einem hohen messtechnischen Aufwand und beträchtlichen Kosten sowohl für die Anschaffung (neben dem MEG-System ist eine speziell abgeschirmte Messkabine erforderlich) als auch für den Betrieb (Kühlung durch flüssiges Helium) verbunden. Damit bleibt diese Methode wie PET oder fMRT eindeutig auf die Laborumgebung beschränkt.

## **4.7 Abschließende Bemerkungen**

Mit diesem Überblick über häufig eingesetzte bildgebende Verfahren in den kognitiven Neurowissenschaften sollte ein Eindruck vermittelt werden, inwieweit diese in verschiedenen Bereichen der Lehr-Lern-Forschung Anwendung finden können und welche Aussagen prinzipiell möglich sind. Diese Darstellung sollte vor allem auch Einschränkungen aufzeigen, die in der zeitweilig auftretenden Euphorie über „bunte Bilder“ des Gehirns während seiner Arbeit untergehen. Am Ende dieses Kapitels angelangt kann nun die Frage in den Raum gestellt werden, welche dieser Methoden in der Lehr-Lern-Forschung eingesetzt werden können (siehe Tabelle 1).

Tabella 1: Übersicht über die wesentlichen Merkmale der dargestellten bildgebenden Verfahren

Methode	Messprinzip und Aussage	Praktische Auflösung		Labor-gebunden	Vorteile	Nachteile und Einschränkungen
		räumlich	zeitlich			
PET	Messung der Konzentration von in das Gehirn eingeführten radioaktiv markierten Substanzen (Tracern); Rückschlüsse auf Gehirnaktivierung über hämodynamische oder metabolische Veränderungen	cm	min	ja	+ leise Untersuchungsumgebung + viele kognitive Aufgaben einsetzbar	– invasiv – Strahlenbelastung – sehr hohe Kosten – nicht anwendbar bei Kindern
MRT	Messung der kernmagnetischen Resonanz von Gehirngewebe; Abbildung und Vermessung von strukturellen (anatomischen) Parametern des Gehirns	mm	-	ja	+ weite Verfügbarkeit der Hardware + hohe Genauigkeit	– starke Geräusentwicklung – hohe Kosten – eingeschränkt anwendbar bei Kindern
fMRT	Messung der kernmagnetischen Resonanz hämodynamischer Parameter; Rückschlüsse auf Gehirnaktivierung über hämodynamische Veränderungen	mm	sek	ja	+ weite Verfügbarkeit der Hardware	– starke Geräusentwicklung – hohe Kosten – eingeschränkter Einsatz kognitiver Aufgaben – eingeschränkt anwendbar bei Kindern
NIRS	Messung der Absorption und Reflektion von Nahe-Infrarot-Licht im Kortex; Rückschlüsse auf kortikale Aktivierung über intrazelluläre und vaskuläre (hämodynamische) Veränderungen	cm	msek - sek	nein	+ keine Bewegungsartefakte + niedrige Kosten + viele kognitive Aufgaben einsetzbar + anwendbar bei Kindern	– noch in Entwicklung – nur kortikale Aktivierung messbar
EEG	Messung von elektrischen Potenzialen an der Schädeloberfläche; Rückschlüsse auf kortikale Aktivierung über verschiedene (oszillatorische) Parameter	cm	msek	nein	+ weite Verfügbarkeit der Hardware + niedrige Kosten + viele kognitive Aufgaben einsetzbar + anwendbar bei Kindern + oszillatorische Aktivität erfassbar	– Bewegungsartefakte – Problem der Quellenlokalisierung
MEG	Messung von magnetischen Feldern an der Schädeloberfläche; Rückschlüsse auf kortikale Aktivierung über verschiedene (oszillatorische) Parameter	mm	msek	ja	+ berührungsfrei + anwendbar bei Kindern + oszillatorische Aktivität erfassbar + gute Quellenlokalisierung	– Bewegungsartefakte – hohe Kosten

Betrachtet man zunächst die primär interessierende Stichprobe, Kinder und Jugendliche, fällt PET aufgrund der damit verbundenen gesundheitsgefährdenden Strahlenexposition bereits durch den Raster. Die Anwendung von fMRT oder MRI kann erst ab einem Alter erfolgen, wo von den Kindern erwartet werden kann, eine gewisse Zeit weitgehend bewegungslos im Tomographen zuzubringen. Für die Untersuchung von Lernvorgängen im Feld verbleiben lediglich EEG und zukünftig auch NIRS, welche jedoch eine vergleichsweise geringe räumliche Auflösung bieten können. Der allgemein zu beobachtende Trend in der neurophysiologischen Grundlagenforschung, verschiedene Verfahren kombiniert einzusetzen, um eine hohe räumliche mit einer hohen zeitlichen Auflösung zu ergänzen (etwa durch Kombination von fMRT und EEG; Goldman et al., 2000), dürfte das spezielle Feld der Lehr-Lern-Forschung nur in eingeschränktem Maße betreffen. Allerdings birgt gerade dieser multimethodale Ansatz neben der Entwicklung neuerer Verfahren wie NIRS vermutlich das größte Potenzial für ein besseres Verständnis der neuronalen Grundlagen von kognitiven Funktionen und Prozessen in sich, da nur bei simultaner Betrachtung verschiedener Dimensionen ein vollständiges Bild über deren Zusammenhänge erlangt werden kann. Die Hinwendung zu multimethodaler Vorgehensweise wird durch den Trend ergänzt, nicht nur zu erforschen, wo bestimmte Funktionen im Gehirn lokalisiert sind, sondern auch der Frage nachzugehen, wie verschiedene Gehirnareale bei kognitiven Prozessen zusammenarbeiten (Aine, 1995; Lloyd, 2000; Raichle, 1998). „Funktionale Integration“ dürfte das Schlagwort in den nächsten Jahren sein, das den Einsatz bildgebender Verfahren in den kognitiven Neurowissenschaften über den häufig angeführten Kritikpunkt, lediglich Phrenologie mit weiterentwickelten Methoden zu betreiben, erhaben macht (Ramnani et al., in Druck).

Die Darstellung der einzelnen Verfahren sollte auch transparent gemacht haben, dass es keinesfalls ausreicht, Kindern oder Erwachsenen während kognitiver Aktivität „ins Gehirn zu schauen“, sondern dass diese Verfahren nur dann aussagekräftige Ergebnisse liefern können, wenn sorgfältig geplante Untersuchungsdesigns zur Anwendung kommen, welche es erlauben, Änderungen in der Gehirnaktivierung relativ eindeutig bestimmten (experimentellen) Bedingungen zuzuschreiben. Dies trifft in besonderem Maße für die Untersuchung von Lernprozessen zu (vgl. Poldrack, 2000), in dessen Kontext beispielsweise folgende Fragen untersucht werden: Bedeuten Änderungen in den Aktivierungsmustern infolge von Lernen, dass Informationen tatsächlich unterschiedlich verarbeitet wurden? Oder reflektieren sie lediglich Änderungen im Anstrengungsniveau oder im Einbezug von Aufmerksamkeits- und Kontrollprozessen? Ist jenes Areal, welches im Mittel über Personen hinweg das Aktivierungsmaximum aufweist, tatsächlich der „Ort des Geschehens“, oder zeichnen sich die für eine Funktion spezialisierten Regionen durch eine effizientere/geringere Aktivierung aus als nicht-spezialisierte Regionen? In einer eindrucksvollen Untersuchung konnten beispielsweise Sidtis et al. (2003) anhand einer einfachen sprachlichen Aufgabe demonstrieren, dass die Aufgabenleistung nicht durch den Aktivierungsgrad jener Areale am besten vorhersagt werden kann, welche am stärksten aktiviert waren; teilweise fanden sie sogar negative Zusammenhänge zwischen Aktivierungsausmaß und Performanz, was im Einklang mit dem Ansatz zu neuraler Effizienz steht (z.B. Haier et al., 1988; Neu-

bauer et al., 1995), in welchem interindividuelle Fähigkeitsdifferenzen mit unterschiedlich effizienter Gehirnaktivierung in Beziehung gesetzt werden. Die Autoren konnten überdies zeigen, dass nicht das in PET- und fMRT-Studien häufig bestimmte Differenzmaß zwischen der Aktivierung während einer Aufgaben- und einer Baseline-Bedingung die aufgabenrelevanten Areale am deutlichsten sichtbar macht, sondern die alleinige Betrachtung der Aufgabenbedingung (vgl. zur Kritik an der Subtraktionsmethode auch Sarter et al., 1996; Sergeant, 1994).

Um möglichst aussagekräftige Untersuchungen realisieren zu können, bedarf es nicht nur eines adäquaten Designs sondern auch einer geeigneten Untersuchungsumgebung. Lernen in der Schule, selbst bei Verfügbarkeit von im Feld gut einsetzbaren Verfahren, dürfte nur wenig Aufschlüsse darüber liefern, wie und wo Lernprozesse im Gehirn ablaufen und wie diese verbessert werden können. Selbst bei einem Vergleich von zwei unterschiedlichen schulischen Lernumgebungen kann man mit Hilfe eines groben Monitorings der Gehirnaktivierung vermutlich keine Aussagen darüber treffen, welche Lernumgebung aus neurophysiologischer Perspektive zu empfehlen ist. Die Untersuchung derartiger Fragestellungen erfordert vielmehr standardisierte Lernsettings, die es ermöglichen zu kontrollieren – oder zumindest zu registrieren –, wann welche Informationen in welcher Form dargeboten werden. Zu klassischen Untersuchungsparadigmen, welche seit Jahren in der neurophysiologischen Forschung eingesetzt werden, scheinen die derzeit populären computergestützten Lernumgebungen (e-Learning) eine interessante Alternative darzustellen. Dieses Lernumfeld weist eine Reihe von Stärken verglichen mit schulischen Settings auf, dazu zählen unter anderem die Möglichkeiten, kontrolliert und mittels verschiedener Medien Informationen zu präsentieren, die Reaktionen der Probanden exakt zu protokollieren, unmittelbares Feedback bereitzustellen und kognitive Anforderungen kontinuierlich an das individuelle Leistungsniveau oder den Lernfortschritt anzupassen. Zusätzlich kann eine derartige Lernumgebung ohne nennenswerte Probleme im Labor implementiert werden, wodurch sich wiederum ein breiteres Spektrum an bildgebenden Verfahren anbietet. Obwohl zum gegenwärtigen Zeitpunkt nur wenige neurophysiologische Studien vorliegen, die sich bereits des e-Learning bedienen, dürften diese Lernsettings das Potenzial in sich bergen, eine Brücke von der ökologisch wenig validen Laborforschung hin zu anwendungsorientierter Feldforschung zu schlagen.

## 5. Gehirnentwicklung

Im Menschen wie auch in den meisten anderen Arten durchläuft das sich entwickelnde Gehirn sowohl progressive als auch regressive Veränderungen. Axone, Dendriten, Synapsen und Neurone erfahren immenses Wachstum und große Verluste, was in der Regel zu einer Reorganisation neuronaler Verschaltungen führt. Phasen verstärkter Reorganisation werden als Zeitabschnitte betrachtet, in denen Umwelteinflüsse einen bedeutenden Einfluss auf die kortikale Entwicklung ausüben. Verschiedene neuronale Systeme stehen jedoch zu unterschiedlichen Zeiten unter dem Einfluss von Umweltfaktoren, das heißt sie entwickeln sich vermutlich entsprechend unterschiedlicher Verläufe.

Auf all diese Facetten der Hirnentwicklung soll im Folgenden kurz eingegangen werden (zum Überblick: Andersen, 2003; Byrnes, 2001; Cowan, 1983; Goswami, 2003; Johnson, Munakata, & Gilmore, 2002; Pauen, 2004). Dabei wird versucht, solchen Prozessen und Perioden besondere Aufmerksamkeit zukommen zu lassen, die bei der pädagogischen Arbeit mit dem sich entwickelnden Menschen von Relevanz sein könnten.

Zuvor soll mit einigen Worten auf solche Strukturen des Gehirns eingegangen werden, die für die weiteren Ausführungen von Bedeutung sind: Neben einer topographischen Organisation verfügt der Kortex auch über eine charakteristische Zellschichtorganisation. Vier bis sechs horizontale Schichten lassen sich hinsichtlich Morphologie, Dichte und funktioneller Eigenschaften der darin befindlichen Neuronen unterscheiden. Gehirnzellen teilen sich in zwei große Kategorien: Gliazellen und Nervenzellen. Nervenzellen bzw. Neuronen dienen der Verarbeitung von Informationen. Die verschiedenen Typen unterscheiden sich hinsichtlich der Form (bspw. Pyramidenzellen, Stellate etc.), der Verbindungsart mit anderen Neuronen (anregende und hemmende Neuronen) sowie des Neurotransmitters (bspw. Dopamin, GABA, Serotonin). Gliazellen sind für die Informationsverarbeitung ebenfalls von Relevanz und stellen nicht nur reine Stütz- und Versorgungseinheiten für Nervenzellen dar. Sie unterstützen die Übertragung bioelektronischer Signale an den Synapsen, indem sie das Ionenmilieu regulieren, die Synapsen metabolisch versorgen und überschüssigen Transmitter aufnehmen, um somit einen erneuten Übertragungsvorgang zu ermöglichen. Daneben übernehmen Gliazellen noch weitere wichtige Funktionen wie die Bildung der Myelinschicht, die Unterstützung der (Nerven-)Zellmigration sowie den Schutz des Gehirns und Rückenmarks vor eindringenden Mikroorganismen wie Viren, Bakterien oder fremden Zellen (Deitmer, 2000).

### 5.1 Hauptprozesse der Gehirnentwicklung

Intrauterin wächst das Gehirn von nichts zu einem Gewicht von etwa 350g. In dieser Zeit entstehen auch die meisten Neuronen des ZNS. Das Wachstum des Gehirns hält aber auch nach der Geburt noch an, bis es im Alter von 20 Jahren ein Gewicht von 1350g erreicht. Das stärkste postnatale Wachstum findet innerhalb der ersten drei oder vier Lebensjahre statt, Veränderungen in Myelini-

sierung und in anderen Bereichen (z.B. Hirnareale, Anzahl von Gliazellen etc.) sind aber noch 70 bis 80 Jahre nach der Geburt möglich.

Ein allgemeines Prinzip der Hirnentwicklung ist, dass Entwicklung als eine Kaskade von Ereignissen erfolgt und dass jedes Ereignis nachfolgende, aber nicht vorangehende Ereignisse beeinflussen kann. Je früher in der Entwicklung ein bestimmtes Ereignis stattfindet, desto größer ist sein potenzieller Einfluss auf spätere Ereignisse und desto wahrscheinlicher ist es, dass es einen Einfluss auf die Hirnstruktur eines Erwachsenen hat.

Pränatale Entwicklung ist in der Regel durch strukturell definierte Phasen gekennzeichnet, das heißt Anfang und Ende eines spezifischen Entwicklungsabschnitts richtet sich nach der Entstehung bestimmter struktureller oder anatomischer Merkmale. So beginnt beispielsweise das Stadium der Zygote mit der Befruchtung der Eizelle und endet, wenn durch Zellteilung innerhalb der Zygote (befruchtete Eizelle) eine Struktur entsteht, die Blastula (Blasenkeim) genannt wird. Danach setzt die Gastrulation ein, in der die Gastrula entsteht.

Was in einem bestimmten Teil des sich entwickelnden ZNS zu einer bestimmten Zeit geschieht, kann am besten mit der Darstellung der vier wichtigsten zellulären Prozesse veranschaulicht werden: Zellproliferation, Zellmigration, Zelldifferenzierung und Zelltod. Die Lebensgeschichte jeder einzelnen Nerven- oder Gliazelle ist am besten zu erfassen, wenn diese Prozesse als Stufen gesehen werden, die jede Zelle passieren muss.

### 5.1.1 Zellproliferation (Neuronale Stammzellvermehrung)

Nach der Gastrulation treten Zellen auf der längsseitlichen Oberfläche der Gastrula zu einem schmalen Zellband zusammen, der Neuralplatte. Die wachsende Neuralplatte faltet sich schließlich und bildet das Neuralrohr, welches dem ursprünglich röhrenförmigen Nervensystem entspricht, das man noch bei einfachen Tieren wie etwa Würmern findet. Der vordere Teil des Neuralrohrs wird sich später zu Strukturen des Vorder- und Mittelhirns entwickeln, der Rest des Neuralrohrs zum Rückenmark. Innerhalb des Neuralrohrs befinden sich zwei Regionen (Proliferationszonen), aus denen sich Gehirnzellen in schneller Folge mittels mitotischer Teilung (Teilung in zwei identische Tochterzellen) entwickeln. Manche Nervenzellen können bis zu 10.000 Nachkommen bilden. Die Proliferation endet weitgehend im siebten pränatalen Monat. Zu diesem Zeitpunkt enthält das Gehirn mehr als 1011 Zellen. Daraus folgt, dass in den beiden Zonen der Proliferation im Durchschnitt 250.000 Zellen pro Minute entstehen.

### 5.1.2 Zellmigration

Da die Zellproliferation sich nur auf zwei Regionen des Neuralrohrs beschränkt, ist es notwendig, dass die jungen Neuronen nach der mitotischen Teilung sich vom Ort ihrer Entstehung, der inneren Schicht der Neuralrohrwand, zum Ort ihrer Bestimmung bewegen. Durch diesen Prozess der Zellmigration zu äußeren Schichten breitet sich das Neuralrohr selbst zunehmend aus.

Es gibt zwei Möglichkeiten, wie Zellen diesen Ortswechsel vollziehen können. Einige Neuronen entfernen sich nur ein wenig von der Grenze der Prolife-

rationszone und werden dann nach außen hin durch zwei neue Zellen ersetzt. Da dieser Typ der Zellbewegung nur minimale Aktivität der migrierenden Zelle erfordert, wird er als passive Zellersetzung betrachtet. In den Arealen dieses Typs der Zellbewegung befinden sich die am frühesten entstandenen Zellen am weitesten von der Proliferationszone entfernt. Diese Korrelation zwischen der Verteilung der Neuronen und dem Zeitpunkt ihrer Entstehung wird als raumzeitlicher „außen nach innen“-Gradient beschrieben. „Außen“ und „innen“ beziehen sich dabei auf Positionen der Zellen im Verhältnis zur Proliferationszone.

In vielen anderen Teilen des sich entwickelnden ZNS spielen die migrierenden Zellen eine viel aktivere Rolle beim Finden ihrer Endposition. Die jungen Neuronen bewegen sich dabei über viel größere Entfernungen. Jede Generation von Zellen entsteht durch wiederholte Zellteilung, und sie bewegen sich dabei immer weiter weg von der inneren Wand. Die Zellen an der äußeren Wand sind somit solche, die während der Proliferation zuletzt entstanden sind.

Dieser aktive Prozess wird allgemein als Neuronale Migration beschrieben und weist einen raumzeitlichen „innen nach außen“-Gradienten auf. In dieser Weise migrierte Neuronen sind in den meisten Teilen des Kortex und in einer Reihe subkortikaler Strukturen zu finden. Kennzeichen dieser Areale ist, im Gegensatz zu Arealen mit „passiv“ migrierten Zellen, eine gut geschichtete Struktur.

Auf dem Weg zu ihrer Endposition nutzen die jungen Neuronen des cerebralen Kortex die strahlenförmigen Fasern der Gliazellen als Wegführer. Dieses Zusammenspiel stellt eine der am besten dokumentierten Interaktionen zwischen Zellen im sich entwickelnden ZNS dar.

### 5.1.3 Zelldifferenzierung

Nachdem das Neuron seine Endposition erreicht hat, tritt es in die letzte Phase seines Lebens, die Differenzierung in bestimmte Typen. Dabei wachsen aus jedem Neuron Axon und Dendriten, deren typisches Muster sich bildet. Jedes der sich differenzierenden Neuronen muss ein spezifisches Enzym entwickeln, das zur Bildung des zu nutzenden Neurotransmitters verwendet wird. Daneben muss auch jede postsynaptische Stelle Rezeptoren ausbilden, die zum Empfang von Signalen des präsynaptischen Partners benötigt werden. Gleichzeitig differenzieren sich auch die Gliazellen in solche, die Myelin produzieren (Oligodendrozyten) und in solche, die andere Funktionen übernehmen (Astrozyten).

Der Zelldifferenzierung liegen zwei Prozesse zu Grunde: zum einen könnten die Zellen (per genetischem Transkriptionsprozess), sofort nachdem sie entstanden sind, noch in der Proliferationszone in den richtigen Typ umgewandelt werden. Danach „wüßten“ die Zellen also noch vor ihrer Migration, welche Art von Neuron sie werden würden. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, den Transformationsprozess so lange aufzuhalten, bis der richtige Ort im Kortex erreicht ist. Dabei „informieren“ Nachbarzellen die nach erfolgter Migration am vorgesehenen Ort angelangte Zelle durch einen chemischen Stoff, welche Art von Zelle sie werden sollte. Eine Reihe von Studien belegt, dass beide möglichen Prozesse in der Entwicklung verschiedener Neuronentypen involviert sind.

Im Laufe ihrer Entwicklung scheinen Neuronen auf hoch spezifische Weise Projektionen auszusenden. In Tierexperimenten konnte festgestellt werden, dass, selbst wenn die Zielzellen an atypische Orte transplantiert wurden, die Axone des

suchenden Neurons diese finden können. Im Gegensatz zu den synaptischen Verbindungen aufgrund von Erfahrung scheinen die stereotypischen, laminaren Verbindungsmuster überwiegend durch Gene bestimmt. Sobald sich ein projiziertes Neuron in unmittelbarer Nähe zu einem anderen Neuron befindet, fördert die parallele Aktivität beider Neurone die Schaffung von Synapsen, das heißt, wenn zwei Neuronen immer zu gleicher Zeit aktiv sind, ist es sehr wahrscheinlich, dass sie eine Synapse miteinander bilden.

#### 5.1.4 Zelltod und kurzlebige Verbindungen

In einem erwachsenen Gehirn verfügt jedes der 1011 Neuronen über ca. 1000 synaptische Kontakte zu anderen Neuronen. In der frühen Entwicklung jedoch bilden Neuronen viel mehr synaptische Kontakte, als notwendig sind, um funktionelle Schaltkreise zur Informationsverarbeitung zu entwickeln. Das Neuron eines Kindes weist daher überall Synapsen auf, während beim Erwachsenen die Verbindungen auf ein stereotypisches Muster reduziert sind. Eine Möglichkeit zur Reduzierung überschüssiger Synapsen ergibt sich durch den Tod von Nervenzellen, eine zweite durch das Zurückziehen des Axons durch die präsynaptischen Zelle.

Viele Forscher sehen die Ursache für den Tod von Nervenzellen und das Zurückziehen der Axone im Konkurrenzkampf der Neurone um bestimmte Substanzen, dem so genannten trophischen Faktor, die von aktiven postsynaptischen Neuronen ausgeschieden werden. Nur einige Axone, die im Kontakt mit dem Zielneuron stehen, werden genug trophischen Faktor erhalten, um zu überleben. Andere Neurone hingegen bekommen genug trophischen Faktor von einer Seite, nicht aber von anderer Seite. Anstatt zu sterben, ziehen sie ihre Axone aus den Mangelgebieten ab.

Es ist von großem Interesse und hat auch etwas von Ironie, dass die Entwicklung des Nervensystems, die allgemein als eine Reihe progressiver Ereignisse gesehen wird, auch regressive Prozesse umfasst, die das Zurückziehen von Axonen und den Tod von Zellen zur Folge haben. Es gibt jedoch keinerlei Zweifel daran, dass der Zelltod ein wichtiges Merkmal der Entwicklung ist. So wiesen etwa „Knockout“-Mäuse mit mutierten Genen, die Zelltod verhindern, schwerwiegende Entwicklungsstörungen auf. Es wird angenommen, dass das anfängliche Überangebot an Neuronen und Synapsen phylogenetisch als evolutionärer Anpassungsmechanismus entstand, um vor möglichen Problemen bei der Entwicklung des Gehirns zu schützen. Weiter unten wird vertiefend auf diesen Aspekt eingegangen.

## 5.2 Die Entwicklung von zwei Regionen des cerebralen Kortex: primärer visueller Kortex und mittlerer frontaler Gyrus

Die bisherigen Ausführungen beziehen sich auf die allgemeinen zellulären Entwicklungsprozesse, wie sie überall im Gehirn auftreten können. Inzwischen ist allgemein bekannt, dass sich die Entwicklungsverläufe in verschiedenen Hirnregionen deutlich voneinander unterscheiden können. Veränderungen in kortikalen Neuronen während der prä- und postnatalen Entwicklung sind bisher nur für einige Bereiche zufriedenstellend dokumentiert. Zwei dieser Bereiche sind

der primäre visuelle Kortex und der mittlere frontale Gyrus, eine Region des frontalen Kortex.

Der visuelle Kortex wächst sehr früh und erreicht ein maximales Volumen im Alter von ungefähr vier Monaten. Dieses Ergebnis überrascht in Anbetracht der Tatsache, dass im Alter von vier Monaten das Gehirn als Ganzes nur halb so groß ist wie im Erwachsenenalter. Es ist anzunehmen, dass kortikale Assoziationsareale, insbesondere im frontalen Bereich, langsamer wachsen. Darüber hinaus könnte sich die späte Gewichtszunahme des Gehirns auch durch Bildung subkortikaler weißer Substanz (Myelinisierung) erklären, die während der gesamten Kindheit anhält. Myelinisierung ist der Prozess der Ummantelung der Axone einiger Neuronen mit einer „Isolierungsschicht“, um die Informationsübertragung zu beschleunigen. Myelin trägt in beträchtlichem Maße zur Gewichtszunahme des Gehirns bei. Wenn die Entwicklung des Gehirns in der späten Adoleszenz abgeschlossen ist, wiegt das Gehirn viermal so viel wie zur Geburt.

Synaptische Spuren sind schon ab der 28. Schwangerschaftswoche im fötalen Gehirn zu finden, wobei die Synapsendichte noch sehr gering ist. Diese steigt erst im späten Fötal- und frühen Kindesalter. Eine sprunghafte Steigerung findet dann zwischen dem zweiten und vierten Monat statt, währenddessen sich die Synapsendichte fast verdoppelt. Schließlich setzt eine Verringerung der Synapsendichte mit ungefähr einem Lebensjahr ein, die ungefähr bis zur Vollendung des elften Lebensjahres anhält und dabei den Erwachsenenwert von 60 Prozent des Maximums erreicht. Diese Ergebnisse verweisen also auf einen bedeutenden Verlust an Synapsen in der postnatalen Entwicklung des cerebralen Kortex.

Erkenntnisse zur Entwicklung anderer kortikaler Bereiche sind sehr begrenzt. Relativ gut ist die Datenlage nur noch für den medial-frontalen Gyrus. Die Befunde im frontalen Kortex stellen dabei einen interessanten Kontrast zum visuellen Kortex hinsichtlich der spezifischen Entwicklungsverläufe dar: Während zum Zeitpunkt der Geburt die Neuronendichte beider Areale sehr ähnlich ist, nimmt die Dichte des frontalen Areals deutlich langsamer ab. So erreicht die Neuronendichte des visuellen Kortex schon im fünften postnatalen Monat den Erwachsenenwert, die Dichte des frontalen Kortex liegt dagegen noch mit Vollendung des zweiten Lebensjahres 55 Prozent über dem Erwachsenenwert und mit sieben Jahren noch mit 10 Prozent. Die begrenzten Informationen zum frontalen Kortex legen nahe, dass auch das Wachstum neuronaler Elemente, insbesondere Dendriten, länger anhält als im visuellen Kortex. Dies dient im hohen Alter vermutlich der Kompensation von Neuronenverlust.

Daten zur Synapsendichte während der Entwicklung des mittleren frontalen Gyrus sind nur begrenzt vorhanden. Diese veranschaulichen einen langsameren postnatalen Anstieg der Synapsendichte als im visuellen Kortex. Die maximale Dichte wird hier im Alter von einem Jahr erreicht, im visuellen Kortex dagegen schon mit vier Monaten. Auch die anschließende Verringerung verläuft im frontalen Kortex langsamer, wo sie nicht vor Vollendung des siebten Lebensjahres evident ist. In diesem Alter ist im visuellen Kortex das Erwachseneniveau von 60 Prozent des Maximums fast erreicht. Die Synapsendichte im frontalen Kortex erreicht das Erwachseneniveau erst mit 16 Jahren. Die verfügbaren Daten zur Synapsendichte zeigen damit, dass es deutliche regionale Unterschiede im Verlauf der Synapsenbildung des Menschen gibt.

Die Anzahl der Synapsen pro Neuron im frontalen Kortex nimmt zwischen später Kindheit und dem 16. Lebensjahr ab, wie auch die Anzahl der Synapsen pro  $100\mu\text{m}^3$  (ein  $\mu\text{m}^3$  entspricht einem Millionstel  $\text{mm}^3$ ) Dendriten, bis es den Erwachsenenwert von 50 Prozent der Wertes mit zwei Jahren erreicht hat. Die Tatsache, dass sich die Synapsendichte verringert, nachdem sich die Neuronendichte stabilisiert hat (mit 7 Jahren), verdeutlicht, dass es einen Verlust von Synapsen im frontalen Kortex gibt. Dieser hat ein ähnliches Ausmaß wie der im visuellen Kortex, tritt aber zu einem späteren Zeitpunkt ein.

Der quantitative anatomische Ansatz zur kortikalen Entwicklung ist in seiner Aussagekraft begrenzt, da er nur Mittelwerte produziert, die eher das Bild eines statischen als eines dynamischen Systems vermitteln. Denn Wachstum und regressive Veränderungen könnten zur selben Zeit stattfinden und durchaus im Gleichgewicht sein. Es ist sehr wahrscheinlich, dass Synapsen ständig neu gebildet werden, während alte Verbindungen verschwinden. Eine solche Situation könnte durch die Angabe der absoluten Anzahl an Synapsen nicht erfasst werden.

Dennoch lassen sich einige wichtige Informationen aus den vorhandenen Daten gewinnen. So konnte etwa festgestellt werden, dass die Eliminierung von Synapsen ein wichtiges Entwicklungsmerkmal des menschlichen Gehirns ist. Es wird angenommen, dass die genetische Vorbestimmtheit der Synapsenbildung unvollkommen und damit eine vollständige Spezifizierung aller synaptischen Verbindungen nicht möglich ist. Dadurch kommt es zur Entstehung vieler redundanter labiler Verbindungen, von denen sich einige als Teil funktionaler System stabilisieren. Stabilisierte synaptische Kontakte bleiben bestehen, während labile Kontakte, die nicht Teil funktionaler Einheiten wurden, sich zurückbilden. Das postnatale Auftreten solcher Entwicklungen ist von großem Interesse, denn sie deuten darauf hin, dass die anatomischen Veränderungen mit der Entwicklung kortikaler Funktionen wie Lernen, Gedächtnis und Sprache in Verbindung stehen könnten.

Dies wird besonders deutlich im Falle des visuellen Kortex, da die Funktionen dieser kortikalen Region besonders gut erforscht wurden. Zum Zeitpunkt der Geburt, wenn die visuelle Aufmerksamkeit und Fixationsfähigkeit sich im Anfangsstadium befinden, gibt es relativ wenige synaptische Verbindungen (etwa 10 % des Maximums). Im Alter von vier Monaten setzt dann ein rapider Anstieg der Synapsenzahl ein, der mit einer plötzlichen Verbesserung der visuellen Aufmerksamkeit einhergeht.

Die Synapsendichte und damit folglich auch die Anzahl der unspezifischen bzw. labilen synaptischen Kontakte bleibt im visuellen Kortex bis zu einem Alter von mindestens vier Jahren auf einem hohen Niveau. Diese labilen Synapsen könnten das anatomische Substrat neuronaler Plastizität im Kind darstellen. Daraus ließe sich wiederum folgern, dass die Plastizität im mittleren frontalen Gyrus länger anhält, da die Reduzierung der Synapsen dort nicht vor dem siebten Lebensjahr einsetzt. In der Tat gibt es Hinweise, dass die Plastizität für einige Funktionen bis in die späte Kindheit anhält, so etwa die Fähigkeit, nach einer großen Läsion der dominanten Hemisphäre die Sprachfunktionen wieder herzustellen. Dies scheint bis ins Alter von acht Jahren anzuhalten und hängt wohl von Veränderungen in der funktionellen Organisation der nichtdominanten Hemisphäre ab.

### 5.3 Gene und Gehirnentwicklung

Die wichtigste Variable für die Erklärung von Größenunterschieden zwischen den Gehirnen verschiedener Arten ist die Länge der Proliferationsphase. Wie weiß das sich entwickelnde Gehirn jedoch, wann es aufzuhören hat, neue Zellen zu schaffen? Zum einen ist es möglich, dass die genaue Anzahl der mitotischen Teilungen in der DNA der Vorgängerzellen gespeichert ist. Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass Vorgängerzellen sich so lange verdoppeln, bis sie vermittelt bekommen, dass genügend Zellen in die verschiedenen Teile des Gehirns gewandert sind. Welche Möglichkeit auch immer zutrifft, klar ist zumindest, dass die Proliferationsphase weitgehend unter genetischer Kontrolle steht.

Das gleiche gilt zwar auch für Zelldifferenzierung und Zellmigration, doch bei letzterer ist dies nur von probabilistischer Natur. Während ihrer Migration treten Zellen nämlich in komplexer Weise in Kontakt miteinander. Das führt dazu, dass nicht mit Bestimmtheit gesagt werden kann, wo eine Zelle ihren Endpunkt erreicht. Insofern kann die genetische Information nicht als Bauplan betrachtet werden. Gehirne mit identischen Genen, wie etwa bei eineiigen Zwillingen, können sich durchaus signifikant unterscheiden.

Die relative Wichtigkeit der Gene für die Gehirnentwicklung wird deutlich bei der Untersuchung von Behinderungen wie dem Down Syndrom (DS), in dem es eine Verbindung zwischen spezifischen Genen und neurologischer Pathologie gibt. Individuen mit DS haben in der Regel ein kleineres und weniger entwickeltes Gehirn als ihre unbehinderten Altersgenossen. Sie haben ungefähr ein Drittel weniger kortikale Neuronen, weniger komplexe Verbindungsmuster, reduzierten Myelinanteil und abnormal geformte Dendriten. Kurzum: Das zusätzliche genetische Material interferiert mit den Prozessen der Proliferation, Synapsenbildung sowie Myelinisierung.

### 5.4 Gehirnentwicklung und Erfahrung

Damit Tiere sich in ihrem Verhalten an die Umwelt anpassen, müssen sie in der Lage sein, mentale Repräsentationen zu bilden, die zu ihren Erfahrungen passen. So müssen sie in der Lage sein, Artgenossen zu erkennen oder die Erfahrung, dass Feuer brennt, im Gedächtnis zu speichern. Viele Tiere kommen auf die Welt und sind bereit, solche Dinge zu lernen, indem sie einen angeborenen Schaltkreis (prewired circuitry) nutzen, der eng mit äußeren Sinnesorganen verbunden ist. Dieser angeborene Schaltkreis besteht aus kortikalen Neuronen, die Inputsignale aus der Umwelt empfangen, verarbeiten und speichern, sowie afferenten Neuronen, die diese Inputsignale von den verschiedenen Sinnesorganen zum Gehirn leiten.

Chirurgische Studien an Tieren konnten zeigen, dass atypische kortikale Karten gebildet werden können, wenn die Inputleitungen vom Thalamus anders geleitet werden. Solche Plastizität wurde auch an Kleinkindern beobachtet, die unter Hirnverletzungen litten bzw. denen Teile des Gehirns entfernt wurden, um sie von Epilepsie zu befreien. Neuronale Regionen, die mit Sprache in Verbindung stehen, sind in normal entwickelten Rechtshändern in der linken

Hemisphäre zu finden. Bei Kindern jedoch, deren linke Hemisphäre entfernt wurde, bildeten sich Sprachregionen in der verbliebenen rechten Hemisphäre. Somit ist folgendes festzustellen: Während die laminare Organisation des Kortex hauptsächlich genetisch bestimmt wird, scheint die Organisation der Hirnareale sowohl durch angeborene Verschaltungen als auch durch Umweltreize bestimmt.

Umweltreize können jedoch unterschiedlichen Einfluss auf die Hirnstruktur nehmen, je nach dem, wann sie in der Entwicklung auftreten. So können beispielsweise Tiere für immer erblinden, wenn sie sofort nach der Geburt für zwei Wochen in der Dunkelheit gehalten werden. Wenn diese Deprivation jedoch später in der postnatalen Periode erfolgt, entwickeln sich die visuellen Fähigkeiten normal. Zur Erklärung dieser zeitabhängigen Resultate werden zwei Typen neuronaler Plastizität in der Entwicklung des Gehirns von Säugetieren unterschieden: erfahrungserwartend und erfahrungsabhängig.

Erfahrungserwartende Plastizität, die die Grundlage der Annahme kritischer Phasen bzw. sensibler Perioden in der Gehirnentwicklung bildet, geht auf die anfängliche, intern gesteuerte Überproduktion an Synapsen und auf die anschließende Reduzierung auf sehr aktive, durch Erfahrungen stabilisierte Verbindungen zurück. Wie weiter oben erwähnt, wird die Anzahl der Synapsen verringert, da die Neuronen um die begrenzte Versorgung mit trophischem Faktor konkurrieren.

Während erfahrungserwartende Plastizität ein evolutionär sehr alter Mechanismus ist und interindividuell sehr ähnlich verläuft, führt die zweite Art von Plastizität, die so genannte erwartungsabhängige, zur Speicherung von Informationen, die sich interindividuell unterscheiden und für das individuelle Überleben von immenser Wichtigkeit sein können, wie etwa Nahrungsquellen oder Zufluchtsorte. Erfahrungsabhängige Plastizität gewährt es dem Tier, Repräsentationen von bestimmten Merkmalen ihrer Umgebung zu bilden. Der zu Grunde liegende Mechanismus ist nicht die Eliminierung überflüssiger Synapsen, sondern vielmehr die Bildung neuer synaptischer Verbindungen bzw. deren Reorganisation.

#### 5.4.1 Erfahrungserwartende Plastizität

Nachweise erfahrungserwartender Plastizität kommen etwa von Tierexperimenten zum visuellen System, in denen oft mit Stimulationsdeprivation gearbeitet wurde. So konnte gezeigt werden, dass innerhalb weniger Wochen, nachdem normal entwickelte Katzenbabys ihre Augen öffnen, fast alle Neuronen des primären visuellen Kortex selektiv auf die Ausrichtung des Stimulus reagieren. Beim Ausbleiben solcher visueller Anregungen jedoch verlieren die Neuronen des visuellen Kortex nach und nach diese Fähigkeit. Eine vollständige Erholung ist nach einer längeren Deprivationsphase nicht mehr möglich. Neuere Ergebnisse zeigen jedoch, dass beim Ausbleiben visueller Informationen während der frühen Entwicklung sich die kritische Phase der Synapsenreduzierung verlängert. Dennoch ist festzustellen, dass sich spät entwickelnde visuelle Funktionen (z.B. Tiefenwahrnehmung) mehr durch frühe Deprivation geschädigt werden als solche Funktionen, die zum Zeitpunkt der Geburt schon relativ ausgereift sind (z.B. Farbwahrnehmung). Totale visuelle Deprivation (total pattern deprivation)

vation) hat deutliche Veränderungen neuronaler Strukturen zur Folge. So verfügen etwa die Dendriten im visuellen Kortex deprivierter Tiere über deutlich weniger dendritische Dornen, welche die hauptsächliche neuronale Kontaktform im visuellen Kortex darstellen.

Eine wichtige Frage ist die nach dem Warum dieser erfahrungserwartenden oder sensitiven Perioden. Macht es denn evolutionär Sinn, einen Organismus zu entwickeln, dessen sensorische Funktionen für immer geschädigt sind, wenn die notwendigen Erfahrungen in einem bestimmten Zeitabschnitt ausbleiben? Es macht sehr wohl Sinn. Denn dadurch werden die Ressourcen der sensorischen Systeme effizient genutzt, indem diese sich an den in der Umwelt zu erwartenden Erfahrungen justieren können. Daher haben viele Arten sich so entwickelt, dass die neuronalen Verbindungen in den sensorischen Systemen genetisch nur grob vorgezeichnet werden, um damit die Details durch die Interaktion des Organismus mit der Umwelt bestimmen zu lassen.

Das wichtigste Merkmal dieser Plastizität ist die Organisation eines detaillierten neuronalen Musters durch eine äußere Erfahrung (z.B. motorische Aktivität oder visuelle Stimulierung) während eines relativ eng begrenzten Zeitabschnitts. Die neuronale Grundlage dieser Sensitivität ist die Überproduktion von Synapsen und die anschließende, durch erfahrungsgenerierte neuronale Aktivität bestimmte, selektive Erhaltung eines Teils der Synapsenmenge. Die Regulierung des Zeitfensters in der Entwicklung des visuellen Kortex obliegt offenbar zum großen Teil zwei Neurotransmittern: Noradrenalin und Acetylcholin. Diese „Neuromodulatoren“ könnten danach die neuronale Sensitivität bezüglich Erfahrung initiieren oder aufrechterhalten.

Ein weiterer wichtiger Punkt bezieht sich auf das Ausmaß, in dem sich das entwickelnde sensorische System nach den Strukturen der hereinkommenden Informationen richtet. Mit anderen Worten: Ruft jeder Input ähnliche strukturelle Veränderungen hervor?

Sensorische Systeme verfügen über starke Prädispositionen zum Zeitpunkt der Geburt, die zu einer rudimentären Organisation des Input führt. Die differenzielle Nutzung von Erfahrungen durch das Gehirn bestimmt das Ausmaß des Einflusses von Erfahrungen auf die neuronale Struktur. Dies wird etwa illustriert durch das Phänomen des größeren auditiven Kortex bei visuell deprivierten oder blinden Tieren. Da die auditive Stimulierung sich bei blinden und sehenden Tieren nicht unterscheidet, steht der größere auditive Kortex vermutlich mit der gesteigerten Abhängigkeit von auditiven Informationen bei ausbleibenden visuellen Informationen in Zusammenhang. Hier liegt die Vermutung nahe, dass die Entstehung interindividueller Unterschiede trotz gleicher Umwelteinflüsse auf diesen Mechanismus zurückzuführen ist.

Das wichtigste Merkmal von Plastizität in der frühen Entwicklung des sensorischen Systems ist der hohe Grad an Altersabhängigkeit und späterer Irreversibilität. So verlieren heranwachsende Menschen beispielsweise ihre im Kleinkindalter vorhandene Sensitivität für solche phonemischen Bereiche (phonemic boundaries), die ihre Sprachumgebung nicht nutzt. Ein solches Beispiel für den visuellen Bereich stellen neuere Ergebnisse aus der Forschung zur Gesichtserkennung dar. So ist die Erkennungsleistung sehr junger Kinder in mancher Hinsicht besser als die von Erwachsenen, insbesondere im Fall von Affengesichtern. Gegen Ende des ersten Lebensjahres verlieren die Kleinkinder dann

allmählich ihren Vorteil. Älteren Kindern und Erwachsenen bereitet es dann sogar schon Mühe, die Gesichter von Menschen anderer Ethnien zu differenzieren. Der dieser Entwicklung zu Grunde liegende neuronale Prozess ist sowohl mit dem anfänglichen rapiden Anstieg der Synapsenanzahl als auch mit deren anschließendem Rückgang verknüpft. Die Geschwindigkeit und das Ausmaß dieser Prozesse sind sowohl von der Art der Erfahrung als auch von internen Faktoren wie dem neurochemischen System abhängig.

Die Hinweise auf eine die gesamte Kindheit und Adoleszenz anhaltende Entwicklung und Organisation des präfrontalen Kortex deuten eine wichtige Parallele zwischen Hirnentwicklung und kognitiver Entwicklung an. Die allmähliche Abnahme der Synapsendichte im Laufe der Kindheit und Adoleszenz fällt mit der kontinuierlichen Entwicklung kognitiver Fähigkeiten zusammen. Mit anderen Worten, die zunehmenden kognitiven Fähigkeiten gehen einher mit dem Verlust an Synapsen und der Stärkung der verbleibenden Verbindungen und nicht mit deren Neubildung. Dieser Prozess repräsentiert damit die Unterdrückung von konkurrierendem, irrelevantem Verhalten. Eine wiederholte Darbietung eines Reizes führt zu einer schnelleren Reaktion und folglich zu einer stärkeren Beziehung zwischen Ereignis und Reaktion. Auf physiologischer Ebene wird dies durch die Beobachtung widerspiegelt, dass zugleich aktivierte Neuronen sich verschalten (neurons that fire together wire together). Konkurrierendes, weniger häufiges Verhalten wird dagegen geschwächt. Die zeitgleiche Myelinisierung der Verbindungsfasern stellt dann noch einen zusätzlichen Faktor dar, der zur Beschleunigung der Informationsverarbeitung im Lauf von Kindheit und Adoleszenz beiträgt.

#### 5.4.2 Erfahrungsabhängige Plastizität

Erfahrung beeinflusst Verhalten bekanntlich nicht nur in bestimmten Zeitfenstern und nicht nur während der frühen Entwicklung sensorischer Systeme. Evolutionär macht auch dies Sinn, denn es kann sich nicht darauf verlassen werden, dass eine besonders wichtige Erfahrung zu einem bestimmten Zeitpunkt auftritt. Ein weiterer Grund für eine länger anhaltende Plastizität ist in der Notwendigkeit zu sehen, dass Menschen und Tiere sich während ihres Lebens bestimmten Umfeldern anpassen müssen.

Ein wichtiges Merkmal einer bestimmten Umwelt könnte der Komplexitätsgrad sein. Ein experimentelles Paradigma, welches diesen Grad variierte, wurde schon Mitte des letzten Jahrhunderts entwickelt, um zeigen zu können, dass Eigenschaften des (sozialen) Umfelds strukturelle Veränderungen im Gehirn herbeiführen können. Dabei wurden Ratten von der Kindheit bis ins späte Erwachsenenalter in drei verschiedenen Bedingungen gehalten: in einem sehr komplexen Umfeld mit vielen Tieren, in einem einfachen Käfig mit einem anderen Tier sowie allein in einem einfachen Käfig. Es konnte beispielsweise festgestellt werden, dass in dem komplexen Umfeld gehaltene Tiere bis zu 20 Prozent mehr Dendriten pro Neuronen des oberen visuellen Kortex aufwiesen als einzelne im Käfig lebende Ratten. Dendriten bieten Fläche für synaptische Verbindungen, je mehr Dendriten desto mehr Synapsen. Diese Unterschiede sind zwar im visuellen Bereich am größten, können allerdings auch in anderen Bereichen des cerebralen Kortex festgestellt werden, so etwa in mit auditiven

Informationen assoziierten Arealen und auch in Regionen, die funktional durchaus mit dem menschlichen Frontalkortex vergleichbar sind.

Auch für Training konnten Effekte gezeigt werden. Junge erwachsene Ratten, die über annähernd einen Monat an wechselnd gestalteten Labyrinth trainiert wurden, wiesen mehr Dendriten auf als untrainierte Tiere. Für Menschen konnten ebenfalls Strukturveränderungen aufgrund von Umwelteinflüssen gezeigt werden. So fand man heraus, dass der hintere Hippokampus bei Taxifahrern größer war als der von Kontrollpersonen, die nicht Taxi fuhren. Der Hippokampus ist eine kleine Hirnregion, die vermutlich bei räumlicher Repräsentation und Navigation eine Rolle spielt. Die tägliche Orientierungsarbeit der Taxifahrer führt offenbar zur Vergrößerung dieser neuronalen Struktur.

Die Entstehung neuer Synapsen in bestimmten Hirnregionen durch den Einfluss von Erfahrungen in komplexen Umwelten sowie von Lernaufgaben im Erwachsenenalter hängt von erfahrungsassoziierter neuronaler Aktivität ab, das heißt, Synapsen entstehen durch die Korrelationen zwischen den Aktivierungszuständen verschiedener Neuronen in den bestimmten informationsverarbeitenden Regionen. Im Unterschied zur frühen sprunghaften Neuentwicklung von Synapsen beschränkt sich die spätere erfahrungsabhängige Bildung von synaptischen Verbindungen auf Regionen, die in die spezifischen informationsverarbeitenden Prozesse eingebunden sind. Doch auch diese spätere Entwicklung verläuft auf eine relativ unspezifische Weise. Erst der kumulative Effekt individueller Erfahrungen führt zu einer Stabilisierung von einigen der neuen Synapsen.

Die erfahrungsabhängige Neubildung von Synapsen wird begleitet von Veränderungen in der Blutversorgung im Gehirn sowie in den Astrozyten, sprich in Gliazellen, die die Aktivitäten der Neuronen und Synapsen metabolisch unterstützen. So ist die Blutgefäßdichte im Gehirn junger, in komplexer Umgebung aufgezogener Ratten extrem hoch. Das Gleiche gilt sowohl für Kapillaren, also für solche Blutgefäße, die für den Nährstofftransport vom Blut ins Gehirn verantwortlich sind, als auch für Astrozyten. Synapsen benötigen große Mengen metabolischer Energie, sodass die Menge der Astrozyten einen großen Einfluss auf das sich entwickelnde Gehirn hat. Die Fähigkeit, neue Blutgefäße zu bilden, sinkt jedoch rapide mit steigendem Alter. Die nach wie vor neu gebildeten Synapsen können daher mit zunehmendem Alter nicht mehr ausreichend versorgt werden.

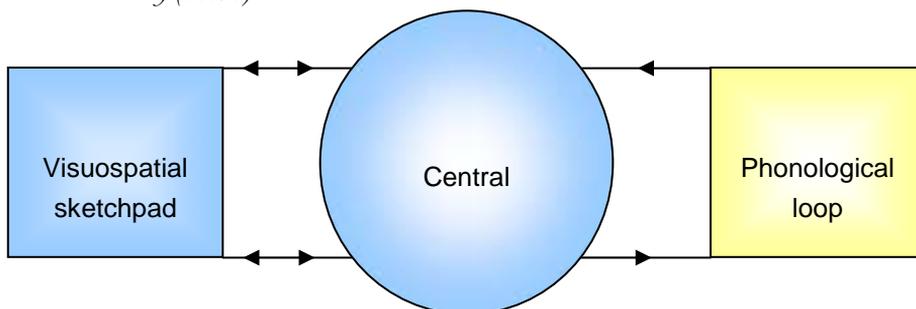
Bei der Ableitung von praktischen Implikationen aus der menschlichen Gehirnentwicklung muss berücksichtigt werden, dass das neuronale Wachstum in verschiedenen Hirnregionen in unterschiedlicher Sequenz verlaufen kann. Während der präfrontale Kortex während der ersten sechs Lebensjahre wächst, stabilisiert sich der visuelle Kortex bereits im zweiten Lebensjahr. In dieser asynchronen Entwicklung der unterschiedlichen Hirnregionen wird ein erheblicher Vorteil gesehen, indem es nämlich dem frühen Entwicklungssystem ermöglicht, dem folgenden, erfahrungsabhängigen System geeignete Rahmenbedingungen zu gewährleisten. Dies ist von großer Relevanz für die menschliche Entwicklung. So könnten frühe soziale und kommunikative Fähigkeiten die Voraussetzungen für die Erwachsenensprache schaffen, oder frühe visuelle und motorische Fähigkeiten könnten dem Kleinkind helfen, räumliche und kausale Beziehungen zu erfassen. Aktive Erfahrung und Wissen zu organisieren und sich an-

zueignen, ist für das Kleinkind von überragender Wichtigkeit, wenn ein bestimmter Prozess die Voraussetzungen für einen anschließenden, erfahrungsabhängigen Prozess schafft. Um sensitive Phasen zu charakterisieren, ist es daher unabdingbar, deren Verlauf, die Hirnregionen, die zu Grunde liegenden Mechanismen sowie den Anteil des Organismus am Erfahrungsprozess zu berücksichtigen.

## 6. Die zentrale Exekutive und das Frontalhirn

Jede komplexe kognitive Leistung verlangt, dass Informationen zielgerichtet verarbeitet werden. Wir können diesen Sachverhalt tagtäglich in verschiedenen Situationen beobachten: Kinder, die im Kopf eine Rechenaufgabe lösen, müssen die vorgegebenen Zahlen entsprechend den Rechenregeln miteinander in Beziehung setzen. Sollen sie einen Aufsatz zu einem bestimmten Thema verfassen, müssen aus ihrem gesamten Wissensbestand selektiv passende Inhalte ausgewählt und in sinnvoller Weise miteinander in Beziehung gesetzt werden. Bereits eine einfache Gesprächssituation zwischen zwei Personen verlangt in der Regel, dass sich der eine Gesprächspartner merkt, was sowohl er als auch der andere bereits gesagt haben, um adäquat darauf reagieren zu können. Diese Reihe an Beispielen lässt sich natürlich noch weiter fortsetzen, von einfachen Alltagstätigkeiten bis hin zu in Aufgaben komprimierten, komplexen Anforderungen bei Intelligenz- oder anderen Fähigkeitstests. Sie sollte vor allem verdeutlichen, dass die (zielgerichtete) Verarbeitung von Informationen zumindest zwei Funktionen voraussetzt: (a) kontrollierte Manipulation und (b) Verfügbarkeit der Informationen. Informationen können nur dann manipuliert werden, wenn sie zumindest vorübergehend verfügbar bzw. aktiv sind. In der Kognitionspsychologie beschäftigt man sich bereits seit Anbeginn mit der Frage, wie dieser Informationsverarbeitungsprozess theoretisch modelliert werden kann, um Erklärungen für kognitive Leistungen und auch Leistungsschwächen oder -störungen anbieten zu können. Zurzeit dominiert in vielen Bereichen der Psychologie vor allem ein Modell, welches mit vielfältigen kognitiven Funktionen in Zusammenhang gebracht wird: das Modell des Arbeitsgedächtnisses. Der Begriff des Arbeitsgedächtnisses (engl.: Working Memory, WM) fand erstmals Erwähnung in dem Buch „Plans and the Structure of Behavior“ von Miller et al. (1960) und ging anschließend in die Tierforschung ein, in welcher man das vorübergehende Behalten von Informationen und Handlungszielen als Arbeitsgedächtnisleistung interpretiert (Baddeley, 2002). In der Psychologie sollte es in den 1970er Jahren das klassische Konzept des Kurzzeitgedächtnisses (Hebb, 1949; Atkinson & Shiffrin, 1968) erweitern und neben reinen Speicherfunktionen auch Informationsverarbeitungsprozesse umfassen.

Abbildung 1: Drei-Komponenten-Modell von Baddeley und Hitch (1974); Darstellung nach Baddeley (2003b)



Im Jahr 1974 haben Baddeley und Hitch ein Drei-Komponenten-Modell des Arbeitsgedächtnisses vorgeschlagen, welches – wenn auch mittlerweile um eine Komponente erweitert – heute noch immer so gut zu funktionieren scheint wie vor 30 Jahren (Baddeley, 2002, 2003b; vgl. für alternative Modelle auch Miyake & Shaw, 1999). Auf den Punkt gebracht ermöglicht das Arbeitsgedächtnis die vorübergehende Speicherung und Verarbeitung von Informationen. Dabei bedient es sich mehrerer Systeme, die im Folgenden erläutert werden sollen. Im klassischen Drei-Komponenten-Modell besteht das Arbeitsgedächtnis aus zwei unselbständigen Systemen (slave systems), welche von einem dritten System, der zentralen Exekutiven, gesteuert werden. Diese „slave systems“ sind für die Speicherung von Informationen verantwortlich, wobei sich die phonologische Schleife (phonological loop) auf Material bezieht, welches sprachlich/phonologisch enkodiert werden kann, während der visuell-räumliche Skizzenblock (visuospatial sketchpad) auf die Speicherung von visuellen und räumlichen (möglicherweise auch kinästhetischen; Baddeley, 2003a) Informationen spezialisiert ist. Das dritte System, die zentrale Exekutive (central executive), wurde in den ersten Jahren nach der Vorstellung dieses Modells noch sehr vage beschrieben, als „Sammelbehälter“ für alle Funktionen, die sich nicht den anderen Systemen zuordnen lassen, und als Steuerorgan der beiden Speichersysteme. Mittlerweile liegen nicht nur sehr konkrete Annahmen über die Funktionen dieses Systems vor, der Begriff „zentrale Exekutive“ liegt heutzutage „im Munde“ vieler PsychologInnen und NeurowissenschaftlerInnen und wird als jenes System betrachtet, welches die eigentliche Grundlage komplexer kognitiver bzw. intelligenter Leistungen bildet. Aufgrund der starken Prominenz der zentralen Exekutiven wird weiter unten ausführlich darauf eingegangen, zunächst sollen die Funktionen der Speichersysteme erläutert werden (vgl. Baddeley, 1996, 2002, 2003a,b).

## 6.1 Das klassische Drei-Komponenten-Modell von Baddeley und Hitch

Die phonologische Schleife stellt das einfachste und am besten untersuchte System des Arbeitsgedächtnisses dar. Sie ist für die vorübergehende Speicherung von jeglichem Inhaltmaterial zuständig, welches phonologisch, das heißt über die Sprache, enkodiert werden kann. Dazu gehört neben verbaler auch numerische Information, denn Zahlen werden in der Regel über Zahlenworte und nicht über räumlich-visuelle Vorstellungen gespeichert. Mit der Annahme dieses Systems konnten einige Ergebnisse im Rahmen psychologischer Gedächtnisspannungsaufgaben besser erklärt werden als mit dem zuvor gebräuchlichen klassischen Kurzzeitgedächtnismodell (Atkinson & Shiffrin, 1968). Bei diesem Aufgabentyp wird eine Reihe von Informationseinheiten (Zahlen, Buchstaben, Wörter) vorgegeben, welche anschließend (in der richtigen Reihenfolge) reproduziert werden müssen. Die Informationseinheiten verschwinden üblicherweise binnen kurzer Zeit (2–3 Sekunden) wieder aus dem Gedächtnis, sofern sie nicht durch (inneres) Wiederholen aufgefrischt werden – jeder kennt diese alltägliche Situation des Merkens einer Telefonnummer vom Lesen im Telefonbuch bis nach dem Wählen. An diesem Beispiel kann man die beiden grundlegenden

Funktionen der phonologischen Schleife ersehen, welche von Baddeley als zwei Subkomponenten derselben angesehen werden: der phonologische Speicher (phonological store) als Speicherort der sprachbasierten Informationen sowie ein artikulatorisches Wiederholungssystem (articulatory oder subvocal rehearsal system), mit welchem die Gedächtnisspuren immer wieder aufgefrischt werden können. Obwohl diese Modellvorstellung empirisch gut belegt werden konnte (vgl. Baddeley, 2003b), blieb die Frage nach der eigentlichen Funktion der phonologischen Schleife jenseits einfacher Gedächtnisspannenaufgaben im Mittelpunkt des Interesses. In mehreren Studien (vgl. Baddeley, 2003a) konnte gezeigt werden, dass dieses System von beträchtlicher Bedeutung für den Spracherwerb ist, sowohl beim Erst- als auch beim Zweitspracherwerb. So stellte sich etwa heraus, dass Störungen der Funktion der phonologischen Schleife (z.B. durch artikulatorische Suppression, d.h. ein Wort muss permanent wiederholt werden, während Vokabeln dargeboten werden) das Vokabellernen einer Zweitsprache massiv beeinträchtigen. In einer anderen Studie mit finnischen Kindern wurde gefunden, dass der Erfolg beim Englischlernen mit der sprachlichen Gedächtnisspanne zusammenhängt. In neuropsychologischen Untersuchungen wurde von Patienten mit gestörter Funktion der phonologischen Schleife berichtet, die massive Probleme hatten, Assoziationen zwischen Wörtern der eigenen Sprache und Fremdwörtern herzustellen, obwohl die Bildung von Assoziationen zwischen zwei beliebigen Wörtern in der eigenen Sprache nicht betroffen war. Die Kapazität der phonologischen Schleife erwies sich außerdem als guter Prädiktor für den Erfolg beim Erstspracherwerb, insbesondere wenn Kunstwörter reproduziert werden sollen. Diese und weitere Befunde (vgl. Daneman & Merikle, 1996) sprechen für einen starken Zusammenhang dieses Arbeitsgedächtnissystems mit dem Spracherwerb. Insbesondere nimmt man an, dass die phonologische Schleife den Spracherwerb in zweierlei Hinsicht unterstützt: Zum einen bietet der phonologische Speicher Ressourcen für die vorübergehende Repräsentation von neuen Phonem-Sequenzen, zum anderen stellt das artikulatorische Wiederholungssystem die grundlegende Möglichkeit der Einspeicherung neuer Wörter in das Langzeitgedächtnis zur Verfügung.

Während die phonologische Schleife auf die Speicherung von sprachbasierten Informationen spezialisiert ist, stellt der visuell-räumliche Skizzenblock das Analogon für visuelle und räumliche Informationen dar. Vor allem bei kognitiven Anforderungen, welche die Speicherung und Manipulation von nicht-sprachbasierten Informationen erfordern (z.B. bei der räumlichen Orientierung oder beim räumlichen Vorstellungsvermögen), ist dieses System gefragt. Die Kapazität dieses Subsystems wurde sogar mit Leistungen in der Architektur oder den Ingenieurwissenschaften in Zusammenhang gebracht (Baddeley, 2003b). Obgleich dieses Speichersystem deutlich weniger intensiv untersucht wurde als die phonologische Schleife, geht man davon aus, dass es auch für visuell/räumliche Informationen eine Speicherkomponente (visual cache) und eine Wiederholungskomponente (inner scribe) gibt. Abgesehen von der plausiblen Beteiligung des visuell-räumlichen Skizzenblocks bei den oben erwähnten Aufgaben deuten jüngere Befunde auch auf Zusammenhänge mit der Sprachverarbeitung hin. Kinder mit dem Williams-Syndrom (einer Erbkrankheit) weisen relativ normale verbale, jedoch gestörte visuell-räumliche Fähigkeiten auf. Diesen Kindern wurden Satzverarbeitungsaufgaben unterschiedlicher Komplexität und mit un-

terschiedlichen Inhalten vorgegeben. Es stellte sich heraus, dass die betroffenen Kinder im Vergleich zu einer Kontrollgruppe ausschließlich bei jenen Sätzen überdurchschnittlich viele Fehler machten, die räumliche oder visuelle Informationen enthielten (z.B. räumliche Relationen wie über, unter, in; visuelle Informationen wie heller vs. dunkler). Dieser Befund wurde als ein erster Hinweis auf die Bedeutung des Skizzenblocks für die Sprachverarbeitung interpretiert, zumindest wenn bestimmte Inhalte oder Relationen beteiligt sind.

Das dritte System im Arbeitsgedächtnismodell von Baddeley, die zentrale Exekutive, kann als ein zentrales Kontrollsystem betrachtet werden, welches für eine Reihe wichtiger Entscheidungen verantwortlich ist. Wie oben erwähnt herrschte in den ersten Jahren weitgehende Unklarheit über die Funktionen dieses Systems. Baddeley selbst verglich die zentrale Exekutive zunächst mit einem Homunkulus, einem kleinen Menschen, der beispielsweise entscheidet, wann welches Speichersystem in Anspruch genommen wird (vgl. Baddeley, 2002). Der Begriff „Exekutive“ legt ebenso nahe, dass dieses System nicht nur weiß, was die anderen Systeme tun, sondern auch auf irgendeine Weise Kontrolle über sie ausübt (Posner & Dehaene, 1994). Für die Erbringung einer komplexen kognitiven Leistung – oder, wie einleitend genannt, einer zielgerichteten Manipulation von Information – müssen zumindest drei Voraussetzungen erfüllt sein: (1) Das Ziel, welches erreicht werden soll, muss kognitiv präsent sein. (2) Aus allen verfügbaren Informationen, die sowohl von außen (Umwelt) als auch von innen (Gedächtnis) kommen können, muss die Aufmerksamkeit selektiv auf die relevanten, zu manipulierenden Inhalte gerichtet werden. (3) Durchgeführte mentale Operationen müssen stets im Hinblick auf ihre Effizienz und Nützlichkeit für die Zielerreichung überprüft und ungeeignete Operationen unterdrückt werden. Diese drei zentralen Voraussetzungen erfordern einerseits die bereits ausgeführte Speicherfunktion des Arbeitsgedächtnisses, andererseits den zielgerichteten Einsatz von Verarbeitungsressourcen, welche auf kognitiver Ebene primär über Aufmerksamkeitsprozesse gesteuert werden: Die Aufmerksamkeit wird selektiv auf die relevanten Inhalte gerichtet, irrelevante Informationen werden ausgeblendet; gleichzeitig kann die Aufmerksamkeit auf zumindest zwei Prozesse gerichtet sein, die mentale Operation (bspw. die Rechenoperation) selbst sowie die Überwachung der Zielerreichung durch Evaluierung der Nützlichkeit und Effizienz der durchgeführten Operationen. Diese Art von Aufmerksamkeitssteuerung kann gegenwärtig als Kernfunktion der zentralen Exekutive angesehen werden (z.B. Baddeley, 2003a,b; Collette & van der Linden, 2002; Engle et al., 1999; Smith & Jonides, 2003; Süß et al., 2002), obwohl im Laufe der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit diesem System eine ganze Reihe weiterer kognitiver Funktionen dem Begriff „zentrale Exekutive“ zugeordnet wurden. Zum überwiegenden Teil waren es Supervisionsfunktionen, denen im Rahmen von zielgerichtetem Verhalten eine zentrale Bedeutung zukommt.

Die kurze Darstellung der Funktionen der zentralen Exekutive legt bereits nahe, dass dieses System bei unterschiedlichen kognitiven Anforderungen auch in unterschiedlichem Ausmaß beansprucht werden kann. Stellt man sich Tätigkeiten vor, die aufgrund von Überlernung zu Routinetätigkeiten geworden sind, wird dieses System des Arbeitsgedächtnisses wesentlich geringer beansprucht werden als bei Anforderungen, welche für eine Person neu sind und eine kon-

trollierte, zielgerichtete Auseinandersetzung mit ihnen erfordern. Die Unterscheidung zwischen kontrollierter und automatisierter Informationsverarbeitung (Posner & Snyder, 1975; Shiffrin & Schneider, 1977), eines der zentralen Konzepte in der Kognitionspsychologie, bezieht sich auf eben dieses Kontinuum der Involviertheit von zentral-exekutiven Funktionen. Stark automatisierte Prozesse (wie bspw. das Autofahren) können mit geringer kognitiver Beanspruchung ausgeführt werden; neuartige und/oder komplexe kognitive Anforderungen (wie bspw. die Durchführung einer schwierigen Rechenoperation im Kopf) verlangen eine kontrollierte Informationsverarbeitung, die mit einer hohen Anstrengung und Beanspruchung der zentralen Exekutive einhergeht (vgl. Ackerman, 1986). Diese Beispiele verdeutlichen ebenso, dass bestimmte Tätigkeiten oder kognitive Anforderungen nicht absolut auf dem Kontinuum lokalisiert werden, sondern dass sich selbst intraindividuell Veränderungen ergeben können. Eine Tätigkeit, die anfänglich vorwiegend kontrollierter Informationsverarbeitung bedurfte (z.B. die erste Fahrstunde), kann durch zunehmende Übung oder Training zu einer stark automatisierten Tätigkeit werden (z.B. bei einem erfahrenen Autofahrer). Je stärker eine Aufgabe den kontrollierten Umgang mit Informationen benötigt, desto eher kann man von einer Aufgabe sprechen, die das Arbeitsgedächtnis einer Person, in seiner Funktion bestehend aus vorübergehender Speicherung und Verarbeitung von Informationen, in Anspruch nimmt.

## **6.2 Arbeitsgedächtniskapazität und kognitive Leistungen**

Jeder dürfte aus eigener Erfahrung wissen, dass nicht jede komplexe kognitive Aufgabe „im Kopf“ gelöst werden kann; wir müssen uns manchmal externer Hilfsmittel bedienen (Zwischenergebnisse einer Rechenaufgabe niederschreiben) oder stoßen einfach an unsere Grenzen wie bei den komplexeren Aufgaben in klassischen Intelligenztests. Ein entscheidendes Charakteristikum des Arbeitsgedächtnisses ist seine begrenzte Kapazität. Diese Kapazität unterliegt einerseits intraindividuellen Veränderungen (im Laufe der Entwicklung), andererseits auch interindividuellen Unterschieden. Es lag somit nahe, das Arbeitsgedächtnis mit einer Reihe von anderen kognitiven Leistungen in Beziehung zu setzen um herauszufinden, wie stark seine Kapazität die geistige Leistungsfähigkeit von Personen in verschiedenen Fähigkeitsbereichen erklären kann. Als Arbeitsgedächtnisaufgaben kamen überwiegend so genannte „dual tasks“ zur Anwendung, bei denen zwei Aufgaben (üblicherweise die dem Arbeitsgedächtnis zugeschriebenen Funktionen Speichern und Verarbeiten) vom Probanden gleichzeitig bearbeitet werden müssen. Eine häufig zitierte Aufgabe dieser Art ist die Lesespannaufgabe („reading span task“, Daneman & Carpenter, 1980). Bei dieser werden Sätze vorgegeben, die der Proband auf ihren Wahrheitsgehalt überprüfen und sie als richtig oder falsch beurteilen muss (z.B. „Alle Männer tragen einen Bart.“). Zusätzlich muss er sich das letzte Wort eines jeden Satzes merken und im Anschluss an die Darbietung von drei bis sieben derartigen Sätzen in der richtigen Reihenfolge reproduzieren. Bei einer anderen Aufgabe, beispielsweise der „counting span task“ (vgl. Engle et al., 1999), sollen die Probanden jeweils die Anzahl der Elemente (z.B. Zahlen) auf einem Bildschirm

bestimmen, sich diese für mehrere Durchgänge einprägen und im Anschluss reproduzieren. Als Maß für die Arbeitsgedächtniskapazität wird üblicherweise die durchschnittliche Anzahl der richtig reproduzierten Einheiten, seien es Wörter oder Zahlen, herangezogen. Neben diesen exemplarisch dargestellten Aufgabentypen wurde mittlerweile eine Vielzahl von Arbeitsgedächtnisaufgaben entwickelt, die sich sowohl auf das Arbeitsgedächtnis als gesamtes System als auch auf die einzelnen Subsysteme (phonologische Schleife, visuell-räumlicher Skizzenblock, zentrale Exekutive) beziehen.

In welcher Beziehung steht nun die über derartige kognitive Aufgaben gemessene Arbeitsgedächtniskapazität zu „realitätsnahen“ kognitiven Leistungen und Fähigkeiten? In mehreren Studien fanden sich Zusammenhänge mit einer Vielzahl von Variablen, darunter Lese- und Sprachverständnis, Lernschwierigkeiten bei Kindern, rechnerisches Denken, Vokabellernen und räumliches Vorstellungsvermögen (vgl. Engle et al., 1999). Da Unterschiede in diesen Einzelleistungen verhältnismäßig gut über Unterschiede in der Arbeitsgedächtniskapazität erklärt werden konnten, stellte sich als nächstes die Frage, wie stark die Arbeitsgedächtniskapazität mit umfassenderen kognitiven Fähigkeiten, wie der Intelligenz, assoziiert ist. Die erste Studie, die sich explizit dieser Fragestellung widmete, stammt von Kyllonen und Christal (1990), in welcher überraschend hohe Korrelationen ( $r_s$  zwischen .80 und .90) zwischen Arbeitsgedächtniskapazitätsmaßen und der „reasoning“-Komponente der Intelligenz (schlussfolgerndes Denken) gefunden wurden, was die Autoren veranlasste, (fluide) Intelligenz mit Arbeitsgedächtnis gleichzusetzen. Nachfolgende Untersuchungen (z.B. Ackerman et al., 2002; Colom et al., 2004; Conway et al., 2002) förderten ebenso substantielle Zusammenhänge mit verschiedenen Intelligenzindikatoren ans Licht, wodurch die ursprüngliche Annahme des Arbeitsgedächtnisses als eines zentralen Faktors bei komplexen kognitiven Leistungen weiter bestärkt wurde. Gegenwärtig kann die Arbeitsgedächtniskapazität als der beste Prädiktor für Intelligenzleistungen angesehen werden, der jemals aus kognitiven Theorien abgeleitet wurde (Süß et al., 2002).

Engle et al. (1999) untersuchten, welche Arbeitsgedächtnisfunktionen am stärksten mit kognitiven Leistungen oder Intelligenz zusammenhängen. Zu diesem Zweck bedienten sie sich eines vereinfachten Arbeitsgedächtnismodells, welches lediglich die Speicherkomponente (das Kurzzeitgedächtnis, unabhängig vom Inhaltmaterial) von der zentralen Exekutive trennt: Arbeitsgedächtniskapazität setze sich aus Kurzzeitgedächtniskapazität, der zentralen Exekutive und einem Messfehler zusammen. In der zitierten Untersuchung gaben sie mehrere kognitive Aufgaben vor, die entweder nur das Kurzzeitgedächtnis beanspruchen sollten oder sich zusätzlich auf die zentrale Exekutive bezogen, also das Arbeitsgedächtnis als Ganzes. Mittels Faktorenanalysen und Strukturgleichungsmodellen konnten sie nicht nur demonstrieren, dass sich diese beiden Aufgabentypen empirisch differenzieren lassen, sondern auch, dass lediglich die Arbeits- und nicht die Kurzzeitgedächtniskapazität mit Intelligenzkomponenten zusammenhängt. Unter Anwendung ihrer Modellvorstellung konnten sie überdies darlegen, dass der Zusammenhang zwischen Arbeitsgedächtniskapazität und (in ihrer Untersuchung ebenso fluider) Intelligenz auf die zentrale Exekutive zurückgeführt werden kann; die reine Speicherfunktion erwies sich hingegen als unkorreliert. Die Autoren (wie später auch Conway et al., 2002) argumentierten,

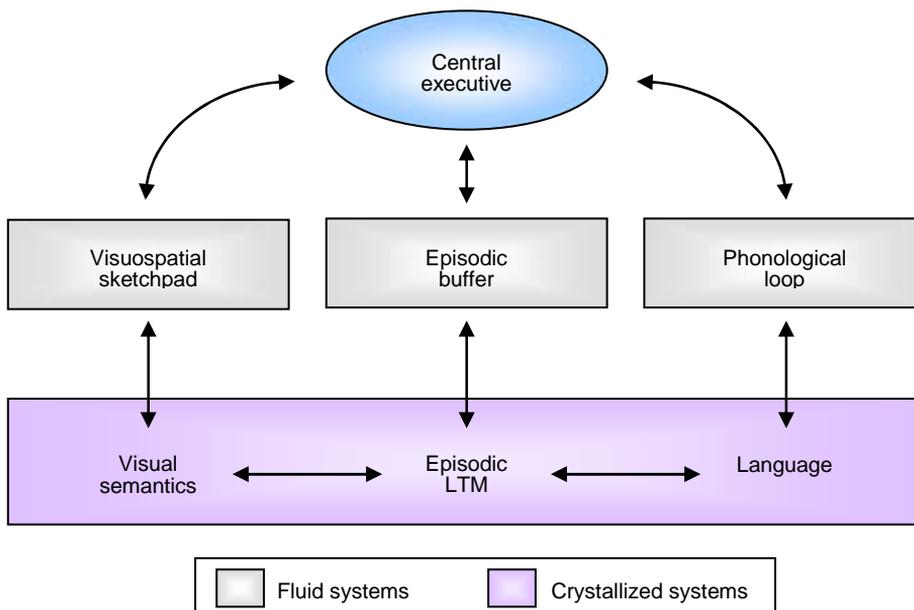
dass die Stärke des Zusammenhangs zwischen der Leistung bei einer kognitiven Aufgabe und Intelligenz in erster Linie davon abhängt, wie stark die zentrale Exekutive beansprucht wird. Reine Gedächtnisspannungsaufgaben, die mit einfachen kognitiven Mechanismen wie der artikulatorischen Wiederholung oder Gruppierung von Informationen („chunking“, siehe Ausführungen zum Mehr-Komponenten-Modell von Baddeley weiter unten) bewältigt werden können, sollten sich demnach als nicht mit komplexen kognitiven Fähigkeiten assoziiert herausstellen; Arbeitsgedächtnisaufgaben, die neben der Speicher- auch die Verarbeitungskomponente ansprechen (wie bspw. die dual tasks) und kontrollierte Aufmerksamkeitssteuerung erfordern, hingegen schon (vgl. auch Conway et al., 2003; Kail & Hall, 2001). Diese Schlussfolgerung scheint höchst plausibel und passt auch sehr gut zu anderen Befunden der Intelligenzforschung, beispielsweise der Beobachtung, dass die Leistung in elementaren kognitiven Aufgaben (bspw. Reaktionszeitaufgaben) nur sehr schwach mit Intelligenz zusammenhängt – wird jedoch deren Komplexität erhöht (was den zunehmenden Einsatz von kontrollierter Aufmerksamkeit impliziert), steigen die Korrelationen an (vgl. Mackintosh, 1998). Wie stark die zentrale Exekutive im Rahmen einer kognitiven Anforderung involviert ist, ist nicht nur eine Frage des Aufgabentyps, sondern auch eine Frage interindividueller Unterschiede. Personen, welche bereits verschiedene Strategien entwickelt haben sich Inhalte einzuprägen, können dies weitgehend automatisiert bewerkstelligen, wohingegen andere – in Ermangelung dieser Fertigkeiten – ihre Aufmerksamkeitsprozesse in stärkerem Ausmaß einsetzen müssen. Für die Ersteren wäre eine solche Aufgabe eine klassische Kurzzeitgedächtnisaufgabe, für die Letzteren eher eine Arbeitsgedächtnisaufgabe. Interindividuelle Unterschiede sind somit nicht nur in unterschiedlichen Kapazitätsausmaßen reflektiert, sondern beeinflussen auch das Ausmaß des Einbezugs der zentralen Exekutive.

### 6.3 Das Mehr-Komponenten-Modell von Baddeley

Die bisherigen Ausführungen bezogen sich auf jene Komponenten des klassischen Arbeitsgedächtnismodells, welches erstmals 1974 von Baddeley und Hitch vorgestellt wurde. Obgleich die Anwendung dieses Modells in vielen Fällen noch angemessen erscheint, konnten manche empirischen Befunde mit der Vorstellung von zwei inhaltsspezifischen Speichersystemen und eines zentralen Steuerungssystems nicht in Einklang gebracht werden. Im Besonderen weist Baddeley (2000, 2002, 2003a, 2003b) auf zwei entscheidende Defizite seines klassischen Modells hin: (1) Es fehle ein System, welches die Zusammenführung von verbal und visuell kodierter Information bei der Enkodierung in das Langzeitgedächtnis erlaubt. (2) Mit dem bisherigen Modell könne nicht erklärt werden, wie größere, die Kapazität der „slave systems“ zweifellos übersteigende Informationsmengen vorübergehend gespeichert werden können, beispielsweise Inhalte von Geschichten oder Erzählungen. Dass auch diese Leistungen dem Arbeitsgedächtnis zugeschrieben werden müssen, zeigte sich bei Patienten mit Hirnläsionen, die trotz massiv geschädigtem Langzeitgedächtnis dennoch in der Lage waren, sich die Inhalte von Texten mit 20 oder mehr Ideeneinheiten kurzzeitig zu merken. Die genannten Defizite des Drei-Komponenten-Modells führten zum Vorschlag eines vierten Teilsystems, dem episodischen Puffer (episo-

die buffer). Es handelt sich hierbei ebenso um ein Speichersystem von begrenzter Kapazität, welches in besonderem Ausmaß mit der zentralen Exekutiv in Zusammenhang steht und die Zusammenführung von Informationen unterschiedlicher Inhalte (Kodierungen) und Quellen zu so genannten „Episoden“ ermöglicht. Mit dem Postulat dieses Systems wurde zugleich eine stärkere Verknüpfung des Arbeitsgedächtnisses mit dem Langzeitgedächtnis hergestellt, welche über die ursprüngliche Vorstellung, dass Informationen unidirektional von der Umwelt über das Arbeitsgedächtnis in das Langzeitgedächtnis gelangen können, weit hinausgeht. Im aktuellen Mehr-Komponenten-Modell des Arbeitsgedächtnisses, stehen die Systeme des Arbeitsgedächtnisses, in erster Linie über den episodischen Puffer, in engem Austausch mit den im Langzeitgedächtnis gespeicherten (kristallisierten) Inhalten. Der alltäglichen Beobachtung, dass in der Umwelt verfügbare Informationen nicht unabhängig vom bisherigen Wissensbestand wahrgenommen und verarbeitet werden, trägt diese stärkere Vernetztheit der beiden Gedächtnissysteme ebenfalls Rechnung. Selbst bei den weiter oben beschriebenen einfachen Gedächtnisspannungsaufgaben, die als Paradebeispiel für die Funktionsweise von Kurzzeitspeichern angeführt wurden, kann das Langzeitgedächtnis eine wichtige Rolle spielen. Man denke zum Beispiel an Personen, welche sich eine dargebotene Reihe von Zahlen nicht in mechanischer Art und Weise einprägen, sondern in Abhängigkeit von ihrem Wissen Strategien bei der Speicherung einsetzen, beispielsweise einzelne Zahlen mit Jahreszahlen in Verbindung bringen und sie zu einer geringeren Zahl von Informationseinheiten aggregieren (das Prinzip des chunkings). Derartige Strategien wären nicht möglich, wenn das Langzeitgedächtnis nicht in enger Beziehung zum Arbeitsgedächtnis stünde.

Abbildung 2: Mehr-Komponenten-Modell von Baddeley (2000); Darstellung nach Baddeley (2003b)



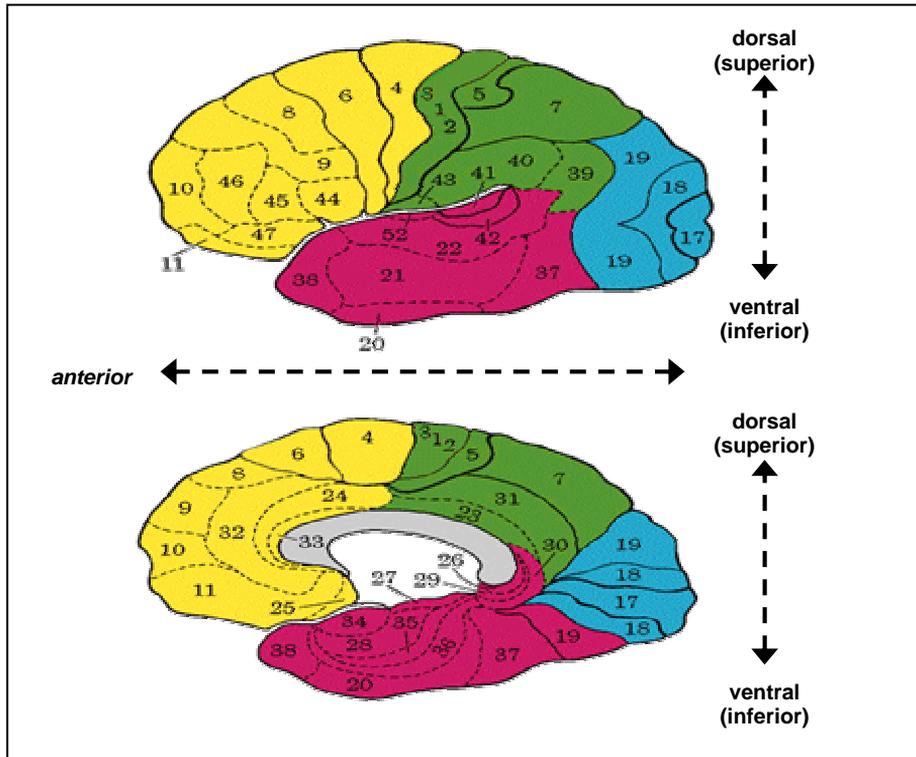
## 6.4 Die neuronalen Grundlagen des Arbeitsgedächtnisses

In Anbetracht der herausragenden Relevanz des Arbeitsgedächtnisses fühlten sich auch NeurowissenschaftlerInnen aufgerufen, die einzelnen Funktionen dieses kognitiven Systems im Gehirn zu lokalisieren. Viele Modellannahmen der Arbeitsgruppe um Baddeley stützten sich bereits auf neuropsychologische Befunde von Patienten mit kognitiven Defiziten, verursacht durch Gehirnläsionen. Zum Beispiel berichten sie von Patienten, welche kaum in der Lage waren neue Inhalte zu lernen (was das Langzeitgedächtnis berührt), deren Kurzzeitgedächtnis allerdings ganz normal funktionierte. Bei anderen Patienten wurde genau das Gegenteil beobachtet: beeinträchtigte verbale Gedächtnisspanne, jedoch normale Funktion des Langzeitgedächtnisses und kaum Beeinträchtigungen in Alltagsleistungen (vgl. Baddeley, 2003b). Diese Befunde untermauerten die Annahme einer Differenzierbarkeit zwischen Kurz- und Langzeitgedächtnis und darüber hinaus die Erweiterung des Kurzzeitgedächtnismodells um ein differenzierteres Arbeitsgedächtnismodell. Mit der Anwendung von bildgebenden Verfahren konnte der Frage nach der Lokalisation bzw. der neuroanatomischen Differenzierung der einzelnen Komponenten gründlicher nachgegangen werden. Gegenwärtig liegen eine Vielzahl derartiger Studien vor, die sich mit unterschiedlichen Facetten von Arbeitsgedächtnisleistungen beschäftigen und die einzelnen Funktionen bzw. Systeme des Arbeitsgedächtnisses bereits mit verschiedenen Gehirnregionen in Zusammenhang bringen konnten (vgl. die Review-Artikel von Collette & van der Linden, 2002; Fletcher & Henson, 2001; Kane & Engle, 2002; Smith & Jonides, 2003); lediglich zum erst kürzlich vorgestellten System des episodischen Puffers scheint es noch keine konkreten Vorstellungen oder empirischen Befunde zu geben. Von besonderem Interesse war die Suche nach dem neuronalen Substrat (bzw. Korrelat) der zentralen Exekutive, stellt sie doch das Kernstück des Arbeitsgedächtnisses dar. Bevor auf diese für kognitive Leistungen so wichtige Komponente Bezug genommen wird, soll zunächst die Befundlage zu den beiden „slave systems“ dargestellt werden.

Die stärkere empirische Befundlage liegt auch auf neurophysiologischer Ebene für die phonologische Schleife und deren Subkomponenten vor. Der überwiegende Teil der Studien (zusammengefasst in den oben erwähnten Review-Artikeln) spricht für (a) eine linkshemisphärische Lokalisation und (b) eine Trennung zwischen einem anterior lokalisierten artikulatorischen Wiederholungssystem und einem posterior befindlichen phonologischen Speicher. Konkret konnte der phonologische Speicher im Brodmann-Areal (BA) 40 (temporo-parietal, siehe Abbildung 3) lokalisiert werden, einer Region, deren Schädigung zur Beeinträchtigung des Kurzzeitgedächtnisses führt. Das artikulatorische Wiederholungssystem umfasst einerseits das bekannte Broca'sche Sprachzentrum (BA 44, inferior frontal) und prämotorische Areale (BA 6) – beides Areale, die für die Sprachproduktion zuständig sind. Im Gegensatz zur phonologischen Schleife erwies sich der visuell-räumliche Skizzenblock eher rechts-hemisphärisch lokalisiert, was in Einklang mit Befunden steht, welche visuell-räumliche Leistungen eher mit der rechten Hemisphäre in Verbindung bringen (vgl. Vogel et al., 2003). Dabei wird der „visual cache“ eher posterior lokalisiert (BA 19, okzipital), das räumlich-visuelle Analogon zum artikulatorischen Wie-

derholungssystem (inner scribe) etwas verteilter in den BA 6, 47 (prämotorisch, inferior frontal) und 40 (temporo-parietal; vgl. auch Baddeley, 2003b).

Abbildung 3: Zytoarchitektonische Karte kortikaler Areale nach Brodmann (1908)<sup>2</sup>



Abgebildet ist die laterale Sicht auf den linkshemisphärischen Kortex (obere Abbildung) und auf den Medianschnitt des Gehirns (untere Abbildung). Die Farbflächen kennzeichnen die Gehirnlappen: Frontallappen (gelb), Parietallappen (grün), Temporallappen (rot) und Okzipitallappen (blau).

Die neurowissenschaftliche Suche nach der zentralen Exekutive des Arbeitsgedächtnisses kann auf eine längere Forschungsgeschichte zurückblicken als jene nach den „slave systems“, da schon seit den ersten Dokumentationen von Patienten mit Hirnschädigungen und deren Auswirkungen Versuche unternommen wurden, Rückschlüsse auf die Lokalisation komplexer kognitiver Funktionen zu ziehen. Einen besonderen Stellenwert nahm in diesem Zusammenhang der Frontallappen ein, jener vordere Teil des Neokortex, welcher beim Menschen verglichen mit anderen Spezies am weitesten entwickelt ist. Tatsächlich beherbergt der Frontallappen mehr als 30 Prozent aller kortikalen Neurone und weist eine Vielzahl von (meist reziproken) Verbindungen mit anderen Teilen des

<sup>2</sup> Brodmann teilte die Großhirnrinde nach histologischen und funktionalen Kriterien in 52 Areale ein, zum Beispiel stellen die Brodmann-Areale (BA) 41 und 42 die primäre Hörrinde im Temporallappen dar. Diese Einteilung findet auch heute noch Anwendung bei der topographischen Lokalisation von Funktionen.

menschlichen Gehirns auf, sowohl kortikalen (z.B. parietalen und temporalen) als auch subkortikalen (z.B. Hippocampus, Thalamus, Amygdala). Auch wegen der starken Vernetztheit dieser evolutionär jungen Gehirnregion mit anderen Arealen lag es nahe, komplexe Funktionen dort zu lokalisieren. Aktuelle Übersichtsarbeiten bringen vielfältige kognitive Defizite mit Schädigungen des PFC in Verbindung, darunter Aufmerksamkeit, motorische Kontrolle, räumliche Orientierung, Kurzzeitgedächtnis, Lernen, Kreativität oder schlussfolgerndes Denken (vgl. Fuster, 1988); selbst psychiatrische Störungen wie Schizophrenie werden mit dem PFC assoziiert (z.B. Antonova et al., 2004). Patienten mit Schädigungen des Frontallhirns weisen insbesondere Defizite in Leistungen auf, welche in irgendeiner Form mit kognitiver Kontrolle bei zielgerichteten Handlungen in Zusammenhang stehen, was häufig als „dysexekutives Syndrom“ bezeichnet wird. Üblicherweise sind die einzelnen Teilleistungen einer Handlungsabfolge nicht betroffen, Probleme zeigen sich jedoch, wenn die Handlungen zielgerichtet (planmäßig) koordiniert werden sollen (wenn der Kaffee beispielsweise umgerührt wird, bevor Milch hinzugegeben wird). Eingedenk dieser Befunde erscheint es nicht verwunderlich, dass in jüngeren Studien mit bildgebenden Verfahren in der Regel beobachtet wurde, dass Teile des Frontallappens immer aufleuchten, wenn komplexe kognitive Aufgaben, allen voran Arbeitsgedächtnisaufgaben, bearbeitet werden. Durch die Verwendung von Aufgaben mit unterschiedlichen Anforderungen und entsprechenden Untersuchungsdesigns wurden die einzelnen Funktionen der zentralen Exekutive verschiedenen Teilen des Frontallhirns zugeordnet. Insbesondere wird in der Literatur von drei funktional differenzierbaren Regionen des Frontalkortex berichtet: (1) der dorsolaterale PFC (DLPFC), welcher über dem inferioren frontalen Gyrus liegt (BA 9, 46), sei vorwiegend für die aktive, selektive Manipulation von sich im Arbeitsgedächtnis befindlichen Inhalten zuständig; (2) der ventrolaterale PFC (VLPFC) unter dem inferioren frontalen Gyrus (BA 44, 45, 47) sei an der Aufrechterhaltung von Informationen im Arbeitsgedächtnis und der Aktualisierung dieser Informationen beteiligt; (3) der anteriore frontale Kortex (AFC), am weitesten vorne liegend (BA 8, 10), spiele bei der aktiven Auswahl von zielgerichteten Prozessen und bei deren Aufrechterhaltung und Überwachung eine bedeutende Rolle. Die drei Areale und Funktionen scheinen den Kern der zentralen Exekutive zu bilden, wenngleich diesen Gehirnregionen in manchen Studien zusätzliche Funktionen attribuiert wurden. Ähnlich wie bei den „slave systems“ sprechen einige Befunde auch bei diesen „höheren“ Gehirnregionen für eine eher linkshemisphärische Aktivierung bei verbalen und eine eher rechtshemisphärische Aktivierung bei visuell-räumlichen Informationen, wenngleich die Befundlage gerade für die den komplexeren Funktionen zu Grunde liegenden Areale (DLPFC und AFC) nicht konsistent ist (vgl. Fletcher & Henson, 2001).

Eingedenk der starken Zusammenhänge zwischen Arbeitsgedächtnis- und Intelligenzleistungen stieß die Zuordnung zentral-exekutiver Funktionen zu Teilen des präfrontalen Kortex auch auf großes Interesse in der neurowissenschaftlichen Intelligenzforschung. Im Besonderen erhoffte man sich durch eine eindeutige neurophysiologische Befundlage auch eine Antwort auf die umstrittene Frage, ob Intelligenz ein unitäres Konstrukt („g“, vgl. Jensen, 1998) ist oder ob es verschiedene, unabhängige Intelligenzen gibt (vgl. Gardner, 1983), welche

im Gehirn möglicherweise verteilt lokalisiert sind. Eine der ersten Studien in diesem Kontext stammt von Risberg et al. (1977), in welcher zwölf Männern zwei Parallelförmige Aufgaben eines bekannten non-verbalen Intelligenztests (Ravens Matrizenaufgaben; Raven, 1958) vorgegeben wurden. Bei der ersten Vorgabe beobachteten die Autoren einen erhöhten zerebralen Blutfluss in frontalen und post-zentralen Gehirnregionen, während der zweiten Vorgabe (einer Parallelversion) fanden sie hingegen lediglich post-zentral eine Zunahme im Blutfluss. Sie interpretierten die konsistente Aktivierung im post-zentralen Bereich als Hinweis auf die Beteiligung dieser Regionen bei der Lösung der Intelligenzaufgaben. Die Aktivierungsabnahme im Frontalhirn schrieben sie anderen, unspezifischen Faktoren wie Ängstlichkeitsabbau und Kontrollprozessen zu und wiesen explizit darauf hin, dass „great care has to be taken in relating increases in frontal regions to any specific type of mental task“ (Risberg et al., 1977, S. 796). Die Befundlage von nachfolgenden Studien mit elaborierteren Untersuchungsdesigns hob jedoch die große Bedeutung von frontalen Gehirnarealen für intelligente Leistungen erneut hervor. So fanden Duncan et al. (2000) im direkten Vergleich von verschiedenen Aufgaben mit hohen und geringen Anforderungen an die allgemeine Intelligenz (g) systematische Aktivierungen des lateralen PFC, was als Evidenz für die Lokalisation von „g“ in dieser Region betrachtet wurde. Allerdings berichteten Autoren anderer Studien mit vergleichbaren Designs eine über anteriore und posteriore Regionen verstreute Aktivierung, was die Gleichsetzung von allgemeiner Intelligenz und PFC wiederum in Frage stellt (vgl. Gray & Thompson, 2004).

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann zumindest die Beteiligung von präfrontalen kortikalen Regionen bei intelligenten Leistungen und Fähigkeiten als unumstritten betrachtet werden (vgl. Gray & Thompson, 2004; Kane & Engle, 2002). Ebenso unumstritten ist die Rolle dieser Regionen für eine Reihe von kognitiven Funktionen, die unter dem Terminus exekutiv subsumiert werden und sich weitestgehend in aktuelle Arbeitsgedächtnismodelle (Baddeley, 2003b; Engle et al., 1999; Süß et al., 2002) integrieren lassen. Unter zusätzlicher Berücksichtigung der starken Zusammenhänge zwischen Arbeitsgedächtniskapazität (bzw. der zentralen Exekutive) und fluider Intelligenz auf der Verhaltensebene scheint die Schlussfolgerung angemessen, dass komplexe kognitive Leistungen durch die Funktionen des Arbeitsgedächtnisses vermittelt werden, welche ihrerseits durch ein neuronales Netzwerk verschiedener Gehirnregionen unter der steuernden bzw. exekutiven Funktion des PFC ermöglicht werden (vgl. auch Heyder et al., 2004 zu kortiko-subkortikalen Verschaltungen im Rahmen von zentral exekutiven Funktionen).

## 7. Zur Lokalisierbarkeit kognitiver Funktionen

Nach der kurzen Darstellung der gegenwärtigen Befundlage zur Lokalisation verschiedener Arbeitsgedächtniskomponenten, welche eine zentrale Grundlage für kognitive Leistungen bilden, kann die Frage gestellt werden, ob jenseits dieses universell anwendbaren Arbeitsgedächtnisses qualitativ differenzierbare kognitive Funktionen, wie etwa mathematische Leistungen, eine eindeutige neuronale Entsprechung aufweisen bzw. wie eindeutig solche Entsprechungen sein können. Es wäre zum Beispiel nahe liegend anzunehmen, dass die Erbringung mathematischer Leistungen die Aktivierung anderer Gehirnregionen voraussetzt als jener, die am Verständnis eines Textes beteiligt sind. Könnte eine derartige Zuordnung vorgenommen werden, würden sich dadurch auch neue Perspektiven für die Lehr-Lern-Forschung eröffnen, insbesondere für die Untersuchung jener Forschungsfragen, die ein über traditionelle Verhältnisse hinausgehendes methodisches Inventar erfordern. So könnten beispielsweise Antworten auf die Frage gefunden werden, ob verschiedene Formen tutorieller Interaktion im Mathematikunterricht in unterschiedlichem Ausmaß zur Rekrutierung der für gute Mathematikleistungen erforderlichen Gehirnregionen führen. Ebenso läge auf Individualebene die Frage nahe, ob man auf Basis der Gehirnaktivierungsmuster erkennen kann, ob ein Schüler oder eine Schülerin bei bestimmten Aufgaben bereits „adäquate“ Lösungsstrategien einsetzt oder versucht, die Lösung auf suboptimalem Weg zu erreichen. Antworten auf Fragestellungen dieser Art stehen mit Hilfe dieser Methoden jedoch nur dann in Aussicht, wenn zumindest eine grundlegende Voraussetzung erfüllt ist: Für eine (komplexe) kognitive Leistung bzw. einen kognitiven Prozess muss es ein korrespondierendes neuronales Aktivierungsmuster geben, welches infolge als eine Art Marker für das Vorgehen bei der Lösung eines Problems verwendet werden kann. Die Diskussion des Potenzials der Neurowissenschaften in diesem Kontext soll mit der Darstellung einiger Forschungsarbeiten zur Lokalisation kognitiver Funktionen im Gehirn beginnen.

Die Idee, dass verschiedene auf psychologischer Ebene differenzierbare Prozesse eine relativ eindeutige Entsprechung im Gehirn haben müssen, geht vorwiegend auf die Ergebnisse aus Verhaltensbeobachtungen von Patienten mit Hirnschädigungen zurück. Paul Broca etwa berichtete in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts von einem Patienten, der aufgrund einer Läsion im linken Frontallappen für immer die Fähigkeit verloren hatte zu sprechen. Karl Wernicke beobachtete bei Verletzungen von Teilen des linken Temporallappens massive Beeinträchtigungen des Sprachverstehens. Diesen Berichten folgte eine Flut von weiteren Forschungsarbeiten (vgl. Marshall & Fink, 2003), in denen zum Beispiel visuell-räumliche Fähigkeiten den rechten posterioren Kortexarealen (Jackson, 1876), visuelle Informationsverarbeitung dem Okzipitallappen (Lissauer, 1890) oder Gedächtnisleistungen dem medialen Temporallappen (Alzheimer, 1907) zugeschrieben wurden. Die Befunde aus Läsionsstudien sowie aus Studien mit elektrischen Stimulationen von Kortexarealen während chirurgischer Eingriffe (z.B. Penfield & Jasper, 1954) resultierten in der Erstellung funktionaler Landkarten des Gehirns, wie exemplarisch dargestellt wird.

Abbildung 4: Lokalisation psychischer Funktionen im Gehirn nach Polyak (1957, reproduziert von Savoy, 2001)



Vergleicht man diese historische Karte mit aktuellen Befunden aus bildgebenden Verfahren, wird man in vielen Bereichen Übereinstimmungen feststellen. Man betrachte beispielsweise die Lokalisation jenes Phänomens, das in der Abbildung als „intellect“ im präfrontalen Kortex lokalisiert ist, und denke an die weiter oben zitierten Befunde von Duncan et al. (2000), welche auf Basis der Ergebnisse einer elaborierten PET-Studie allgemeine Intelligenz (g) im lateralen präfrontalen Kortex verortet haben. Ebenso finden sich bereits Zuordnungen von Sprachprozessen zu frontalen und temporalen Regionen, visuellen Informationsverarbeitungsprozessen zu okzipitalen Regionen oder motorischen Funktionen zu zentralen Arealen (motorischer Kortex). Die meisten dieser Assoziationen zwischen verschiedenen Regionen und psychischen Prozessen haben bis heute Gültigkeit und finden sich in aktuellen Darstellungen zu den Funktionen verschiedener Gehirnabschnitte wieder (Nichols & Newsome, 1999; Savoy, 2001). Es ist allerdings fraglich, ob man alle psychischen Prozesse und Funktionen in eine funktionale Topographie einbetten kann oder ob möglicherweise beträchtliche Unterschiede in der Lokalisierbarkeit zwischen basalen Funktionen (z.B. Farbwahrnehmung, motorischen Prozessen) und höheren kognitiven Funktionen existieren, sei es bei der Gliederung dieser Funktionen nach Inhaltmaterial (verbal, numerisch, figural, räumlich) oder nach involvierten kognitiven Prozessen (Aufmerksamkeit, Gedächtnis, schlussfolgerndes Denken etc.). Auf Grundlage der aktuellen Befunde kann eine Erweiterbarkeit dieses „Schrankmodells“, in dem jede Funktion in einer spezifischen „Schublade“ an einem spezifischen Ort zu finden ist, in Zweifel gezogen werden. Selbst die Zuschreibung bestimmter zentral-exekutiver Funktionen zu topographisch eng um-

grenzten Abschnitten des präfrontalen Kortex reflektiert vielmehr die Beobachtung einer systematischen Beteiligung dieser Areale an unterschiedlichen Anforderungen als die Tatsache, dass nur diese Areale während der Bearbeitung von Arbeitsgedächtnisaufgaben aktiviert sind (vgl. Collette & van der Linden, 2002). Nicht zuletzt wegen der starken Vernetztheit verschiedener Gehirnregionen (insbesondere jener des Frontalkortex) kann gegenwärtig davon ausgegangen werden, dass jedwede komplexe kognitive Leistung das (koordinierte) Zusammenspiel verschiedener Areale erfordert. Um diese Annahme zu veranschaulichen sei auf die umfangreiche Übersichtsarbeit von Cabeza und Nyberg aus dem Jahr 2000 hingewiesen, welche in Fortführung eines Review-Artikels aus dem Jahr 1997 die Ergebnisse von insgesamt 275 PET- und fMRT-Studien zu unterschiedlichen kognitiven Funktionen aggregiert haben, um Hinweise auf idiosynkratische Aktivierungsmuster zu erhalten. Im Besonderen enthielt dieser Bericht Studien zu Aufmerksamkeit, Wahrnehmung, Vorstellung, Sprache, Arbeitsgedächtnis, Priming, semantischem, episodischem und prozeduralem Gedächtnis, wobei die kumulierten Ergebnisse einerseits nach den untersuchten kognitiven Funktionen und andererseits nach der Bedeutung verschiedener Gehirnregionen für kognitive Leistungen dargestellt wurden. Wenngleich offensichtliche Übereinstimmungen in den Aktivierungsmustern zwischen verschiedenen Studien zur gleichen kognitiven Funktion gefunden wurden, ließen sich diese nur auf einem sehr allgemeinen topographischen Niveau zusammenfassen: Aktivierungen während Aufmerksamkeits- und Arbeitsgedächtnisaufgaben wurden vorwiegend in präfrontalen und parietalen Regionen beobachtet, Sprache und semantischer Gedächtnisabruf schienen vor allem linke präfrontale und temporale Areale zu beanspruchen, episodische Enkodierung war von linken präfrontalen und medial-temporalen Aktivierungen begleitet, während beim Abruf episodischer Informationen präfrontale, medial-temporale und posteriore Regionen aktiv waren etc. Besonders hervorhebenswert erscheinen die deutlichen Überlappungen von aktivierten Gehirnregionen während unterschiedlicher kognitiver Aufgaben. Die Autoren berichten zum Beispiel von der dorsoparietalen Region BA 7, die in konsistenter Form in Studien zu Aufmerksamkeit, räumlicher Wahrnehmung, räumlichem Vorstellungsvermögen, Arbeitsgedächtnis, episodischem und prozeduralem Gedächtnis aktiv war, was in den von Cabeza und Nyberg zitierten Studien meist im Kontext des Untersuchungsgegenstands interpretiert wurde: als Region für Aufmerksamkeitsprozesse im Rahmen von Aufmerksamkeitsstudien, als Region für Wahrnehmungsprozesse in Studien zur räumlichen Wahrnehmung, als Arbeitsgedächtnisareal in Arbeitsgedächtnisstudien. Als anderes Beispiel für die uneindeutige Korrespondenz zwischen einer kognitiven Funktion und einer Gehirnregion kann die Befundlage zum Broca-Areal (BA 44) angeführt werden, welche Marshall und Fink (2003) wie folgt zusammenfassten: Dieses Areal spiele nicht nur eine Rolle bei der Sprachproduktion, sondern auch bei syntaktischer Sprachverarbeitung, Verarbeitung von syntaktischen musikalischen Strukturen, bei Rhythmuswahrnehmung, bei der Vorstellung von Bewegungsverläufen sowie bei visuell-räumlichen Fertigkeiten. Unter anderem liegen zwei Schlussfolgerungen nahe: (1) Offenbar haben die auf psychologischer Ebene differenzierbaren kognitiven Funktionen und Prozesse deswegen keine eindeutige neuronale Entsprechung, weil sie auf einem anderen Abstraktionsniveau angesiedelt sind als die neuronalen

Informationsverarbeitungsprozesse im Gehirn. Es müsste somit untersucht werden, welche Gemeinsamkeiten die korrelierenden kognitiven Anforderungen aufweisen, um Erkenntnisse über die Funktion einer distinkten Gehirnregion gewinnen zu können (Cabeza & Nyberg, 2000). Aus einer bestimmten Aktivierungskonfiguration könnte dann auf eine kognitive Funktion geschlossen werden. (2) Möglicherweise kann ein und dasselbe Gehirnareal als Teil eines Netzwerks in Abhängigkeit von den anderen aktivierten Regionen unterschiedliche Funktionen annehmen (der neurale Kontext bestimme die kognitive Funktion, vgl. McIntosh, 2000), sodass die Zuschreibung von Funktionen zu Aktivierungsmustern zu Gunsten einer tiefer gehenden Auseinandersetzung mit Interaktionen zwischen Gehirnarealen abgelöst werden müssten. Beide Annahmen scheinen plausibel und sind Gegenstand aktueller Forschungsbemühungen.

Auch wenn die spezifische Funktion einzelner Gehirnareale während verschiedener Aufgaben noch ungeklärt ist und die kognitiv-funktionale Differenzierung neurophysiologischer Aktivierungsmuster gegenwärtig lediglich auf einem verhältnismäßig allgemeinen Niveau vorgenommen werden kann, liefern die aktuellen Befunde dennoch Hinweise auf mögliche Anwendungsperspektiven bildgebender Verfahren als Methoden zur Identifikation kognitiver Prozesse. Gewiss kann auf Basis von Aktivierungsmustern nicht bestimmt werden, ob eine Person an ein Haus oder an ein Gesicht denkt (vgl. Haxby et al., 2001) oder welche Assoziationen beim Lesen eines Textes auftreten – allerdings sprechen die Ergebnisse dafür, dass zumindest bestimmte Informationsverarbeitungsstrategien von anderen abgegrenzt werden können. Dies gilt im Besonderen für Strategien, die unterschiedliche mentale Repräsentationsformen (wie z.B. verbal vs. visuell-räumlich) involvieren. So demonstrierten Reiche et al. (2000) in einer fMRT-Studie relativ eindeutige Zusammenhänge zwischen den bei einer kognitiven Aufgabenbearbeitung angewandten Strategien und bestimmten Gehirnaktivierungsmustern. Als Untersuchungsaufgabe kam die Satz-Bild-Verifikationsaufgabe zum Einsatz („Sentence-Picture-Verification-Task“; Carpenter & Just, 1975), bei der den Probanden zunächst ein Satz dargeboten wird, der eine Relation von Symbolen beschreibt (z.B. „Es stimmt nicht, dass der Stern über dem Plus ist.“). Im Anschluss daran wird ein Bild eingeblendet, welches entweder mit dem zuvor dargestellten Sachverhalt übereinstimmt (das Plus über dem Stern) oder nicht (der Stern über dem Plus). Die Aufgabe der Probanden ist es, so schnell wie möglich zu entscheiden, ob der Satz mit dem Bild übereinstimmt oder nicht, ihn also zu verifizieren oder zu falsifizieren. Vor Messung der Gehirnaktivierung wurden die Probanden trainiert, diese Aufgabe unter Zuhilfenahme einer verbalen (ohne Bildung einer visuellen Vorstellung) und einer visuellen Strategie (mit expliziter Anweisung, ein mentales Bild zu generieren) zu lösen. Es zeigte sich, dass bei Verwendung der verbalen im Vergleich zur visuellen Strategie unter anderem eine deutlich stärkere Aktivierung in linken anterioren Regionen zu beobachten waren (Broca'schen Sprachzentrum), während die visuelle Strategie zu stärkerer parietaler Aktivierung (bilateral) führte. Mittels Berechnung der Aktivierungsdifferenz zwischen Broca'schem Sprachzentrum und dem linken parietalen Kortex konnte überdies die von einem Probanden verwendete Strategie in 10 von 12 Fällen korrekt identifiziert werden.

Die Abgrenzung verbaler Informationsverarbeitung, welche üblicherweise mit frontaler Aktivierung in der linken Hemisphäre einhergeht (vgl. auch die

Befunde zur Lokalisation der phonologischen Schleife weiter oben), von visuell-räumlichem Denken, primär lokalisiert über parietalen Regionen, rechts- oder beidhemisphärisch (vgl. auch Vogel et al., 2003), ist mittlerweile gut belegt und könnte einen Ausgangspunkt für die Anwendung bildgebender Verfahren in der Lehr-Lern-Forschung darstellen. In diesem Kontext wäre etwa an die Untersuchung von verschiedenen Strategien bei Mathematikleistungen zu denken. Mathematische Probleme können auf unterschiedliche Arten gelöst werden. Im einfachsten Fall (z.B. bei der Aufgabe  $2 \times 6$ ) reicht es aus, die Lösung einfach aus dem Gedächtnis abzurufen, was mit der Aktivierung sprachlicher, linksfrontaler Regionen assoziiert wird (Dehaene, 1997). Komplexere mathematische Aufgaben erfordern hingegen nicht nur eine bewusste und zielgerichtete Informationsmanipulation (und damit einen stärkeren Einbezug von zentral-exekutiven, präfrontalen Gehirnregionen), sondern auch die Anwendung einer konkreten Lösungsstrategie, welche überwiegend verbale oder überwiegend visuell-räumliche Repräsentationen umfassen kann. Die Differenzierung dieser beiden Strategien auf neurophysiologischer Ebene könnte Aufschlüsse darüber liefern, wie bei der Bearbeitung bestimmter Aufgaben vorgegangen wird. Der zusätzliche Aufwand des Einsatzes neurowissenschaftlicher Methoden würde sich vor allem dann lohnen, wenn diese Unterscheidung auf Verhaltensebene nicht oder nur unzureichend getroffen werden kann, etwa wenn Personen unter Anwendung verschiedener Strategien vergleichbare Leistungen erbringen. In einer kürzlich veröffentlichten Studie mit College-Studenten berichten Sohn et al. (2004) von den Auswirkungen unterschiedlicher Repräsentationsformate bei äquivalenten mathematischen Problemen auf die Aktivierungsmuster der Probanden. Sie gaben Rechenaufgaben in zwei Komplexitätsstufen vor, die entweder sprachlich eingebettet waren (z.B. „Brian erhält pro Stunde \$ 7 Lohn und \$ 9 Trinkgeld. Wie viel verdient er in 3 Stunden?“) oder nur mit Hilfe mathematischer Formeln dargestellt wurden (z.B. „ $7H + 9 = E$ ,  $H = 3$ ,  $E = ?$ “). Die Leistungen der Studenten, gemessen über Reaktionszeit und Lösungsrate, unterschieden sich nicht in Abhängigkeit vom Repräsentationsformat, wohl aber die Aktivierungsmuster im Gehirn. Die verbal präsentierte Aufgabe führte im Gegensatz zur symbolischen Repräsentation zu Aktivierungszunahmen im linken präfrontalen Bereich, während bilaterale parietale Regionen nur bei der nonverbalen Darstellungsform signifikante Aktivierungszunahmen zeigten. „Behavioral equivalence, therefore, does not necessarily imply neural equivalence.“ (Sohn et al., S. 1194)

Eine stärkere Aktivierung relativ zu einer anderen Gehirnregion könnte somit durchaus Rückschlüsse auf komplexe kognitive Prozesse bzw. Strategien ermöglichen, sowohl im Vergleich verschiedener Gruppen (Sohn et al., 2004) als auch auf Individualebene (Reichle et al., 2000). Bislang ist noch ungeklärt, ob sich die Differenzierung verschiedener Strategien auf neurophysiologischer Ebene bei einfacheren Aufgaben ebenso gut vornehmen lässt wie bei schwierigeren Aufgaben, muss man doch davon ausgehen, dass unterschiedlich komplexe Aufgaben nicht nur zur Beteiligung verschiedener Gehirnregionen führen können (z.B. stärkere Beteiligung präfrontaler Regionen bei komplexeren mathematischen Problemen im Vergleich zu einfachem Gedächtnisabruf), sondern auch, dass die Höhe der Aktivierung insgesamt dadurch mitbestimmt wird. Wie stark ein Gehirn bei einer Aufgabe aktiviert wird, ist darüber hinaus immer eine

Funktion der individuellen Fähigkeiten, welche einerseits die allgemeine kognitive Leistungsfähigkeit (im Sinne einer allgemeinen Intelligenz) und andererseits das inhaltspezifische Vorwissen umfassen. Je intelligenter eine Person ist, je besser sie gelernt hat Probleme einer bestimmten Art zu lösen bzw. je mehr Vorwissen sie bei der Lösung des Problems einsetzen kann, desto geringer wird die kognitive und neurophysiologische Aktivierung vermutlich ausfallen. Die Tatsache, dass (erfolgreiches) Lernen zu Aktivierungsveränderungen im Gehirn führt, ist nicht nur allgemein bekannt, sondern bildet zugleich auch einen weiteren Ansatzpunkt für die Einbettung neurowissenschaftlicher Methoden in der psychologischen Forschung. Wenn Lernprozesse mit charakteristischen, womöglich auch topographischen Aktivierungsveränderungen einhergehen, könnten diese genauso als „Marker“ für den Fortschritt beim Lernprozess eingesetzt werden wie Aktivierungskonfigurationen für die Identifikation von Lösungsstrategien.

## 8. Aktivierungsveränderungen durch Lernen

Ein zentrales Charakteristikum von vielen Lernprozessen wurde bereits im Kontext des Arbeitsgedächtnismodells von Baddeley angeführt: der Übergang von kontrollierter zu automatisierter Informationsverarbeitung. Ist man am Beginn des Lernvorgangs mit einer bestimmten Aufgabe konfrontiert, wird die Lösung derselben in der Regel eine intensive und bewusste Auseinandersetzung erfordern, welche mit zunehmender Fähigkeit und Fertigkeit nur noch in geringerem Ausmaß notwendig sein wird. Dieses subjektiv gut zugängliche Phänomen lässt sich in verschiedenen Domänen beobachten und kann als eine zentrale Form kognitiver Veränderungen auf hoher Abstraktionsebene betrachtet werden. Besonders gut scheint sich dieses Konzept bei der Untersuchung von neurophysiologischen Veränderungen anwenden zu lassen, da es mit aktuellen Arbeitsgedächtniskonzeptionen (z.B. Baddeley, 2003b) in Einklang steht, in denen eine kontrollierte Informationsverarbeitung mit einer starken Beteiligung der zentralen Exekutive in Verbindung gebracht wird (Engle et al., 1999). Angesichts der mittlerweile umfangreichen Befundlage, dass zentral-exekutive Prozesse in anterioren (im Besonderen in präfrontalen) Gehirnregionen ablaufen, läge es somit nahe, Veränderungen von Lernprozessen im Sinne einer Automatisierung unter anderem in diesem weitgehend inhaltsunspezifisch agierenden Teil des Gehirns zu untersuchen. Je mehr kontrollierte Informationsverarbeitung erforderlich ist, desto stärker sollte die zentrale Exekutive beteiligt sein und desto stärker sollten ihre neuronalen Korrelate in Anspruch genommen werden. Ein weiterer Vorteil dieses Konzepts besteht darin, dass es auch auf unterschiedliche Zeiträume anwendbar ist (vgl. auch Posner & DiGirolamo, 2000). Das Üben einfacher kognitiver Aufgaben führt in der Regel innerhalb kurzer Zeit (im Minutenbereich) zu einem gewissen Grad an Automatisierung, während komplexe kognitive Anforderungen, wenn überhaupt, erst nach längeren Lernprozessen teilweise automatisiert ablaufen.

Im Großteil der derzeit vorliegenden neurophysiologischen Studien zu Lernprozessen wurde der Schwerpunkt auf eher kurze Zeitintervalle bzw. Lernphasen gelegt. Nur wenige Untersuchungen beschäftigten sich explizit mit den möglichen Auswirkungen von längerfristigem Lernen, was unter anderem in ökonomischen Faktoren und einer geringeren internen Validität derartiger Untersuchungsdesigns begründet ist (vgl. Haier, 2001). Allerdings sind es gerade Lernprozesse dieser Art, welche für die Lehr-Lern-Forschung von Relevanz sind, eignet man sich doch zum Beispiel eine Fremdsprache weder innerhalb von Minuten noch innerhalb von Tagen an. Exemplarische Befunde für die neuronalen Korrelate von Lernen in beiden Zeiträumen werden infolge vor dem Hintergrund dreier Fragestellungen dargestellt: (1) Wie verändert sich das Aktivierungsausmaß infolge von Lernprozessen? (2) Wie verändert sich das topographische Aktivierungsmuster infolge von Lernprozessen? (3) Womit korrelieren die Aktivierungsveränderungen?

Die erste Fragestellung kann auf Basis von Befunden aus neurophysiologischen Studien vergleichsweise gut beantwortet werden. Wie nicht anders zu erwarten, führt Lernen (im Sinne von Automatisierung) in der Regel zu einer Abnahme der Aktivierung in mehreren Gehirnregionen (z.B. Andreasen et al.,

1995a, 1995b; Haier et al., 1992a; Risberg et al., 1977; Vandenberghe et al., 1995; vgl. auch Haier, 2001 für teilweise gegenläufige Befunde). Besonders eindrucksvoll war dies in einer Studie von Haier et al. (1992a) ersichtlich, in welcher acht Männer über einen Zeitraum von 4 bis 8 Wochen das wohlbekannte Computerspiel „Tetris“ trainierten, das hohe Anforderungen an die visuell-räumliche Informationsverarbeitungsfähigkeit stellt. Das Training fand mindestens 5-mal pro Woche statt und führte zu einer Versiebenfachung der Anfangsleistung im Spiel (im Durchschnitt von ca. 11 auf ca. 80 Linien). Vor und nach dem Training wurden PET-Messungen durchgeführt, in der das Ausmaß der Gehirnaktivierung (bzw. des Glukosemetabolismus) während des Spiels gemessen wurde. In beinahe allen erfassten kortikalen Regionen (am stärksten parietal) zeigte sich während der zweiten Messung eine deutlich geringere Aktivierung als während der ersten Messung vor dem Training. Das Training bedingte somit eine Abnahme der Gehirnaktivierung in verschiedenen Regionen. Obwohl dieser Befund unter der Vorstellung einer zunehmenden Automatisierung höchst plausibel erscheint, kann hinterfragt werden, wie mit weniger Aktivierung grundsätzlich eine bessere Leistung erzielt werden kann. Eine mögliche Antwort lautet: durch Steigerung der neuralen Effizienz: „We believe that during the first attempts at playing the game, the subjects are trying out many different cognitive strategies for the task, thus using many different brain circuits involving varied brain areas. After much practice, it is likely that subjects have developed a set strategy for performance of the task and thus use fewer brain circuits and/or fewer neurons per circuit with the resulting less overall brain activity.“ (Haier et al., S. 142). Tatsächlich liegt derzeit eine umfangreiche Befundlage vor, wonach bessere Leistungen mit einer geringeren Gehirnaktivierung einhergehen (z.B. Grabner et al., 2004; Haier, 2003; Neubauer et al., 1995), was die Annahme von effizienter Aktivierung als eine Grundlage guter Leistungen plausibel erscheinen lässt. Effiziente Gehirnaktivierung bedeutet jedoch nicht, dass alle Gehirnregionen bei der Aufgabenbearbeitung weniger aktiv sind, sondern dass die Aktivierung bedarfsgerecht erfolgt: Jene Areale, welche für die Aufgabenbearbeitung erforderlich sind, sollten eine adäquate Aktivierung aufweisen, während aufgabenirrelevante Regionen nur schwach aktiviert oder sogar deaktiviert sind (vgl. für eine ähnliche Befundlage Olesen et al., 2004). Der Schlüssel zu effizienter Gehirnaktivierung scheint somit in der topographischen Aktivierungsverteilung zu liegen, die möglicherweise ein Resultat von erfolgreichen Lernprozessen darstellen kann.

Vergleicht man verschiedene neurophysiologische Lernstudien, scheint die Frage nach topographischen Aktivierungsveränderungen infolge von Lernprozessen weniger eindeutig beantwortet werden zu können (Haier, 2001). Auf Basis der eingangs erwähnten Vorstellungen der unterschiedlichen Beteiligung zentral-exekutiver Prozesse während des Lernvorgangs wäre sicherlich zu erwarten, dass am Beginn einer Lernphase vorwiegend diese Regionen beansprucht werden, während sich der Aktivierungsschwerpunkt mit zunehmendem Lernerfolg von präfrontalen Regionen hin zu den bei einer Aufgabe relevanten Gehirnregionen verlagern sollte. Tatsächlich liegen in der Literatur Befunde für eine solche Aktivierungsverlagerung vor, welche mit dem idealtypischen Terminus „anterior-posterior-shift“ bezeichnet wird. In der Studie von Habib et al. (2000) lernten die Probanden über fünf Lern- und Testphasen hinweg, be-

stimmte Wörter in Wortpaaren zu identifizieren. Beim ersten Durchgang fanden die Autoren signifikante Korrelationen der Aktivierung von links-präfrontalen und medial-temporalen Regionen mit der Diskriminationsleistung. Beim fünften und letzten Durchgang wurden keine Zusammenhänge mehr mit präfrontaler Aktivierung beobachtet, hingegen deutliche Zusammenhänge mit der Aktivierung in den Basalganglien und im temporalen Kortex – Regionen, welche eng mit Gedächtnisprozessen in Zusammenhang gebracht werden (vgl. Gabrieli, 1998). In anderen Studien wurde ebenso von Aktivierungsverlagerungen von eher aufgabenirrelevanten Gehirnregionen zu Beginn des Lernprozesses hin zu den eigentlich erforderlichen Arealen berichtet (z.B. Petersen et al., 1998; Raichle et al., 1994; Sakai et al., 1998), wiewohl sich diese Veränderungen nicht immer mit dem Muster eines einfachen „anterior-posterior-shifts“ beschreiben ließen. So plausibel derartige Befunde auch klingen mögen, nicht immer fanden sich eindeutig interpretierbare Aktivierungsveränderungen als Resultat eines Lernprozesses, in manchen Fällen kam es zu generellen Abnahmen (wie etwa in der oben zitierten Studie von Haier et al., 1992a), in anderen sogar zu generellen Zunahmen (z.B. Grafton et al., 1992). Neben den aufgrund methodischer Aspekte bestehenden Einschränkungen in der Aussagekraft mancher Studien (z.B. Stichprobengröße, Wahl der Referenzbedingung für die Subtraktionsanalyse, Beschränkung der Analyse auf „regions of interest“), könnte die Ursache für die inkonsistente Befundlage auch in der Nichtbeachtung interindividueller Unterschiede vermutet werden. Spätestens nach der Untersuchung der ersten beiden Probanden sollte ersichtlich sein, dass solche Unterschiede sowohl auf neuroanatomischer als auch neurophysiologischer Ebene bestehen (Haier, 2001), was in vielen neurowissenschaftlichen Studien primär als ungewünschte Störvariable bzw. als Fehlervarianz angesehen wurde, wodurch die eigentlich interessierenden Effekte nur verschleiert werden. Zugleich ist es jedoch denkbar, dass solche Unterschiede durchaus das Potenzial haben, Aufschlüsse über die Natur von Lernprozessen zu ermöglichen, vor allem, wenn derartige Unterschiede in irgendeiner Form mit psychologischen Variablen (wie etwa der in verschiedenem Grad ausgeprägten kognitiven Leistungsfähigkeit) in Zusammenhang stehen.

Pionierarbeit bei der Untersuchung von psychologischen Korrelaten neurophysiologischer Aktivierungsmuster bzw. -veränderungen hat wiederum die Forschungsgruppe um den amerikanischen Psychiater Haier mit der bereits dargestellten Tetris-Lernstudie geleistet (Haier et al., 1992a). Angesichts der Beobachtung von Aktivierungsabnahmen als Resultat des mehrwöchigen Trainings interessierten sie sich dafür, ob dieses neurophysiologische Korrelat des Lernens möglicherweise auch indikativ für den Lernerfolg ist, und korrelierten daher das Ausmaß der Aktivierungsabnahme von Prä- zu Posttests mit der Leistungssteigerung. In allen untersuchten Gehirnregionen wurden substantielle Zusammenhänge gefunden, in dem Sinne, dass diejenigen Personen mit der größten Leistungssteigerung die stärksten Aktivierungsabnahmen aufwiesen. Der Lernerfolg bildete sich direkt in der Aktivierungsabnahme ab. In einer zweiten Analyse der in der Tetris-Studie gewonnenen Daten (Haier et al., 1992b) gingen sie zudem der Frage nach, welche Personen auf neurophysiologischer Ebene am stärksten von dem Training profitierten bzw. ihr Gehirn während der zweiten PET-Messung am wenigsten aktivieren mussten, und setzten dazu

die Aktivierungsveränderung mit psychometrisch erfassten Intelligenzindikatoren in Beziehung. Es zeigten sich wiederum substantielle Korrelationen mit der Aktivierungsabnahme in vielen Gehirnregionen (im Besonderen in frontalen Arealen): Die intelligenteren Probanden konnten ihre neurale Effizienz signifikant stärker steigern als die weniger intelligenten Personen. Dieser Befund konnte auch in einer jüngst veröffentlichten Studie von Neubauer et al. (2004), in welcher ein 20-minütiges Training zum schlussfolgernden Denken administriert wurde, repliziert werden. Auch in dieser Studie zeigten sich substantielle Korrelationen von Aktivierungsabnahmen und Intelligenz, erneut mit den stärksten Zusammenhängen in frontalen Gehirnregionen.

Versucht man ein Zwischenresümee über die bisher dargestellten Befunde zu ziehen, lässt sich festhalten, dass (a) Lernprozesse in der Regel mit einer Abnahme von Aktivierung in bestimmten Gehirnregionen einhergehen, (b) in manchen Fällen eine Aktivierungsverlagerung (Abnahme in manchen, Zunahme in anderen Arealen) beobachtet werden kann und (c) die neurophysiologischen Veränderungen in Zusammenhang mit interindividuellen Unterschieden (Lernerfolg, Intelligenz) stehen können. Diese Aussagen scheinen zumindest eine gewisse Gültigkeit für Aktivierungsveränderungen infolge von eher kurzzeitigen Lernprozessen zu haben, welche in den oben zitierten Studien im Vordergrund standen. Die Frage ist nun, ob es empirische Hinweise darauf gibt, dass sich diese Ergebnisse auch für längerfristige, ökologisch validere Lernphasen generalisieren lassen oder lediglich Ausdruck von Automatisierungen einfacher kognitiver Aktivitäten sind.

Unglücklicherweise liegen jedoch nur wenige Studien vor, die Rückschlüsse auf die Auswirkungen längerfristigen Lernens auf neurophysiologische Veränderungen erlauben. Längsschnittstudien in kontrollierten Lernumgebungen mit wiederholten Messzeitpunkten beispielsweise fehlen nach Kenntnis des Autors völlig, sodass die Ergebnisse von Studien mit alternativen methodischen Zugangsweisen herangezogen werden müssen. In den meisten Fällen bestand diese Zugangsweise im Vergleich von Personen, welche über einen längeren Zeitraum (in der Regel von Jahren) eine bestimmte kognitive Kompetenz erworben haben, mit Personen ohne diese Kompetenz. Im Rahmen der Expertiseforschung beschäftigten sich beispielsweise Volke et al. (2002) mit der Fragestellung, worin auf neurophysiologischer Ebene der Unterschied zwischen Schachexperten und -novizen bei der Bearbeitung von Schachaufgaben besteht. Sie stellten fest, dass (1) die Experten zur Lösung der Schachaufgaben vorwiegend posteriore Areale aktivierten, während bei den Novizen eher anteriore Gehirnregionen beansprucht wurden, und dass (2) die einzelnen Gehirnareale bei den Experten eine größere Aktivierungskohärenz aufwiesen als bei den Novizen. Beide Befunde wurden von Autoren als Hinweis auf eine höher automatisierte und kortikal effizientere Aufgabenbearbeitung der Experten als Resultat längerfristigen Trainings interpretiert (vgl. auch Grabner et al., 2003, zu einer ähnlichen Befundlage bei Taxifahrern). Interpretationen dieser Art sind allerdings nicht völlig schlüssig, da nur neurophysiologische (oder auch neurostrukturelle, vgl. Maguire et al., 2000) Unterschiede zwischen verschiedenen Gruppen betrachtet werden und keine Befunde dafür vorliegen, dass sich die Personen nicht bereits vor der Lernphase oder dem Training in zahlreichen Variablen unterschieden, die für die neuronalen Parameter Relevanz haben könnten. Des

Weiteren beschäftigten sich Studien dieser Art nicht mit schulrelevanten Lernsituationen, sondern mit spezifischen Expertenstichproben, sodass die Generalisierbarkeit der Befunde auch in dieser Hinsicht fraglich ist. In Bezug auf die Auswirkungen von schulischem Lernen scheinen gegenwärtig noch weniger Befunde vorzuliegen als zu den Expertenstichproben. Eine hervorhebenswerte Ausnahme bildet eine PET-Studie von Castro-Caldas et al. (1998), welche die Gehirnaktivierungsmuster von Analphabeten mit jenen von Personen verglichen, die des Lesens und Schreibens kundig sind. Zu diesem Zweck rekrutierten sie insgesamt 18 ältere Frauen aus Portugal, welche alle in demselben Dorf aufgewachsen waren. Die beiden Personengruppen (12 Analphabeten vs. 6 Alphabeten) kamen dadurch zu Stande, dass es für die Familien dieser Region vor einigen Jahrzehnten aus ökonomischen Gründen nicht möglich war, alle Kinder zur Schule zu schicken – die älteste Tochter jeder Familie musste sich stattdessen schon sehr früh um den Haushalt kümmern, während die jüngeren Töchter die Schule besuchen konnten. Daher waren die Analphabeten und Alphabeten im Hinblick auf eine Reihe von Merkmalen vergleichbar, stammten sie doch aus dem gleichen soziokulturellen Umfeld, teils sogar aus der gleichen Familie. Aus früheren Studien zur Alphabetisierung hatte man mehrere Aufgaben zur Verfügung, von denen man wusste, dass sie sensitiv für die Unterscheidung dieser beiden Personengruppen sind. Eine dieser einfachen Aufgaben besteht beispielsweise im Nachsprechen von realen (z.B. „Banane“) und Pseudowörtern (z.B. „Bonine“). Lese- und Schreibkundige haben mehrere kognitive Systeme zur Verfügung, um diese Aufgabe zu bewältigen: Sie können Wörter sowohl mit ihrem Wortschatz in Verbindung bringen und sich auf diese Weise einprägen (semantisch-lexikalische Verarbeitung) und/oder sie prägen sich das Wort phonologisch ein, stellen sich also das der Lautfolge entsprechende Wort vor. Analphabeten hingegen verfügen über letztere Möglichkeit nicht, da die einzelnen Laute nicht mit Buchstaben in Verbindung gebracht werden können, die graphemisch-phonemische Korrespondenz fehlt. Dieser Unterschied tritt insbesondere dann auf, wenn Pseudowörter reproduziert werden sollen, da die Analphabeten sich bei diesen nicht mehr auf ihr Vorwissen, ihren Wortschatz, beziehen können, während bei der Speicherung von realen Wörtern diese Strategie für beide Personengruppen möglich und sinnvoll ist. Wie sahen nun die Ergebnisse dieser Studie aus? Auf der Verhaltensebene war die Anzahl der richtig reproduzierten realen Wörter für beide Gruppen weitgehend vergleichbar (98 % vs. 92 % richtige bei den Alphabeten vs. Analphabeten). Bei den Pseudowörtern reproduzierte die Alphabetengruppe im Durchschnitt nur 33 Prozent richtige, während die Analphabeten 84 Prozent korrekte Antworten erreichten. In einer Fehleranalyse zeigte sich, dass die Analphabeten hauptsächlich Verwechslungsfehler machten, das heißt ein ähnlich klingendes sinnvolles Wort anstatt des Pseudowortes wiederholten. Diese Ergebnisse konnten auf Basis früherer Befunde erwartet werden und stellten somit nichts Neues dar. Neu war hingegen, dass sich diese Unterschiede auch in den Gehirnaktivierungsmustern widerspiegelten. Während die vergleichbare Leistung der beiden Gruppen bei den realen Wörtern mit vergleichbaren Aktivierungsmustern einhergingen (es wurde primär ein Netzwerk von parietalen Hirnregionen aktiviert), unterschieden sich die Analphabeten von den Alphabeten nicht nur in der Leistung bei den Pseudowörtern, sondern beanspruchten zur Lösung dieser

Aufgabe auch unterschiedliche Gehirnregionen. Insbesondere aktivierten sie eine Region im rechten Frontallappen besonders stark, welche bei den Alphabeten nicht aufleuchtete; eine Region, die in der Regel nicht mit Sprachverarbeitung in Verbindung gebracht wird. Die Autoren interpretierten diesen Befund als Indikator dafür, dass bei den Analphabeten das entsprechende funktionelle Netzwerk zur phonologischen Enkodierung fehlt, weswegen sie ein „general-purpose support system“ im Frontallappen bei der Lösung der Aufgabe einsetzen.

## 8.1 Fazit

Jede komplexe kognitive Leistung verlangt, unabhängig von der Inhaltsdomäne, dass Informationen zielgerichtet manipuliert werden. Diese Manipulation wird durch ein Netzwerk verschiedener Gehirnregionen ermöglicht, wobei präfrontale Gehirnregionen vermutlich eine steuernde Funktion einnehmen, die sich auf kognitiver Ebene mit zentral-exekutiven Prozessen in Verbindung bringen lässt. Welche Funktionen andere Gehirnregionen als Teil des Netzwerks bei einer bestimmten kognitiven Anforderung spielen, ist noch nicht gänzlich geklärt, vielmehr zeigen die aktuellen Befunde aus Studien mit bildgebenden Verfahren starke Überlappungen in den Aktivierungsmustern, sodass kognitive Funktionen im Gehirn in der Regel nicht eindeutig verortet werden können. Von besonderem Interesse für die Lehr-Lern-Forschung ist natürlich die Frage nach den neuronalen Grundlagen menschlichen Lernens, der Veränderung von Verhalten und Erleben durch Erfahrungen (vgl. Rösler, 2005). Diese Lernprozesse – wie auch die distinkten kognitiven Funktionen selbst – lassen sich auf unterschiedlichen biologischen Ebenen analysieren und beschreiben, von Änderungen in der intrazellulär ablaufenden Proteinsynthese über Umgestaltungen in der Verschaltung einzelner Neuronen bis hin zur Aktivität großer Neuronenverbände (vgl. Kap. 5 dieser Expertise). In dem vorigen Abschnitt wurde der Schwerpunkt ausschließlich auf die letztgenannte Analyseebene gelegt, da (1) die derzeit mittels aktueller bildgebender Verfahren errechneten Bilder des Gehirns bei seiner Arbeit genau dies abbilden und (2) angenommen werden könnte, dass psychische Phänomene, welche ein umfangreiches Zusammenspiel von neuronalen Netzwerken erfordern, womöglich am besten auf jener biologischen Ebene beschrieben werden können, die hinsichtlich ihrer Komplexität der Verhaltensebene am nächsten liegt (vgl. Rösler, 2005, und Kap. 3 dieser Expertise).

Die Darstellung von Korrespondenzen zwischen kognitiven Funktionen und Prozessen auf der Verhaltensebene und neurophysiologischen Phänomenen erhebt daher nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll lediglich an einer Handvoll Befunden demonstrieren, wo eine fruchtbare Zusammenführung von neurowissenschaftlicher Forschung und empirischer Lehr-Lern-Forschung angesetzt werden könnte. Aus diesen Ausführungen sollte ebenso ersichtlich geworden sein, dass die Erforschung der neuronalen Grundlagen kognitiver Funktionen im Allgemeinen und von Lernprozessen im Besonderen noch am Anfang steht, sowohl in Bezug auf die verfügbaren technischen Möglichkeiten als auch im Hinblick auf die Vorstellung von der Funktionsweise des

menschlichen Gehirns. Ein „Schrankmodell“ kognitiver Funktionen scheint auf Basis der Befundlage unangemessen und verdeutlicht, dass in diesem Zusammenhang neue Vorstellungen über die Funktionsweise des menschlichen Gehirns entworfen werden müssen. Forschungsbemühungen zu Zeitverlauf und Art der Interaktionen verschiedener Areale bei einer kognitiven Leistung erscheinen hier viel versprechend. Interessanterweise war es der Erfinder des bis heute erfolgreich eingesetzten Nummerierungssystems für einzelne Kortexareale, Korbinian Brodmann, welcher vor fast 100 Jahren bereits Folgendes anmerkte: „One cannot think of their taking place in any other way than through an infinitely complex and involved interaction and cooperation of numerous elementary activities. (...) in each particular case [these] supposed elementary functional loci are active in differing numbers, in differing degrees and in differing combinations. (...) Such activities are (...) always the result (...) of the function of a large number of suborgans distributed more or less widely over the cortical surface.“ (Brodmann, 1909, zitiert nach Raichle, 2003).

## 9. Das Dopaminsystem

Der Großteil der synaptischen Signalübertragung im menschlichen Zentralnervensystem erfolgt über die Ausschüttung von chemischen Botenstoffen, so genannten Neurotransmittern. Die Flexibilität und Plastizität dieser Art der Signalübertragung (Vermittlung erregender und hemmender Vorgänge, modulierbare Sensitivität der Synapsen) stellt eine Grundvoraussetzung für höhere Gehirnfunktionen dar, allen voran das Gedächtnis. Neben Neurotransmittern wie Noradrenalin oder Adrenalin wird das Dopamin häufig mit Gedächtnisprozessen assoziiert, das von Neuronen in bestimmten Gehirnregionen produziert wird. Dopaminerge Neuronen sind vorwiegend in zwei Arealen zu finden: (1) in der Substantia nigra, einem Teil des Hirnstamms, der seinen Namen dem dunklen Erscheinungsbild durch dicht gelagerte Neuronen verdankt, und (2) im ventralen Teil des sich ebenfalls im Hirnstamm befindlichen Tegmentums. Von diesen beiden Regionen ausgehend erstrecken sich verschiedene Dopaminbahnen, welche mit spezifischen Funktionen in Verbindung gebracht werden. Während die von der Substantia nigra zum dorsalen Striatum verlaufende Bahn vorwiegend mit Motorik in Verbindung gebracht wird (Parkinson-Patienten weisen eine massiv reduzierte Dopaminkonzentration in dem nigrostriatalen System auf), wird das mesokortikolimbische Dopaminsystem (Projektionen vom ventralen Tegmentum in limbische und kortikale Areale, unter anderem Nucleus accumbens, Amygdala, Hippocampus und präfrontaler Kortex) mit Motivations- und Gedächtnisprozessen in Verbindung gebracht (Wise, 2004). In mehreren Tierstudien (vgl. Schultz, 2002; Wise, 2004) stellte sich heraus, dass die dopaminergen Neuronen spezifische Reaktionen auf verschiedene Ereignisse zeigen. Der Großteil der Neuronen wird aktiviert, wenn Belohnungsreize in irgendeiner Form dargeboten werden (z.B. Nahrung oder Drogen), insbesondere dann, wenn diese Belohnung (teilweise) unerwartet auftritt. Bleibt eine erwartete Belohnung aus, wird die Aktivität der dopaminergen Neuronen gehemmt. Diese Reaktionen erwiesen sich nicht nur als bedeutsam für die Vermittlung von Glücksgefühlen im Rahmen von Suchterkrankungen, sondern auch für die Einspeicherung von Lerninhalten ins Gedächtnis (z.B. Stark & Scheich, 1997; Stark et al., 2004). Üblicherweise lernen bestimmte Tiere (in den meisten Fällen Ratten) im Sinne einer operanten Konditionierung, ein bestimmtes Verhalten zu zeigen, indem sie dafür belohnt werden (positive Verstärkung) oder indem eine erwartete Bestrafung ausbleibt (negative Verstärkung). Die mittlerweile empirisch gut belegte Annahme einer Schlüsselrolle des Dopaminsystems bei der Verarbeitung von Belohnungsreizen wurde aufgrund einzelner empirischer Befunde (z.B. der Beobachtung, dass auch neutrale oder aversive Stimuli zu dopaminergen Reaktionen führen können) jedoch in Frage gestellt (Ungless, 2004), was unter anderem auf die unterschiedlichen Zugangsweisen bei der Untersuchung dieser Reaktionen zurückgeführt werden konnte. In Tierexperimenten dominieren vor allem zwei Methoden: die Messung der elektrischen Aktivität der dopaminergen Neuronen mittels Einzelzelleableitungen (schnelle, kurz andauernde Reaktionen) und die direkte Erfassung der Dopaminausschüttung mittels Mikrokathedern (Mikrodialyse; schnell einsetzende, jedoch teilweise länger andauernde Veränderungen). In Tierexperimenten stellte sich überdies her-

aus, dass die Verabreichung von Dopamin-Antagonisten (chemische Substanzen, welche die Wirkung von Dopamin durch Blockierung der postsynaptischen Rezeptoren hemmen) wie zum Beispiel Neuroleptika den Verstärkungseffekt und damit den Konditionierungs- bzw. Lernerfolg reduzieren oder sogar aufheben kann (Wise, 2004). Im Gegensatz dazu fand man bei Erhöhung der dopaminergen Reaktionen (z.B. durch den Einsatz von Dopamin-Agonisten) eine Verbesserung des Lernerfolgs, auch wenn die Manipulation erst nach der Lernphase erfolgt. Letzteres Ergebnis trug auch zu der heute weit verbreiteten Vorstellung bei, dass die Festigung bzw. Konsolidierung neuer Gedächtnisspuren (bzw. der neu gelernten Inhalte) durch das dopaminerge System vermittelt und daher auch potenziert werden kann (vgl. auch Jay, 2003). Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass sich die bisherigen Ausführungen ausschließlich auf die Ergebnisse von Tierexperimenten stützen und „Lernen“ in erster Linie Konditionierungsprozesse umfasst, in welchen Stimulus-Belohnungs- oder Reaktion-Belohnungs-Assoziationen gebildet und eingespeichert werden, weswegen eine direkte Übertragbarkeit auf den Humanbereich in Frage gestellt werden kann. Natürlich müssen bei der Erforschung der Bedeutung dopaminergere Reaktionen bei psychischen Prozessen auch andere Methoden angewandt werden als in Tierexperimenten. Bei der Untersuchung an Menschen werden in erster Linie drei methodische Zugänge verfolgt: (1) Die Untersuchung von Patienten mit vorwiegend in höherem Alter auftretenden Erkrankungen, welche mit Veränderungen in der Dopaminkonzentration einhergehen (z.B. Parkinson-Patienten: Frank et al., 2004), (2) die Verabreichung von Psychopharmaka zur Variation der Dopaminkonzentration (z.B. Mehta et al., 2004), (3) der Einsatz von modernen bildgebenden Verfahren. Mit letztgenannten kann einerseits die Aktivierung eng umgrenzter Neuronenverbände während spezifischer Untersuchungsbedingungen erfasst werden (z.B. fMRT zur Untersuchung der Aktivierungsveränderungen in dopaminergen Gehirnregionen, vgl. McClure et al., 2004); andererseits erlauben aktuelle PET-Methoden durch den Einsatz von Tracern, welche an dopaminergen Rezeptoren binden, die indirekte Messung der Dopaminausschüttung in verschiedenen Regionen (z.B. Alpert et al., 2003; Bartenstein, 2004; Koeppe et al., 1998; Laruelle, 2000). Zusammenfassend betrachtet besteht starker Konsens darüber, dass das Dopaminsystem unter anderem eine wichtige Rolle bei der Verarbeitung von Belohnungen, bei Lernprozessen und bei Suchtverhalten spielt. Die tierexperimentelle Forschung ist bereits so weit fortgeschritten, dass Annahmen unterschiedlicher Wirkmechanismen des Systems empirisch überprüft und validiert werden können (vgl. die Zusammenfassung von Wise, 2004). Im Humanbereich stellt die Untersuchung biochemischer Vorgänge im Gehirn ohne Zweifel eine sinnvolle und auch notwendige Erweiterung dar, wobei vor allem die Möglichkeit einer In-vivo-Messung von Neurotransmitterausschüttungen mittels PET am Erfolg versprechendsten zu sein scheint. Diese Messungen sollten sich jedoch nicht nur auf das derzeit so populäre Dopamin beschränken, sondern zum Ziel haben, das Zusammenwirken verschiedener neurochemischer Mechanismen zu untersuchen. Allerdings bestehen, wie in Kapitel 3 ausgeführt, gerade für dieses bildgebende Verfahren erhebliche Einschränkungen in der Anwendbarkeit bei Kindern, was die Entwicklung alternativer Methoden erforderlich macht. Dessen ungeachtet erscheint zum gegenwärtigen Zeitpunkt die Befundlage zur Bedeutung des Do-

paminsystems bei jenen komplexen Lernprozessen, die für die Lehr-Lern-Forschung von unmittelbarer Relevanz sind, noch recht dürftig zu sein, weswegen Implikationen für schulisches Lernen, welche auf den Ergebnissen von (tierischen) Konditionierungsexperimenten beruhen, hinterfragt werden sollten.

## **10. Direkte Hirn-Computer-Kommunikation und Neurofeedback: Zur Anwendbarkeit moderner Neurofeedback-Technologie in der Lehr-Lern-Forschung**

Kann das Gehirn unspezifisch auf das Lernen vorbereitet werden? Ist es prinzipiell möglich, die Gehirnaktivität direkt zu beeinflussen, und zwar dermaßen, dass spezifische Lernvorgänge effizienter ablaufen? Aufgrund jüngster technologischer Entwicklungen scheinen neue Formen des Lernens möglich zu werden, welche auf einem direkten Dialog zwischen Mensch und Maschine beruhen. Neurofeedback stellt eine wesentliche Komponente bei der Entwicklung moderner Gehirn-Computer-Schnittstellen dar, die es ermöglichen, über Gedanken einen Computercursor, einen Roboter oder einen Rollstuhl zu steuern. Dieses Kapitel beschreibt die Grundlagen des Neurofeedbacks sowie moderner Gehirn-Computer-Schnittstellen (Brain-Computer-Interface, BCI), mit dem Ziel, Impulse für innovative Forschungsansätze zu setzen. Dabei liegt der Fokus der Darstellung auf den Grundlagen, methodischen Aspekten und Möglichkeiten dieser Ansätze. Abschließend werden Überlegungen zu neuen Anwendungsmöglichkeiten in der Lehr-Lern-Forschung dargestellt.

### **10.1 Grundlagen der Neurofeedback-Forschung**

Die Neurofeedback-Forschung konnte in den letzten drei Jahrzehnten eindrucksvoll dokumentieren, dass EEG-Biofeedback-Training die Beeinflussung der eigenen Hirnaktivität ermöglicht. Dies geschieht dadurch, dass die elektrische Gehirnaktivität kontinuierlich erfasst und spezifische Parameter in Form von geeigneten visuellen oder akustischen Signalen rückgemeldet werden. Dabei sind die Art der Rückmeldetechnik und des verwendeten Feedbacks (visuelles oder akustisches Signal; Analogfeedback vs. Digitalfeedback) von entscheidender Bedeutung für den Lernerfolg (Utz, 1994; vgl. auch Neuper & Pfurt-scheller, 1999).

Trotz jahrzehntelanger Forschung in diesem Bereich gibt es bis heute keine akzeptierte Theorie, die Neurofeedback-Training befriedigend erklären könnte. In vielen Forschungsarbeiten wird EEG-Biofeedback-Training als operante Konditionierung verstanden und besondere Betonung auf Aspekte wie Rückmeldemodalität, Belohnung und Motivation gelegt. Die Bedeutung dieser Faktoren wurde insbesondere in Studien mit Kindern aufgezeigt (vgl. Siniatchin et al., 2000). Eine weitere Ansicht geht davon aus, dass Biofeedback-Training vergleichbar sei mit dem Erlernen motorischer Fertigkeiten. In diesem Ansatz spielen kognitive Prozesse, wie beispielsweise das Finden einer geeigneten mentalen (Kontroll-)Strategie eine besondere Rolle (Roberts et al., 1989; Neuper et al., 1999). In einem breiteren theoretischen Rahmen wird der Kontrollerwerb als Adaptationsverhalten betrachtet (Schwartz, 1979; Mulholland 1995; Pfurt-scheller & Neuper, 2001). Da die gezielte Beeinflussung der eigenen Gehirnaktivität durch unbewusst bleibende Prozesse zustande kommt, lässt sich dieser Vorgang nur bedingt theoretisch klären. Die empirisch-pragmatisch ausgerich-

tete Forschung konzentriert sich vielmehr auf die Bedingungen, unter denen das Phänomen zu Stande kommt, sowie auf Bereiche, in denen sich diese Methoden anwenden lassen. In zahlreichen Studien konnte mittlerweile gezeigt werden, dass verschiedene elektrophysiologische Parameter unter operante Kontrolle bzw. Selbstkontrolle gebracht werden können. Zu den untersuchten EEG-Parametern zählen:

- Evozierte Potenziale (Rosenfeld et al., 1969),
- Ereigniskorrelierte Potenziale (Birbaumer et al., 1981),
- Langsame Hirnpotenziale („slow cortical potentials“, SCP; Birbaumer, 1984),
- Frequenzkomponenten der rhythmischen Aktivität (z.B. Alpha, Theta: Kamiya, 1968; Egner et al., 2004; SMR: Serman, 2000; Vernon et al., 2003; My-Rhythmus: Wolpaw et al. 2002; Neuper et al., 1999).

Kürzlich wurde auch die Möglichkeit einer operanten Kontrolle (Selbstregulation) der regionalen Hirnaktivität (hämodynamische Veränderungen bzw. BOLD-Signal) nachgewiesen (Weiskopf et al., 2003; de Charms et al., 2004).

## 10.2 Neurofeedback-Anwendungen im klinischen Bereich

Im Hinblick auf praktische Neurofeedback-Anwendungen liegen vorrangig Studien im klinischen Bereich vor. Hier sind vor allem zwei Ansätze von Bedeutung, nämlich die Modulation spezifischer EEG-Frequenzbandkomponenten (z.B. sensomotorischer Rhythmus) und die willentliche Beeinflussung langsamer Hirnpotenziale. Barry Serman, der als Pionier des Neurofeedbacks gilt, untersuchte das Training des so genannten sensomotorischen Rhythmus (SMR). Dabei handelt es sich um EEG-Aktivität im Frequenzbereich von 12 bis 16 Hz, die vom sensomotorischen Cortex abgeleitet werden kann, wenn sich das Individuum in einem aufmerksamen Wachzustand befindet, aber jegliche Bewegungen unterdrückt. Dieses Aktivitätsmuster wurde zuerst bei der Katze, später aber auch beim Menschen beobachtet. SMR-Aktivität wird vermutlich in thalamo-kortikalen Rückkoppelungsschleifen generiert und dürfte mit Hemmungsmechanismen (thalamic gating) in Zusammenhang stehen (Lopes da Silva, 1991). Serman konnte an Versuchskatzen nachweisen, dass es möglich ist, die SMR-Aktivität über operante Konditionierung zu verstärken. Eine entscheidende Beobachtung war, dass die mit SMR-Feedback trainierten Tiere auffallende Verhaltensänderungen zeigten, insbesondere eine erstaunliche Resistenz gegenüber pharmakabedingten Anfällen (Serman et al., 1969). Diese Beobachtungen legten den Gedanken nahe, die SMR-Aktivität auch bei Menschen zu trainieren. Neben der Zunahme bzw. Synchronisation bestimmter Frequenzkomponenten der oszillatorischen Hirnaktivität stehen auch langsame Hirnpotenziale in engem Zusammenhang mit dem kortikalen Aktivierungsniveau. So entspricht eine langsame Negativierung der Gehirnpotenziale einem Anstieg der kortikalen Erregbarkeit (erhöhtes Depolarisationsniveau) und kann als Indikator für Aktivierung, Aufmerksamkeit und Informationsverarbeitung gesehen werden. Eine Oberflächen-Positivierung dagegen bedeutet eine Abnahme der Erregbarkeit, also reduzierte Aktivierung bzw. Entspannung (Birbaumer, 1984).

Die Selbstregulation der genannten Gehirnpotenziale hat besondere Bedeutung für Störungsbilder, die durch eine Dysfunktion der kortikalen Erregungs-

regulation charakterisiert werden können. Dazu zählen die Epilepsie sowie Aufmerksamkeitsstörungen und Hyperaktivität. Bei Epileptikern trainiert man entweder speziell die SMR-Aktivität, was unmittelbar mit einer „Normalisierung“ des EEG verbunden ist (Sterman, 1996; Sterman, 2000), oder man versucht durch Unterdrückung der negativen Hirnpotenziale (SCP-Training) die Übererregbarkeit kortikaler neuronaler Netzwerke zu reduzieren (Rockstroh et al., 1993; Kotchoubey et al., 2001). Jahrzehntelange Forschungsarbeiten illustrieren, dass beide Formen des Neurofeedback-Trainings zu einer Reduktion der Anfallshäufigkeit (-dauer) bei epileptischen Patienten führen können (Monderer et al., 2002).

Eine weitere Erfolg versprechende Anwendung eines derartigen EEG-Feedbacktrainings zeichnet sich bei Kindern und Jugendlichen mit Aufmerksamkeitsdefizitsyndrom, Hyperaktivität und Lernstörungen ab (Lubar et al., 1995; Lubar und Lubar, 1999). Die hyperkinetische Störung (Attention Deficit Hyperactivity Disorder, ADHD) ist eine Verhaltensstörung, die durch Unaufmerksamkeit, Impulsivität, und Hyperaktivität charakterisiert ist. Die vermeintliche Ursache liegt in der Störung der für Exekutivfunktionen und Verhaltenssteuerung relevanten dopaminergen kortiko-subkortikalen Systeme (Levy, 1991; Swanson et al., 1998), die mit strukturellen Veränderungen im Frontallappen und in den Basalganglien einhergeht (z.B. Castellanus et al., 1996). Verglichen mit gesunden Kontrollpersonen ihres Alters weisen diese Jugendlichen signifikant erhöhte Aktivität im Theta-Frequenzbereich (4–8 Hz) speziell in frontalen Ableitungen auf, verbunden mit einer verringerten Aktivität in höheren Frequenzbereichen (Mann et al., 1992). Die Patienten werden darauf trainiert, ihre Theta-Aktivität zu reduzieren und gleichzeitig SMR und Beta-Aktivität (z.B. 16–23 Hz) zu erhöhen. Als Folge des Trainings werden reduzierte Hyperaktivität und Medikation sowie bessere Schul- und Konzentrationsleistungen berichtet (Lubar et al., 1995; Linden et al., 1996).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass zahlreiche Studien Belege für die Wirksamkeit des Neurofeedbacks auf Gehirnaktivität und Verhaltensmuster erbringen. Im Speziellen hat sich ein regulierender bzw. normalisierender Einfluss bei pathologischen Veränderungen der elektrischen Hirnaktivität gezeigt, wobei das Erregungsniveau kortikaler und thalamo-kortikaler Netzwerke durch das Training anhaltend verändert werden dürfte (Sterman, 1996). Allerdings soll hier auch einschränkend angemerkt werden, dass einige, speziell klinisch-ausgerichtete Studien methodische Mängel aufweisen (z.B. geringe Stichprobengrößen, Mängel im Versuchsdesign, nicht-standardisierte diagnostische Verfahren), und daher weiterhin Bedarf an großangelegten und kontrollierten Wirkungsstudien besteht (vgl. Monderer et al., 2002; Rossiter, 2004).

### **10.3 Verbesserung kognitiver Funktionen durch Neurofeedback**

Im Hinblick auf potenzielle Anwendungsmöglichkeiten in der Lehr-Lern-Forschung stellt sich die Frage, welche Effekte des Neurofeedbacks bei gesunden Menschen (mit unauffälligem EEG) zu erwarten sind. Im Gegensatz zur umfangreichen klinischen Neurofeedback-Forschung gibt es bis dato nur wenige Studien, die sich mit der Wirkung von EEG-Feedback auf kognitive Leistun-

gen befassen. Allerdings gibt es eine umfangreiche Literatur, die funktionale Zusammenhänge zwischen spezifischen kognitiven Leistungen und charakteristischen Modulationen der oszillatorischen Gehirnaktivität dokumentiert; dabei werden spezifische Frequenzkomponenten (z.B. Theta-, Alpha-, Gammaband-Komponenten) mit kognitiven Funktionen wie Aufmerksamkeit, Gedächtnisleistung, Sprachverarbeitung, Intelligenzleistungen bis hin zur Kreativität in Beziehung gesetzt. So konnten beispielsweise Klimesch und Mitarbeiter (2003) unter Verwendung der repetitiven transkraniellen Magnetstimulation (rTMS) den Beleg für einen direkten funktionalen Zusammenhang zwischen der oszillatorischen neuronalen Aktivität (Bandleistung im oberen Alphaband) und der kognitiven Leistung in einer mentalen Rotationsaufgabe erbringen. Die Versuchsteilnehmer erbrachten signifikant bessere Leistungen, wenn sie unmittelbar vor der Bearbeitung von räumlichen Aufgaben (mentale Rotation von Würfeln) über dem parietalen Kortex mittels rTMS stimuliert wurden. Von besonderem Interesse ist, dass der positive Effekt auf die Leistung nur dann beobachtet wurde, wenn die verwendete Stimulationsfrequenz im oberen Alphaband lag. Dieses Ergebnis legt die Vermutung nahe, dass die neuronale Aktivität in aufgabenrelevanten Gehirnarealen auch über Neurofeedback-Training (möglicherweise sogar nachhaltiger) moduliert werden könnte.

Bisherige EEG-Feedback-Studien zum Zusammenhang zwischen spezifischen kognitiven Funktionen und dem Training spezieller Frequenzkomponenten erbrachten viel versprechende Ergebnisse. Signifikante Leistungsverbesserungen durch SMR-Training zeigten sich bei Aufmerksamkeits-, Konzentrations- und (semantischen) Arbeitsgedächtnisanforderungen bei gesunden Probanden (Egner & Gruzelier, 2001, 2004; Vernon et al., 2003, ). Theta-Training hingegen scheint mit einer Steigerung der Performanz bei kreativen (z.B. musikalischen) Leistungen assoziiert zu sein (Egner & Gruzelier, 2003).

#### 10.4 Direkte Gehirn-Computer-Schnittstellen

Die willentliche Modulation bzw. Selbstkontrolle der eigenen Hirnaktivität stellt auch die Basis für spektakuläre Anwendungen wie die direkte Gehirn-Computer-Kommunikation dar. Die Selbstregulation eines bestimmten EEG-Signals kann beispielsweise zur Steuerung eines Computercursors (siehe Wolpaw et al., 2002; Neuper et al., 1999) oder zur Buchstabenauswahl am Computer-Monitor eingesetzt werden (Birbaumer et al., 1999; Neuper et al., 2003). Auf diese Weise können schwerstbehinderte Patienten mit ihrer Umwelt kommunizieren. Ein eindrucksvolles Beispiel eines völlig gelähmten Patienten, der mit Hilfe eines EEG-basierenden Sprachsystems (Thought-Translation-Device, TTD) in der Lage ist, eigenständig verbale Mitteilungen zu verfassen, wurde erstmals von Birbaumer et al. (1999) berichtet.

Das Grundprinzip einer Gehirn-Computer-Schnittstelle (Brain-Computer-Interface, BCI) besteht darin, dass die mentale Aktivität eines Probanden in ein geeignetes Steuersignal umgewandelt wird (Vidal, 1973; Pfurtscheller & Neuper, 2001; Wolpaw et al., 2002). Dafür werden mehrere EEG-Signale an verschiedenen Ableitorten von der Kopfoberfläche abgeleitet und in Echtzeit weiterverarbeitet. Spezielle Methoden der Biosignalverarbeitung und Mustererken-

nung unterstützen die Erstellung von personenspezifischen, „lernfähigen“ Klassifikatoren, die die Detektion unterschiedlicher kognitiver Prozesse im EEG in Echtzeit ermöglichen (Pfurtscheller et al., 1997; Guger et al., 2001; Obermaier et al., 2001). Eine wesentliche Voraussetzung besteht dabei darin, geeignete mentale Strategien zu finden, die zu unterschiedlichen kortikalen Aktivierungsmustern führen und willentlich reproduzierbar sind. Die Hauptprobleme der Umsetzung liegen in der Auswahl geeigneter EEG-Parameter und in der Online-Klassifikation dieser Parameter, beispielsweise mithilfe künstlicher neuronaler Netzwerke (Pfurtscheller et al., 1997). Für die Klassifikation von EEG-Mustern haben sich individuell anpassbare Methoden der Parameterschätzung bewährt (Pfurtscheller & Neuper, 2001; Schlögl et al., 2002). Bei der Verwendung eines derartigen Klassifikationsansatzes liegt die Hauptaufgabe des Trainings nicht nur auf Seiten des Probanden, sondern auch der Computer „lernt“, die individuellen EEG-Muster einer Person zu erkennen und bestimmten vordefinierten Klassen zuzuordnen.

Eine EEG-basierende Gehirn-Computer-Schnittstelle könnte in Zukunft als zusätzlicher Kommunikationskanal zwischen dem menschlichen Denken und der (Lern-)Umwelt verwendet werden. Bisherige Untersuchungen zur Effektivität einer solchen Kommunikation (im Sinne der übertragbaren Informationsrate) zeigen, dass es prinzipiell möglich ist, verschiedene Kategorien kognitiver Prozesse in Echtzeit zu detektieren (Obermaier et al., 2001). Damit eröffnen sich für die Zukunft neue Möglichkeiten, dynamische Verarbeitungsprozesse im Gehirn, etwa während des Lernens, unmittelbar zu beobachten bzw. in weiterer Folge auch direkt zu beeinflussen.

## **10.5 Anwendungsmöglichkeiten und Anwendbarkeit in der Lehr-Lern-Forschung**

Direkte Gehirn-Computer-Schnittstellen eröffnen somit eine neue Form des Lernens, die in Zukunft ergänzend zur Förderung des schulischen Lernens angeboten werden könnte. Darüber hinaus könnte diese Technologie auch zur empirischen Überprüfung von Theorien aus der Lehr-Lern-Forschung herangezogen werden. Mit Hilfe der BCI-Technologie können neurophysiologische „Brain States“ (z.B. Muster der bioelektrischen Gehirnaktivität) online und in Echtzeit detektiert werden. Damit werden dynamische Aspekte des Lernprozesses bzw. deren (neuro-)physiologische Korrelate unmittelbar erfassbar und beschreibbar. In weiterführenden Forschungsarbeiten könnte beispielsweise der Frage nachgegangen werden, inwieweit es möglich ist, relevante Brain States bzw. deren Dynamik für spezifische kognitive Aufgaben zu identifizieren (z.B. verbale vs. räumlich-figurale Aufgaben).

Des Weiteren ist denkbar, die Aufgabenpräsentation in einer Lernsituation in Abhängigkeit von den spontan auftretenden Brain States zu gestalten. Die Methodik der Echtzeit-EEG-Analyse kann auch dazu benutzt werden, in bestimmten „Brain States“ (z.B. definiert durch einen hohen Theta- oder Alpha-Anteil) Aufgaben darzubieten und Leistungsparameter (wie z.B. Bearbeitungsgeschwindigkeit bzw. -genauigkeit) zu untersuchen. In experimentellen Versuchsreihen könnte die Frage geklärt werden, welche EEG-Parameter für die

Steuerung der Stimulation geeignet sind. In einem derartigen Ansatz könnte einerseits die Relevanz der detektierten „Brain States“ experimentell validiert werden, andererseits könnte eine Brain-State-abhängige Aufgabenpräsentation im Laufe einer Lernsituation dazu beitragen, die kognitive Leistung online zu optimieren. Wesentlich erscheint in diesem Zusammenhang auch die Möglichkeit, ein differenziertes Feedback-Training für spezifische Aufgaben zu entwickeln sowie das Feedback individuell an den/die Lernende/n anzupassen.

Eine Kopplung eines „Brain-Computer-Interfaces“ mit einer Multimedia-Lernumgebung würde sowohl ein „Online-Monitoring“ der elektrophysiologischen Aktivität als auch die interaktive Steuerung der Lernumgebung ermöglichen. Die Einbindung direkter Gehirn-Schnittstellen in Multimedia-Applikationen ist bereits Gegenstand laufender Forschungsarbeiten (z.B. Ebrahimi et al. 2003). Mit einem derartigen System könnte die Untersuchung dynamischer Aspekte intellektueller Leistungen und des Lernens intensiviert werden. Die Erforschung psychophysiologischer Veränderungen (EEG, EOG, EKG) im Umgang mit virtuellen Lernumgebungen (e-learning) bzw. Multimedia-Applikationen gewinnt im Hinblick auf den computerunterstützten Unterricht an Schulen und Universitäten an Bedeutung. Die erzielten Befunde zu psychophysiologischen (insbesondere neurophysiologischen) Veränderungen in Zusammenhang mit virtuellem Lernen könnten in weiterer Folge als Basis für die Entwicklung neurowissenschaftlicher Trainingsprogramme herangezogen werden.

## **11. Ergebnisse des Workshops „Lehr-Lern-Forschung aus neurowissenschaftlicher Perspektive“ im November 2004 in Berlin**

Im Zusammenhang mit der Erstellung dieser Expertise wurde im November 2004 in Berlin ein Workshop durchgeführt. Im Zuge der Vorbereitung wurden alle Teilnehmer mit einem Fragebogen aufgefordert, Vorschläge für aus ihrer Sicht lohnende und aussichtsreiche Forschungsprojekte zu machen, bei denen neurophysiologische Untersuchungen zur Klärung von Fragen der Lehr-Lern-Forschung durchgeführt werden (siehe Anhang). Von allen ausgesandten Einladungen zu diesem Brainstorming über wissenschaftliche Wunschprojekte gingen insgesamt 16 Beiträge ein, über die im Folgenden ein kurzer Überblick gegeben werden soll.

### **Die Gestaltung der Lernumgebung**

Ein thematischer Schwerpunkt betrifft die Wirkung verschiedener Gestaltungsformen der Lernumgebung, welche sowohl die Art der Darbietung von Lerninhalten als auch Formen tutorieller Interaktion subsumiert. Hinsichtlich der Gestaltung von Lerninhalten liegt der Fokus auf der Untersuchung der Nützlichkeit von multimodalen und multimedialen Präsentationsformen. Basierend auf neurophysiologischen Befunden, welche demonstrieren, dass Lerninhalte unter anderem auch in Abhängigkeit vom Präsentations- und Lernmodus in verschiedenen Gehirnregionen verankert werden, soll der Frage nachgegangen werden, ob und bei welchen Inhalten eine multimodale Darbietungsform zu einer leichteren Abrufbarkeit und damit zu einem besseren Lernerfolg beitragen kann. In diesem Kontext wurden mehrfach computergestützte Lernumgebungen angesprochen, welche eine multimediale Informationspräsentation in einfacher Weise ermöglichen. Allerdings sei derzeit noch unklar, welche Formen der Auseinandersetzung mit diesen Lernumgebungen tatsächlich zu erfolgreichem Lernen führen bzw. wie multimodale und multikodale Informationen integriert werden, worüber in weiteren Untersuchungen Aufschluss gewonnen werden soll. In Bezug auf die Gestaltung tutorieller Interaktion wurden vorwiegend Untersuchungen zur Wirksamkeit verschiedener Formen von Feedback für den Lernerfolg angesprochen, wobei zusätzlich zur kognitiven Ebene auch das Stresserleben sowie emotionale und motivationale Aspekte Berücksichtigung finden sollen, die in enger Beziehung zu neurochemischen Mechanismen im Gehirn (z.B. dem dopaminergen System) stehen. Weitere Untersuchungsvorschläge zur Gestaltung der Lernumgebung bezogen sich auf die Bedeutung von Schlaf- und Ruhepausen für den Lernerfolg sowie auf die neurowissenschaftliche Erforschung der Lehrer-Schüler-Interaktion.

### **Effizientes Lernen**

Ob eine bestimmte Lernumgebung zu erfolgreichem Lernen führt, ist letztlich eine Frage des Lernprozesses, welcher unter anderem in Abhängigkeit von den individuellen Voraussetzungen des Lernenden unterschiedlich effizient ablaufen

kann. Mehrere Beiträge näherten sich der Thematik „effizientes Lernen“ aus verschiedenen Richtungen. Aus eher allgemeinspsychologischem Blickwinkel sollte der Frage nachgegangen werden, ob man effiziente von weniger effizienten Lernprozessen auf neurophysiologischer Ebene differenzieren kann, um Aufschlüsse über die neuronalen Grundlagen erfolgreichen Lernens zu erhalten. Des Weiteren wurde die Erforschung sensitiver Phasen angesprochen, während derer bestimmte Inhalte besonders effizient gelernt werden könnten. Die neurowissenschaftliche Erforschung des Phänomens „Interesse“ in Abgrenzung zu Motivation sowie die Erforschung von Strategien der parallelen Informationsvermittlung können ebenso zu diesem Themenkomplex gezählt werden. Ergänzend zu diesen Forschungsinteressen kann die differenzielle Perspektive betrachtet werden, in der interindividuellen Unterschieden in der Effizienz beim Lernen nachgegangen werden soll. Im Besonderen solle hier untersucht werden, welche relative Bedeutung Begabung und Lerngeschichte bzw. Vorwissen für den Lernerfolg zukommt, wie diese interagieren und welche funktionellen und strukturellen Merkmale des Gehirns Unterschiede in diesen Komponenten widerspiegeln. Gelingt die Identifikation erfolgreichen bzw. effizienten Lernens auf neurophysiologischer Ebene, könnte die nächste Forschungsfrage darin bestehen, inwieweit man sich durch gezieltes Training von Gehirnaktivierungsmustern auf Lernsituationen vorbereiten oder generell die kognitive Leistungsfähigkeit verbessern kann. Auch zu dieser Thematik wurden Vorschläge eingereicht, in denen die Wirkung eines derartigen „Neurofeedback-Trainings“ in verschiedenen Inhaltsdomänen evaluiert werden soll.

Neben den allgemeinen Fragen nach der Gestaltung von Lernumgebungen und der Effizienz von Lernprozessen kristallisierten sich zwei schulrelevante Inhaltsgebiete heraus, zu denen mehrfach Forschungsideen eingebracht wurden: sprachliche und mathematisch-naturwissenschaftliche Kompetenzen.

## **Sprache**

Mehrere Untersuchungsideen beschäftigten sich mit verschiedenen Aspekten der Sprachverarbeitung sowohl beim Erstspracherwerb als auch bei der Mehrsprachigkeit. Im Rahmen des Erstspracherwerbs fanden folgende Zielsetzungen Erwähnung: In der frühen Kindheit solle untersucht werden, welche Bedeutung emotionale Hinweisreize für den Erwerb und das Behalten von Wörtern haben. Bei Vorschulkindern sowie Kindern mit Lese- und Rechtschreibschwäche wurden die neurokognitive Überprüfung der Validität von Ortons Leselerntheorie bei verschiedenen Sprachen sowie die weiterführende Untersuchung von Lernstörungen und die Entwicklung diagnostischer Verfahren zur Früherkennung derselben vorgeschlagen. Die Beiträge zur Mehrsprachigkeit behandelten in erster Linie den Prozess des Erwerbs einer Zweit- oder Drittsprache sowohl auf psychologischer als auch auf neurowissenschaftlicher Ebene. Vor allem der Übergang von kontrollierter zu automatisierter Verarbeitung von sprachlichen Informationen und deren neuronale Repräsentationen standen hier im Vordergrund. Abgesehen von diesem Fokus auf den dynamischen Veränderungen beim Zweitspracherwerb lag ein weiterer Schwerpunkt auf der Evaluierung verschiedener Unterrichtsmethoden im Hinblick auf den Lernerfolg, wobei ver-

schiedene Altersgruppen, von Schulkindern bis hin zu älteren Erwachsenen, miteinbezogen werden sollten.

### **Mathematik und Naturwissenschaften**

Das zweite prominente schulrelevante Forschungsfeld umfasst Vorschläge zur Untersuchung von Lernprozessen und Lernschwächen in der Mathematik und den Naturwissenschaften. Mathematische Fertigkeiten wurden einerseits wiederum aus der Entwicklungsperspektive betrachtet, wobei mit Hilfe umfangreicher Längsschnittstudien vor allem Aufschlüsse über die typische und atypische Entwicklung des Zahlenverständnisses gewonnen werden sollen. Diese Erkenntnisse sollten in weiterer Folge zu einer adäquaten Früherkennung von Kindern beitragen, die in diesem Inhaltsgebiet Lernstörungen oder -schwächen aufweisen. In den mathematischen Themenkomplex gehört ebenso ein Beitrag, der sich mit deterministischen und stochastischen Schlussfolgerungen bei Schülern auseinandersetzt und in welchem sowohl die neuronalen Grundlagen verschiedener Repräsentationsformate (natürliche Häufigkeiten, Prozent, Wahrscheinlichkeiten) als auch Geschlechterunterschiede untersucht werden sollen. Über die Mathematik hinaus beschäftigte sich ein weiterer Vorschlag mit Entwicklungsverläufen des Lernens in mathematisch-naturwissenschaftlichen Domänen. Hier lag das Augenmerk auf den neurophysiologischen Grundlagen verschiedener Handlungs- und Denkprozesse bei entsprechenden Aufgaben, welche bisher vorwiegend über Videoanalysen differenziert wurden.

## **12. Resümee und Ausblick: Was können Lehr-Lern-Forschung und Hirnforschung voneinander erwarten?**

### **12.1 Lernen als Gegenstand der wissenschaftlichen Forschung**

Lernen ist ein Sammelbegriff für eine Vielzahl von Prozessen, die im zentralen Nervensystem ablaufen und es Lebewesen ermöglichen, die in ihrem jeweiligen Lebensumfeld gestellten Anforderungen zunehmend besser zu bewältigen. Das gilt für die Biene, die durch Konditionierung Reize kennen lernt, die auf Nahrung hinweisen, und das gilt auch für den Wissenschaftler, der durch Nachdenken eine neue Theorie in seinem Fachgebiet entwickelt. Der Rahmen, innerhalb dessen ein Individuum lernen kann, wird im Wesentlichen von seiner Spezieszugehörigkeit und von der Umwelt bestimmt, in der es lebt. Die Spezieszugehörigkeit legt unter anderem fest, in welcher Form Informationen aufgenommen und welche Verhaltensweisen aufgebaut werden können. Da Bienen nur Vibrationsschall wahrnehmen, können sie nicht auf Reize konditioniert werden, die durch Luftschall übertragen werden, und eine Kuh wird man auch mit den attraktivsten Anreizen nicht dazu bringen, auf den Vorderbeinen zu laufen. Eine bestimmte Sache kann aber nur gelernt werden, wenn die Umwelt, in der das Individuum lebt, einerseits entsprechende Anforderungen stellt und andererseits Gelegenheiten zum Lernen bietet. Eine weiße Ratte im Käfig, der nur die eine Sorte Futter an immer der gleichen Stelle angeboten wird, kann nicht lernen, an welchen Orten sich besonders leckeres Futter befindet und wie sie dort hinkommt. Ein Mensch, der in einer illiteraten Kultur aufwächst, kann allerbeste Voraussetzungen für den Schriftspracherwerb mitbringen und bleibt doch Analphabet. Außer von der Spezieszugehörigkeit und den von der Umwelt gebotenen Gelegenheiten wird Art und Ausmaß des Lernens auch von individuellen Voraussetzungen bestimmt. Diese ergeben sich sowohl aus der genetischen Variation innerhalb einer Spezies als auch aus den individuellen Erfahrungen. Wenn ein Hund durch Unfall oder Krankheit seine Hörfähigkeit verloren hat, kann er im Gegensatz zu seinen Artgenossen nicht auf Glockentöne konditioniert werden.

Für die Interaktion zwischen Lernen und Gehirn gilt: Letzteres entwickelt sich auf der Grundlage des genetischen Programms eines Individuums und begrenzt dessen mögliche Lernerfahrungen. Gleichzeitig verändert sich aber jedes Gehirn kontinuierlich durch Lernen und beeinflusst damit auch, was und wie zukünftig gelernt wird. Lernen ist zweifellos eine faszinierende Angelegenheit, und viele wissenschaftliche Disziplinen beschäftigen sich aus unterschiedlichen Perspektiven mit diesem Thema. In den Neurowissenschaften möchte man die am Lernen beteiligten Hirnfunktionen aufklären. Welche Hirnregionen sind beteiligt, wenn eine bestimmte Sache gelernt wird, und welche biochemischen Prozesse laufen während eines Lernprozesses an den Synapsen ab? Welche dauerhaften Spuren hinterlässt das Lernen im Gehirn? In welchen anatomischen und biochemischen Merkmalen unterscheiden sich Individuen, die unterschiedlich effizient und schnell lernen? Viele dieser Fragen lassen sich bisher

ausschließlich an Tieren untersuchen, aber man kann davon ausgehen, dass sich auf dieser Ebene Erkenntnisse auf den Menschen übertragen lassen. Viele Formen des Lernens, laufen bei Menschen und Tieren ähnlich ab. Dazu gehören Konditionierungsprozesse, die darin bestehen, dass Reize, die vorher unverbunden waren, im Gedächtnis gekoppelt werden und dass ein Verhalten, das positive Konsequenzen hat, mit erhöhter Wahrscheinlichkeit wiederholt wird. Jedes Lebewesen, das Sinneseindrücke empfangen und Verhalten zeigen kann, lernt auf diese Weise. Eine Taube wird die Bewegung, die sie unmittelbar vor Erhalt eines Kornes gezeigt hat, wiederholen, weil sie eine Erwartung aufgebaut hat. Auch bei uns Menschen wird das Verhalten häufiger, als uns bewusst ist, durch einfaches Assoziationslernen gesteuert. Wir erleben, dass eigentlich harmlose Gegenstände unguete Gefühle oder auch starke Ängste in uns auslösen, und der Grund dafür ist, dass diese Gegenstände einmal in einer emotional belastenden Situation wahrgenommen wurden.

Reiz-Reaktions-Lernen wurde in der Psychologie im vergangenen Jahrhundert bis in die 1960er Jahre hinein untersucht, und die Forschungsrichtung (oder manchmal auch Weltanschauung) ist unter dem Begriff „Behaviorismus“ auch außerhalb der Psychologie bekannt geworden. Wenn Neurowissenschaftler die hirnpfysiologischen Grundlagen des Lernens bei Tieren erforschen, dann bedienen sie sich der vor mehreren Jahrzehnten in der behavioristisch orientierten Lernpsychologie entwickelten Forschungsparadigmen, Theorien und Klassifikationen. Diese Klassiker der Psychologie helfen jetzt, Hirnfunktionen bei Tieren besser zu verstehen. An welchen Stellen reagiert das zentrale Nervensystem anders, wenn durch Belohnung anstatt durch Bestrafung gelernt wird? Welche Hirnteile sind involviert und welche Transmitter werden ausgeschüttet, wenn mit positiver Verstärkung (Verabreichung einer Belohnung) oder negativer Verstärkung (Entzug eines aversiven Reizes, z.B. Vermeidung eines Stromschlags durch Flucht) gearbeitet wird? Erkenntnisse über die neurophysiologischen Grundlagen des Reiz-Reaktions-Lernens sind auch für das Verstehen des menschlichen Lernens von Interesse, denn vieles lernt der Mensch auf recht einfache Weise: Folgt auf ein Verhalten eine Belohnung, wird es beibehalten, folgt eine Bestrafung, wird es eingestellt. Durch gezielten Einsatz von Verstärkern gelingt es sowohl bei Menschen als auch bei Tieren, den Aufbau komplexer und überdauernder Verhaltensmuster zu unterstützen.

Auch beim schulischen Lernen spielen Verstärker eine wichtige Rolle. Wie bringt man Kinder in einer Klasse dazu, den Erklärungen des Lehrers zu folgen statt aus dem Fenster zu schauen oder herumzurennen? Welche Anreize muss man Schülern bieten, damit sie sich bei der Bearbeitung von Aufgaben nicht von anhaltenden Misserfolgen abschrecken lassen? Mit solchen und ähnlichen Fragen sind Lehrer täglich konfrontiert, und wenn es ihnen gelingt, die Schüler bei der Stange zu halten, dann sind auch evolutionär gesehen sehr alte Hirnteile wie das limbische System daran beteiligt. Wenn Schüler mit einer bestimmten Lernhandlung Erfolg haben, wenn sie zum Beispiel eine nicht verstandene Textpassage nach längerer Zeit und mehrmaligem Lesen schließlich doch verstehen, dann wird diese positive Lernerfahrung unter anderem mit Hilfe des Transmitters Dopamin so im Gehirn abgespeichert, dass sie bei Bedarf erneut eingesetzt werden kann. Das limbische System einer Physikstudentin, die nach intensivem Bemühen die spezielle Relativitätstheorie verstanden hat, wird

wahrscheinlich ähnlich reagieren wie das limbische System einer Maus, die gelernt hat, wo sie besonders leckeren Käse findet. Es gibt also durchaus Ebenen, auf denen sich das Lernen von Tieren und Menschen mit den gleichen Mechanismen erklären lässt. Für die Beschreibung der neuronalen Basisprozesse beim Lernen ziehen auch die Neurobiologen ein Prinzip heran, welches von dem kanadischen Psychologen Donald Hebb formuliert wurde: „What fires together, wires together.“ Nervenzellen, die zum gleichen Zeitpunkt aktiviert wurden, werden sich auch zukünftig gegenseitig aktivieren. Stellen wir uns einen einfachen Lernvorgang vor: Eine Ratte sitzt in einem Käfig, in dem sich ein Hebel befindet und in unregelmäßigen Abständen ein Licht an- und ausgeht. Wenn die Ratte auf den Hebel drückt, kommt manchmal eine Futterkugel und manchmal nicht. Nach einiger Zeit wird die Ratte gelernt haben, dass ein Hebeldruck nur dann die erwünschte Belohnung bringt, wenn zuvor ein Licht anging. Sie wird nicht mehr wahllos auf den Hebel drücken, sondern nur noch dann, wenn zuvor der Lichtreiz kam. Die Verbindungen zwischen drei Gruppen von Nervenzellen werden gestärkt: (1) den Zellen, die für die Wahrnehmung des Lichtreizes zuständig sind, (2) den Zellen, die für die Ausführung des Hebeldrucks zuständig sind und (3) den Zellen, die für die Wahrnehmung und positive Bewertung der Futterkugeln zuständig sind. Man geht davon aus, dass als Ergebnis eines Lernprozesses die Aktivierung einzelner Zellen in diesem Verbund die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass auch die mit ihnen verbundenen Zellen aktiviert werden (what fires together, wires together). An einem imaginären Beispiel kann man sich das verdeutlichen: An der Wahrnehmung der Futterkugeln sind auch Zellen beteiligt, die für das Erkennen runder Formen zuständig sind. Wenn der Ratte ein Ball gezeigt wird, dann werden diese Zellen aktiv. Diese Aktivierung wird auch auf eng verbundene Zellen übertragen – zum Beispiel die Zellen, die für den Hebeldruck zuständig sind. So kann die Wahrnehmung eines Balls bei der Ratte unter Umständen einen Impuls zur Bewegung der Vorderpfoten auslösen. Im Gehirn jedes Lebewesens vollziehen sich also ständig Veränderungen, die wiederum zukünftiges Erleben und Verhalten beeinflussen.

Manches schulische Wissen kann durchaus einfach nur durch die Verstärkung von Assoziationen erworben werden, zum Beispiel das Einmaleins oder die Vokabeln einer Fremdsprache. Wenn die Aufgabe „ $7 \times 3 =$ “, richtig mit 21 beantwortet wird, gibt es eine Belohnung, falsche Antworten werden ignoriert. Auch einen Grundwortschatz englischer Vokabeln kann man so erwerben. Wenn aber im Kopf des Lernenden nichts weiter geschieht, als dass von außen gesteuerte Assoziationen aufgebaut werden, dann wird nur weitgehend unbrauchbares Wissen erworben. Bei Schülern, die das kleine Einmaleins durch Verstärkung der richtigen Antwort auswendig gelernt haben, kommt die Antwort auf „ $4 \times 8 =$ “ wie aus der Pistole geschossen, aber sie wissen nicht, dass man die Zahl nur verdoppeln muss, wenn man „ $4 \times 16 =$ “ ausrechnen soll. Wenn man im Gedächtnis Assoziationen wie „Stuhl-chair, Tisch-table, carpet-Teppich“ gespeichert hat, dann bedeutet das nicht automatisch, dass man diese Vokabeln auch nutzt, um englische Sätze zu bilden. Die besondere geistige Kompetenz der Menschen besteht aber gerade darin, nicht nur rein assoziativ zu lernen, das heißt nicht nur Verbindungen im Gedächtnis aufzubauen, die von außen gesteuert werden, sondern ihr Wissen aktiv und ohne äußeren An-

stoß so umzustrukturieren, dass es auch zur Bewältigung neuer Anforderungen herangezogen werden kann. Genau das macht die Besonderheit des menschlichen Lernens aus. Wir Menschen können mehr, als uns konditionieren zu lassen. Wir können durch schlussfolgerndes Denken aus bestehendem Wissen neues Wissen erschließen. Auch wenn wir zwischen der Aufgabe „ $387 + 465 =$ “ und ihrer korrekten Antwort keine Assoziation aufgebaut haben, können wir doch in kürzester Zeit den Lösungsvorschlag „843“ zurückweisen, weil wir wissen, dass die Summe zweier ungerader Zahlen eine gerade Zahl sein muss. Menschen, die nie die Sätze gehört haben: „Kein Franzose mag Entenstopfleber. Peter ist Franzose.“ können dennoch daraus den Satz ableiten: „Peter mag keine Entenstopfleber.“ Wenn jemand auf einen Baum zeigt und sagt: „Die Blätter dieses Baums sind nicht grün, sondern blicket.“ weiß man sofort, dass „blicket“ ein Farbname sein muss. Wenn wir wissen, dass man im Gefängnis gestreifte Anzüge trägt und ein Freund uns sagt: „Meine Arbeit ist ein Gefängnis.“ so werden wir doch daraus kaum schließen, dass er bei der Arbeit einen gestreiften Anzug tragen muss, sondern dass er sich in seiner Freiheit eingeschränkt fühlt.

Auch wenn es in den Kognitionswissenschaften noch keine umfassende Theorie über den Erwerb von Fähigkeiten wie schlussfolgerndes Denken oder das Verstehen von Analogien gibt, so ist doch klar, dass diese nicht allein durch den gezielten Einsatz von Belohnungen aufgebaut werden können. Die Versuche des Behavioristen Skinner, mathematisches Problemlösen oder den Spracherwerb auf der Grundlage des Reiz-Reaktions-Lernens zu erklären, können nicht wirklich ernst genommen werden. So interessant und vielfältig die Erkenntnisse zum Reiz-Reaktions-Lernen auch waren, so ließen sich doch jene Arten des Lernens, die den Menschen zum Menschen machen, damit nicht befriedigend erklären. In den 1960er Jahren setzte dann die viel zitierte „Kognitive Wende“ ein, als deren Folge sich Psychologen wieder an solche Arten des Lernens heranwagten, die eine Umstrukturierung des Wissens im Kopf des Lernenden voraussetzen. In diesen Bereich fallen auch die wesentlichen schulischen Lerninhalte, bei denen Bewusstsein, Sprache, schriftliche Symbolsysteme, Einsicht und schlussfolgerndes Denken eine zentrale Rolle spielen.

Halten wir fest: Die gegenwärtigen Fortschritte in der Aufklärung der neurobiologischen Grundlagen des Reiz-Reaktions-Lernens helfen auch, manche Arten des menschlichen Lernens besser zu verstehen. Hirnphysiologische Mechanismen, die Lebewesen dazu bringen, Verhalten, das positive Konsequenzen hat, zu wiederholen, und Verhalten, das negative Konsequenzen hat, zu vermeiden, dürften bei Menschen und Tieren in ähnlicher Weise ablaufen. Neben diesen Gemeinsamkeiten zwischen Menschen und Tieren sind aber auch die Unterschiede wissenschaftlich interessant. Auf der Leistungsebene macht es einen großen Unterschied, ob ein Mensch etwas durch Einsicht gelernt hat und dabei vielleicht auch ein Aha-Erlebnis hatte, oder ob er wie eine Ratte im Käfig einfach nur durch negative Verstärkung (Entzug eines aversiven Reizes, z.B. wenn die Ratte einem Stromschlag durch Flucht entgehen kann) Reiz-Reaktions-Verbindungen aufgebaut hat. Menschen, die Wissen in Form von bewussten Einsichten gewonnen haben, werden bestimmte Fehler zukünftig nicht mehr machen und werden dieses Wissen außerdem heranziehen können, um neue Probleme zu lösen, selbst wenn diese sich oberflächlich von den bisherigen Anforderungen unterscheiden. Wurden lediglich Reiz-Reaktions-Ver-

bindungen aufgebaut, schwächen sich diese wieder ab, sobald sie nicht mehr aktiviert werden (Ausnahmen davon können die Konditionierung von Angst und von Nahrungsmittelaversionen sein). Der Erwerb einer neuen Einsicht hingegen kann die Strukturierung unseres Wissens und unseres Lernverhaltens nachhaltig beeinflussen.

Da zelluläre Vorgänge beim Lernen gegenwärtig nur an Tieren erforscht werden können, lässt sich gegenwärtig noch nichts über die Mechanismen auf der Ebene der Nervenzellen bei Lernformen sagen, die dem Menschen vorbehalten sind. Wie in Kapitel 3 dieser Expertise ausführlich diskutiert, lassen die für Untersuchungen am Menschen zur Verfügung stehenden Methoden Aussagen über die Funktionsweisen des Gehirns nur auf einem ungleich gröberen Niveau zu. Jenseits von neurophysiologischen Erklärungen können wir jedoch auch die Formen des Lernens, die dem Menschen vorbehalten sind, zunehmend besser verstehen. Dies wird im folgenden Abschnitt vertieft.

## **12.2 Was den Menschen von anderen Lebewesen unterscheidet: Institutionalisiertes Lernen im kulturellen Kontext**

Tiere lernen genau wie Menschen unentwegt, aber sie gehen dazu nicht in die Schule. Tiere können sich in vieler Hinsicht viel effizienter bewegen als Menschen, aber sie erfinden keine Sportarten. Tiere nutzen Nischen, um Nahrung zu finden, aber sie kochen nicht. Tiere können quantitative Information verarbeiten, aber sie betreiben keine Mathematik. Tiere kommunizieren über Zeichen miteinander, aber sie nutzen keine Syntax, die es ihnen erlaubt, eine immer reichhaltigere Sprache aufzubauen. Tiere hinterlassen Spuren zur Revierabgrenzung, aber sie überliefern nachfolgenden Generationen keine schriftlichen Werke. Tiere orientieren sich in der physikalischen Welt, aber sie erwerben kein Wissen über Naturgesetze, das für den technischen Fortschritt genutzt werden kann. Menschen haben im Laufe ihrer Kulturgeschichte zweifellos erstaunliche Leistungen erbracht. Zugefallen sind sie ihnen jedoch nicht. Die genetische Grundausstattung, die unsere Gehirnfunktion steuert, hat sich in den letzten 40.000 Jahren nicht wesentlich verändert, aber es vergingen Jahrtausende, bevor Kulturleistungen erbracht wurden, die heute ganz selbstverständlich Teil des schulischen Curriculums sind. Folgende Aufstellung gibt einen Überblick über die Jahre, die zurückliegen, seitdem entscheidende kulturelle Fortschritte gemacht wurden:

seit 5.000 Jahren: Schrift in Gebrauch

3.000 Jahren: mathematische Symbolsysteme in Gebrauch

2.200 Jahren: Konzept der Dichte (Archimedes)

800 Jahren: Arabisches Zahlensystem in Europa gängig

400 Jahren: Analytische Geometrie entwickelt (Descartes)

300 Jahren: Gesetze der Mechanik (Newton)

50 Jahren: Struktur der DNA bekannt

Die Schrift wurde der Menschheit nicht in die Wiege gelegt, viele Jahrtausende ist sie ohne ausgekommen. Das gleiche gilt für die Mathematik. Auch ein sehr intelligenter Römer hätte die Aufgabe  $CIV : XXVI =$  nicht lösen können, denn das römische Zahlensystem, das weder über eine Null noch über ein Stellensystem verfügte, war für eine so komplizierte Division nicht ausgelegt. Graphen einer linearen Funktion, welche die Abbildung proportionaler Konzepte in unterschiedlichsten Inhaltsbereichen erlauben, sind seit weniger als 300 Jahren im Gebrauch.

Bei den gegenwärtigen Diskussionen über die Schule stehen in Deutschland im Wesentlichen Misserfolg und Versagen im Mittelpunkt. Dabei wird vergessen, dass es eigentlich an ein Wunder grenzt, wie es der Schule gelingt, Kindern in wenigen Jahren Wissen und Kompetenzen zu vermitteln, zu deren Entwicklung die Menschheit Jahrhunderte oder Jahrtausende gebraucht hat. Vor diesem Hintergrund könnte man die Tatsache, dass in Deutschland diese gewaltige Leistung nicht ganz so gut gelingt wie in manchen anderen Ländern, fast als marginal betrachten. Jenseits aller Fragen nach konkreten Verbesserungsmöglichkeiten des schulischen Lernens interessieren sich kognitiv orientierte Lehr-Lern-Forscher auch für eine sehr grundsätzlichen Frage: Wie können Schüler, die mit einem Gehirn ausgestattet sind, dessen Funktionsweise sich in den letzten 40.000 Jahren nicht wesentlich verändert hat, in wenigen Jahren den geistigen Entwicklungsstand ihrer Kultur erreichen? Unbestritten ist, dass dies durch den Gebrauch von Symbolsystemen wie Sprache, Schrift, Mathematik und bildhafte Darstellungen ermöglicht wird. Diese Symbolsysteme können als geistige Werkzeuge verstanden werden, mit deren Hilfe inhaltliche Bedeutungen konstruiert werden (Stern, 2001). Dabei entwickeln sich die Potenziale dieser Werkzeuge weiter und ermöglichen so den Zugang zu immer neuen Inhalten. Dieser Gedanke findet sich beispielsweise bei Thomas Hobbes in *Leviathan* (1651), Part I, Chapter 4: Of Speech: „For example, a man that hath no use of Speech at all, (...) if he set before his eyes a triangle, and by it two right angles, (such as are the corners of a square figure,) he may by meditation compare and find, that the three angles of that triangle, are equall to those two right angles that stand by it. But if another triangle be shewn him different in shape from the former, he cannot know without new labour, whether the three angles of that also be equall to the same. But he that hath the use of words when he observes, that such equality was consequent, not to the length of the sides, nor to any other particular thing in this triangle; but onely to this, that the sides were straight, and the angles three; and that that was all, for which he named it a Triangle; will boldly conclude Universally, that such equality of angles is in all triangles whatsoever; and register his invention in these generall terms, Every triangle hath its three angles equall to two right angles. And thus the consequence found in one particular, comes to be registered and remembred, as an Universal rule; (...).“

Die Sprache erlaubt dem Menschen, Bedeutungen zu konstruieren, die über Sinneserfahrungen hinausgehen. Wir können von Unendlichkeit sprechen, obwohl wir im täglichen Leben unentwegt mit Begrenztheit konfrontiert sind. Es steht uns frei, jedem Wort die Vorsilbe „un“ voranzustellen und damit seine Bedeutung umzukehren. Der Begriff der Unendlichkeit wird auch durch mathematische Symbolsysteme mit Inhalt gefüllt. Numerische Stellensysteme wie das Dezimalsystem kennen keine größte Zahl, sondern bieten die Möglichkeit,

immer noch eine weitere Zahl zu bilden, die größer ist als die zuvor gebildete. Dass Menschen ihre Fähigkeit zum logischen Denken erst auf der Grundlage der Schriftsprache etablieren konnten, wird bei Olson (1996) diskutiert.

Sich mit typisch menschlichen Lernformen auseinander zu setzen heißt deshalb, sich mit dem Erwerb und der Nutzung von Symbolsystemen als Werkzeugen zur Konstruktion von Bedeutungen zu befassen. Obwohl Menschen Jahrtausende brauchten, um Schrift zu entwickeln, können die meisten Kinder nach wenigen Monaten Schulbesuch lesen. Auch wenn das arabische Zahlensystem erst vor 1200 Jahren entwickelt wurde, können die meisten Grundschul Kinder dividieren und verstehen, dass die Null eine Zahl ist. Offensichtlich ist das menschliche Gehirn mit Ressourcen ausgestattet, welche bei entsprechenden Lerngelegenheiten den Zugang zu Symbolsystemen erlauben, die wiederum als Werkzeuge zur Erweiterung des geistigen Horizonts genutzt werden können. In den letzten Jahrzehnten wurden zahlreiche Erkenntnisse über universelle geistige Ressourcen beim Menschen gewonnen. Einen Anfang in dieser Richtung hat der berühmte Linguist Noam Chomsky gemacht: Er nahm an, dass in den Genen der Spezies Mensch (also universell verfügbar) die Voraussetzungen für den Spracherwerb gespeichert sind. Im menschlichen Gehirn reift demnach ein Grammatikprogramm heran, das den Zugang zu jeder Sprache erleichtert. Weil Menschen auf die Sprache vorbereitet sind, können sie diese ohne systematische Instruktion erwerben. Gegenwärtig wird zwar Chomskys Annahme einer universellen Grammatik in der Sprachforschung in Frage gestellt (dazu: Tomasello, 2003), aber unbestritten bleibt, dass grundlegende Mechanismen, die den Spracherwerb steuern, genetisch beim Menschen verankert sein müssen. In den letzten 20 Jahren wurden in der Entwicklungspsychologie die Kompetenzen von Säuglingen erforscht. Auch wenn diese ihr Wissen noch nicht im Gespräch zum Besten geben können, so lässt ihr Verhalten – zum Beispiel ihre Blickbewegungen oder ihre Greif- und Saughandlungen – doch darauf schließen, dass sie bereits eine Menge über die physikalische und soziale Welt wissen. Man spricht in diesem Zusammenhang von primärem oder privilegiertem Wissen. Die Fähigkeit zur visuellen und akustischen Differenzierung, die Menschen mitbringen, bildet neben anderen Ressourcen die Voraussetzung für den späteren Schriftspracherwerb (Goswami, 2003). Auch auf die Fähigkeit zur quantitativen Differenzierung von kleineren Mengen sind Menschen gut vorbereitet, und Zählen lernen sie ebenso informell wie ihre Muttersprache (Wynn, 1992).

Arithmetik und Schriftsprache bereiten der Mehrheit der Kinder keine Schwierigkeiten, aber bald nach Schuleintritt zeigt sich, dass ein Teil der Kinder nicht wirklich von den angebotenen Lerngelegenheiten profitiert: Sie lernen nicht Lesen oder nicht Rechnen oder haben mit beidem Schwierigkeiten. Es ist unbestritten, dass zumindest bei einem Teil der Kinder die Ursachen für diese Arten der Lernstörung nicht einfach in einem ungünstigen Umfeld zu suchen sind, sondern mit kortikalen Dysfunktionen erklärt werden müssen. Schon lange ist bekannt, dass Kinder mit Lese-Rechtschreib-Störungen Probleme mit der so genannten phonologischen Bewusstheit haben. Es gelingt ihnen nicht ohne Probleme, die Lautstruktur der Sprache zu segmentieren, was die Voraussetzung für das Lernen einer Lautschrift darstellt. Ebenso lange ist bekannt, dass späteren Problemen beim Schriftspracherwerb durch ein frühes Training der

phonologischen Bewusstheit entgegengewirkt werden kann. In der Arbeitsgruppe um Usha Goswami, eine der weltweit renommiertesten Forscherinnen zum Schriftspracherwerb, schaut man inzwischen bei der Sprachverarbeitung ins Gehirn und findet die Annahme bestätigt, dass Kinder mit Lese-Rechtschreib-Störungen keine spontane lautliche Segmentierung von Wörtern vornehmen. In einem Vortrag auf dem Göttinger Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie betonte Usha Goswami im September 2004 jedoch, dass aus den hirnpfysiologischen Untersuchungen noch keinerlei praktische Implikationen abzuleiten seien.

Auch Dyskalkulie, also die Schwierigkeit, einfache Rechenoperationen durchzuführen, kann ihre Ursachen in kortikalen Dysfunktionen haben. Insbesondere in der Arbeitsgruppe um Stanislaus Deheane wurden grundlegende Hirnfunktionen beim Rechnen aufgeklärt. Aber auch für die Dyskalkulie gilt, dass die teilweise recht erfolgreichen Trainingsprogramme zu deren Behandlung nicht aus Ergebnissen der Hirnforschung abgeleitet wurden, sondern auf kognitionswissenschaftlichen und fachdidaktischen Annahmen beruhen.

Auch wenn Abweichungen in der Hirnfunktion manchen Menschen den Erwerb von Kulturtechniken erschweren, sind Lernschwierigkeiten doch nicht auf diesen Personenkreis beschränkt. Tatsächlich werden die in Lehrplänen verankerten Lernziele meist nur von wenigen Schülern erreicht. Auch nach 13 Jahren Schulbesuch mit abschließendem Abitur gelingt es nur wenigen Schülern, flüssige Texte in der Muttersprache zu schreiben, geschweige denn in einer Fremdsprache. In Mathematik und Naturwissenschaften hat sich die Mehrheit der Schüler ein Arsenal von Strategien zurechtgelegt, mit dessen Hilfe sie sich „durchwursteln“, ohne jedoch ein tieferes konzeptuelles Verständnis aufzubauen, weshalb viele Schüler, wie PISA vor Augen führt, an neuen Aufgaben scheitern.

Manche der gut gemeinten Ratschläge für die Verbesserung des schulischen Lernens von Seiten der Hirnforschung werden damit begründet, dass erst der Blick in das Gehirn die kontroversen theoretischen Diskussionen in den Erziehungswissenschaften klären könne. Entgegen dieser Außenwahrnehmung herrscht unter empirisch arbeitenden Lehr-Lern-Forschern jedoch ein hoher Grad an Übereinstimmung über die Rahmenbedingungen von gutem Unterricht, der verständnisvolles Lernen fördert. Baumert et al. (2004) haben diese wie folgt zusammengefasst (S. 318):

- Verständnisvolles Lernen ist ein aktiver individueller Konstruktionsprozess, in dem Wissensstrukturen verändert, erweitert, vernetzt, hierarchisch geordnet oder neu generiert werden. Entscheidend für verständnisvolles Lernen ist die aktive mentale Verarbeitung, die sich in der handelnden Auseinandersetzung mit der sozialen oder natürlichen Umwelt oder im Umgang mit Symbolsystemen vollzieht.
- Verständnisvolles Lernen ist sinnstiftend, indem neue Zusammenhänge erschlossen werden, die Wissen organisieren und ordnen. Dazu gehört, dass der Gegenstand für die Lernenden ein Mindestmaß an intellektueller und/oder praktischer Bedeutung besitzt.
- Verständnisvolles Lernen ist von den individuellen kognitiven Voraussetzungen, vor allem aber vom bereichsspezifischen Vorwissen abhängig. Umfang und Organisation der verfügbaren Wissensbasis entscheiden über Qualität und Leichtigkeit des Weiterlernens.

- Verständnisvolles Lernen erfolgt trotz aller Systematik stets auch situiert und kontextuiert. Wissen wird in der Regel in sozialen Kontexten erworben und trägt die Besonderheit des sozialen Erwerbszusammenhangs in sich. Die Situietheit begrenzt oft die Anwendbarkeit erworbenen Wissens. Um den Anwendungsbereich zu erweitern, ist eine Variation der Erwerbs- und Anwendungskontexte notwendig.
- Verständnisvolles Lernen wird durch Motivation und metakognitive Prozesse (z.B. Planung, Kontrolle, Bewertung) reguliert.
- Verständnisvolles Lernen wird durch kognitive Entlastungsmechanismen unterstützt. Dazu gehören die durch multiple Repräsentation förderbare Herausbildung informationsreicher Wissensseinheiten, die als Ganzes erinnert und abgerufen werden können (Chunks), sowie die Automatisierung von Handlungsabläufen und Denkvorgängen.

Befunde aus unterschiedlichsten Forschungsparadigmen der Kognitionswissenschaften, der Entwicklungspsychologie und der Lehr-Lern-Forschung sind vereinbar mit diesen Annahmen. Kein ernst zu nehmender Lehr-Lern-Forscher würde zu gegenteiligen Aussagen kommen. KEINE der genannten Grundannahmen wurde aus Ergebnissen der Hirnforschung abgeleitet und es gibt gegenwärtig KEIN Ergebnis aus der Hirnforschung, das eine Revision einer der Aussagen erfordern würde oder aber zu deren Präzisierung beitragen könnte.

Die aufgeführten Grundannahmen für verständnisvolles Lernen geben die Richtung für die Entwicklung von effizienten Lerngelegenheiten vor und die Aufgabe der Lehrperson besteht darin, Schüler mit Anforderungen zu konfrontieren, welche eine aktive Auseinandersetzung mit den Inhalten erfordern. Dazu gehört auch, dass Schüler die Chance erhalten, mit dem Lernziel inkompatibles Wissen zu aktivieren und zu revidieren. Wie das für einzelne Fächer, Lernziele und Altersgruppen zu geschehen hat, sollte in Zusammenarbeit mit den Fachdidaktiken erarbeitet und in der Lehr-Lern-Forschung evaluiert werden. Lernrezepte aus der „Neurodidaktik“ stehen nicht zwangsläufig im Widerspruch zu den genannten Grundannahmen zum verständnisvollen Lernen, aber sie machen keine Aussagen zu der entscheidenden Komponente des schulischen Lernens: dem Wissen. Genau dieses Manko aber macht diese Ratschläge so gefährlich. Gute Lehrer – darüber gibt es in der Lehr-Lern-Forschung keine Kontroversen, zeichnen sich durch fachspezifisches pädagogisches Wissen aus. Darunter ist die „Zusammenführung von Inhalt und Pädagogik zu einem Verständnis dessen, wie bestimmte Themen, Probleme oder Fragen strukturiert, dargestellt und an die Interessen und Fähigkeiten der Lernenden angepaßt und für den Unterricht aufbereitet werden sollten“ (Shulman, 1987) zu verstehen. Mit anderen Worten: Gute Lehrer wissen, wie Schüler die jeweiligen Inhalte lernen. Sie verstehen die Anfangsschwierigkeiten ihrer Schüler und wissen, wie sie darauf zu reagieren haben. Die Aus- und Weiterbildung von Lehrern muss den Lehrern die Möglichkeit geben, genau diese Art von Wissen zu erwerben.

Wenn nun Lehrer, die mit der Gestaltung einer inhaltlichen Lernumgebung überfordert sind, weil ihnen fachspezifisches pädagogische Wissen fehlt, auf vermeintlich gut gemeinte „neurodidaktische“ Ratschläge treffen, kann das schwerwiegende Folgen haben. Wenn von Seiten der „Neurodidaktik“ beispielsweise gefordert wird, möglichst viel durch konkrete Handlungen zu lernen, werden Grundschullehrer, die wenig über geistige Prozesse beim Schrift-

spracherwerb wissen, mit den Schülern Buchstaben backen, kneten und töpfern. Tatsächlich können solche Aktivitäten keinesfalls gezielte Schreib- und Leseübungen in Abhängigkeit vom jeweiligen Kompetenzniveau ersetzen. Wertvolle Unterrichtszeit würde vergeudet. Auch der „neurodidaktische“ Rat, möglichst viel bildhaftes Anschauungsmaterial zu verwenden weil Menschen mit besonders guten visuellen Gedächtnis ausgestattet sind, kann Verwirrung und blinden Aktionismus mit ungünstigen Folgen für das schulische Lernen auslösen. Es muss darum gehen, die richtigen Bilder zur richtigen Zeit einzusetzen. Die Frage, unter welchen Bedingungen welche Art von Veranschaulichungen den Lernprozess unterstützen, ist bereits vielfältig untersucht worden und die Ergebnisse gehen insbesondere in die Gestaltung multimedialer Lernumgebungen ein. Einfach nur mehr Bilder wäre der Schritt in die falsche Richtung.

Wenn das BMBF Forschung unterstützen möchte, von der kurzfristig eine Verbesserung des schulischen Lernens zu erwarten ist, dann sollte inhaltsbezogene Unterrichtsforschung gefördert werden, bei der Fachdidaktiker und Lehr-Lern-Forscher für Inhaltsbereiche, die als wichtig erachtet werden, Lernumgebungen und Pläne für deren Dissemination entwickeln, wie dies zum Beispiel beim Sinus-Programm für das Fach Mathematik geschehen ist.

Parallel dazu ist es aber durchaus sinnvoll, die Zusammenarbeit zwischen der Lehr-Lern-Forschung und den Neurowissenschaften zu fördern. Kooperationen zwischen beiden Forschungsrichtungen können dazu beitragen, einerseits typisch menschliche Hirnfunktionen und andererseits manche Schwierigkeiten beim schulischen Lernen besser zu verstehen.

### **13. Jenseits einer unmittelbaren Anwendbarkeit: Mögliche Forschungsfragen, bei denen eine Zusammenarbeit zwischen Neurowissenschaften und Lehr-Lern-Forschung wünschenswert ist**

**„If neuroimaging is the answer, what is the question?“  
(Steve Kosslyn, 1999)**

Von einem Austausch zwischen der empirischen Lehr-Lern-Forschung und den Neurowissenschaften sind interessante wissenschaftliche Diskussionen zu erwarten. Dafür gibt es bereits gelungene Beispiele. In dem an die Lehr-Lern-Forschung angrenzenden Gebiet der geistigen Entwicklung im frühen Kindesalter hat die gegenseitige Kenntnisnahme von psychologischer und neurowissenschaftlicher Forschung den Erkenntnisfortschritt in vieler Hinsicht vorangebracht. Am Beispiel des Scaling Errors wird dies in Kapitel 2 näher erörtert. Es ist zu erwarten, dass in den nächsten Jahren typisch menschliche Hirnfunktionen, die auch für das schulische Lernen zentral sind, besser verstanden werden. Dazu gehören Sprachverarbeitung, Bewusstsein oder auch Gedächtnisprozesse. Mittelfristig wird sich vor diesem Hintergrund auch mancher Befund zum schulischen Lernen besser interpretieren lassen.

Von einer Zusammenarbeit mit der Lehr-Lern-Forschung werden auch die Neurowissenschaften profitieren, denn wenn man die typisch menschlichen Hirnfunktionen besser verstehen möchte, dann drängt sich schulisches Lernen als Untersuchungsgegenstand geradezu auf. Aus der empirischen Lehr-Lern-Forschung sind inzwischen zahlreiche Bedingungen bekannt, die Lernen erleichtern oder erschweren. Solche Bedingungen können in der Aufgabenstellung, der Person oder in der Lernumgebung liegen. Herauszufinden, welche Hirnfunktionen in Abhängigkeit von derartigen Bedingungen parallel zu den Leistungsänderungen auftreten, kann zu einem besseren Verständnis des menschlichen Gehirns führen. Bei der Planung von derartigen Untersuchungen ist allerdings zu beachten, dass die Messgenauigkeit von psychologischen Verfahren wie Verhaltensbeobachtung, Testung oder Befragung nicht selten höher ist als die Messgenauigkeit von Methoden zur Erfassung der Hirnaktivität. Signifikante Effekte sind dementsprechend nur bei starken Wirkungsfaktoren (unabhängigen Variablen) zu erwarten. Möchte man Hirnaktivitäten beim schulischen Lernen untersuchen, sollte man intra- und interindividuelle Vergleiche zunächst unter Bedingungen vornehmen, unter denen bei psychologischen Untersuchungen große Effektstärken beobachtet wurden.

Das Interesse kognitiv orientierter Lehr-Lern-Forscher an den Methoden der Hirnforschung begründet sich vor allem aus der Hoffnung, in den Gehirnen lernender Personen bereits Hinweise auf potenzielle Schwierigkeiten oder Erfolge zu sehen, die sich noch nicht im Verhalten oder in der Leistung niederschlagen. Auch wenn uns die Hirnforschung zurzeit noch nicht sagen kann, wie gute Lerngelegenheiten aussehen, können wir zukünftig vielleicht mit Hilfe ihrer Methoden erkennen, ob der Lerninput beim Schüler ankommt und wie er

für die weitere Kompetenzentwicklung genutzt wird. Vor dem Hintergrund der methodischen Probleme, die mit der Erfassung von Hirnaktivitäten einhergehen, ist ein solcher Optimismus gegenwärtig allerdings noch verfrüht. Zuverlässige Aussagen über die Hirnaktivierung erfordern die Aggregation von Messwerten über Aufgaben und Personen. Mit anderen Worten, wenn man etwas über die EEG-Muster einer Person bei einer bestimmten geistigen Aktivität aussagen möchte, dann muss man bei dieser Person bis zu 50-mal Ableitungen bei dieser Aktivität vornehmen. Die Probanden müssen also mehrfach – manchmal sind 50 Durchgänge nötig – die Aufgaben des gleichen Typs erhalten. Problematisch kann es werden, wenn davon ausgegangen werden muss, dass sich die Art der geistigen Aktivität verändert, wenn man bis zu 50-mal mit der gleichen Anforderung konfrontiert wird. Aber selbst wenn bei einer Person die Daten über 50 Messwiederholungen aggregiert werden, liegt häufig noch kein hinreichend zuverlässiger Personenparameter vor. Aussagen sind häufig erst möglich, wenn über mehrere Personen aggregiert wird. Aussagen, die eine auf korrelativen Methoden basierende Auswertung erfordern, können deshalb nur selten gemacht werden. Allerdings kann in den nächsten Jahren mit methodischen Fortschritten gerechnet werden, sodass auch auf individueller Ebene mit wenigen Messungen aussagekräftige Ergebnisse zu erwarten sind.

Trotz der genannten gegenwärtigen methodischen Einschränkungen gibt es Fragestellungen an der Schnittstelle von Neurowissenschaften und Lehr-Lern-Forschung, bei denen schon jetzt durch einen Blick in das Gehirn neue Erkenntnisse zu erwarten sind. Auch wenn auf individueller Ebene die Aussagen zum Ausmaß und der Lokalisierung von Hirnaktivitäten meist noch sehr ungenau sind, können auch hoch aggregierte Daten interessante Hinweise geben. Ein Vergleich der Aktivierung im vorderen und hinteren Kortex erlaubt beispielsweise Aussagen darüber, ob eine Anforderung vorwiegend durch Abruf von bereits etabliertem Wissen (stärkere Aktivierung im hinteren Kortex) oder durch Entwicklung neuer Lösungsstrategien (stärkere Aktivierung im Frontalhirnbereich) bewältigt wird. Ein Vergleich zwischen der Aktivierung in der linken und in der rechten Hemisphäre lässt (bei Rechtshändern) darauf schließen, ob eher sprachliche (stärkere Aktivierung auf der linken Seite) oder räumlich-visuelle (stärkere Aktivierung auf der rechten Seite) Ressourcen zur Bewältigung einer Anforderung herangezogen werden. Diese für sich genommen wenig aussagekräftigen Indikatoren können in Kombination mit Leistungsdaten und Verhaltensbeobachtung durchaus zu einem besseren Verständnis des menschlichen Lernens und Denkens führen. Wie Fragestellungen aussehen könnten, bei denen eine Zusammenarbeit zwischen Neurowissenschaften und der Lehr-Lern-Forschung fruchtbar sein kann, soll im Folgenden erörtert werden. Es werden exemplarisch zehn Fragen aufgeführt, die sich bei der Vorbereitung und der Durchführung des Workshops ergaben (Kap. 11).

### 13.1 Zehn mögliche Forschungsfragen

1. *Welche abweichenden Hirnfunktionen zeigen Menschen mit Störungen beim schulischen Lernen?*

Hirnfunktionen, die mit Dyslexie und Dyskalkulie einhergehen, werden gegenwärtig von zahlreichen Wissenschaftlern erforscht. Führende Arbeitsgruppen aus dem Ausland wurden weiter vorn erwähnt. Ziel dieser Forschung ist es unter anderem, Messverfahren zur Frühdiagnose von potenziellen Störungen zu entwickeln. Gegenwärtig erlauben zwar Verfahren zur Messung der Hirnaktivitäten nur selten genauere Vorhersagen, als aufgrund von Leistungstests und Verhaltensbeobachtung möglich sind, aber in absehbarer Zeit ist eine Steigerung der diagnostischen Validität bei Einbeziehung hirnphysiologischer Messverfahren durchaus zu erwarten. Neue Erkenntnisse zu den hirnphysiologischen Grundlagen von Lernstörungen ermöglichen auch ein besseres Verständnis des Sprechens, Lesens, Schreibens, Rechnens und des mathematischen Problemlösens im „Normalbereich“.

2. *Lassen sich besonders lernsensible Phasen identifizieren?*

Während Störungen in der geistigen Entwicklung und im Lernen sehr intensiv beforscht und immer besser verstanden werden, ist nur wenig darüber bekannt, mit welchen Mitteln die geistige Entwicklung von Kindern, die schon gute Voraussetzungen mitbringen, zusätzlich stimuliert werden kann. Zwar lassen sich aus wissenschaftlicher Sicht die Rahmenbedingungen für eine störungsfreie kognitive Entwicklung beschreiben, aber bisher gibt es keine seriösen Ergebnisse zu der Frage, ob und wie man ganz bestimmte Kompetenzen besonders fördern kann. So lassen sich zum Beispiel auf der Grundlage der gegenwärtigen Forschungsergebnisse keine Aussagen zu der Frage machen, ob und wann es sinnvoll sein könnte, räumlich-visuelle Trainings mit kleinen Kindern durchzuführen, damit sie später die Geometrie besser verstehen können. Auch wenn sich hirnphysiologische Untersuchungen an Kindern gegenwärtig noch schwierig gestalten, sollten sich Lehr-Lern-Forscher und Neurowissenschaftler zu Fragen des Lernens und der Entwicklung im frühen Kindesalter austauschen. Wie an anderer Stelle schon am Beispiel des „Scaling Errors“ erörtert wurde, können die verschiedenen Forschungsrichtungen hier voneinander profitieren.

3. *Wie werden unterschiedliche Wissensarten im Gehirn repräsentiert, und wie verändern sie sich durch Lernen?*

Lernen zeigt sich aus kognitionswissenschaftlicher Sicht in einer Anpassung der Wissensstruktur an neue Anforderungen. In der Kognitionspsychologie werden unterschiedliche Wissenszustände wie zum Beispiel prozedurales und deklaratives Wissen beschrieben. Ersteres ist Handlungswissen und Letzteres ist sprachlich oder bildlich abgespeichertes Wissen über die Welt. Ganz allgemein kann man sich Wissen als eine vernetzte Struktur vorstellen und davon ausgehen, dass sich die Netzwerkstruktur mit jeder Aktivierung verändert. Lernen schlägt sich im Netzwerk durch den dauerhaften Aufbau von Verbindungen zwischen einzelnen Wissensrepräsentationen nieder und kann zur Automatisierung sowie zur Explikation von Wissen führen. Auto-

matisierung bedeutet, dass sich einzelne Wissens Elemente ohne bewusste Entscheidungen auf Seiten des Lernenden gegenseitig aufrufen und das Verhalten steuern. Wird automatisiertes Wissen zur Bewältigung einer Anforderung herangezogen, kann diese „nebenbei“ erledigt werden, sodass damit geistige Ressourcen für parallele Aktivitäten zur Verfügung stehen. Zur Automatisierung kommt es durch die wiederholte Ausführung der gleichen Aktivität. Einmal automatisiertes Wissen ist recht änderungsresistent und kann daher bei der Bewältigung neuer Anforderungen sogar störend sein.

Explikation bedeutet, dass Wissen bewusst zugänglich wird und unter Heranziehung von Symbolsystemen (Sprache, Bilder, Mathematik) kommuniziert werden kann. Auf der Grundlage von symbolischen Repräsentationen können geistige Manipulationen am Wissen vorgenommen werden, sodass es zunehmend flexibler wird und damit zur Bewältigung neuer Anforderungen (Problemlösen) herangezogen werden kann. Im Alltag werden solche Vorgänge mit „Verstehen“, „der Groschen ist gefallen“, oder „Aha-Erlebnis“ bezeichnet. Kognitionswissenschaftliche Zugänge zu dieser für die Schule wohl wichtigsten Form des Lernens sind noch unbefriedigend, und von einer Aufklärung der neurophysiologischen Grundlagen sind wir noch meilenweit entfernt. Dessen ungeachtet hat die Lehr-Lern-Forschung in den letzten Jahren zahlreiche Bedingungen identifiziert, die die Explikation, also das verständnisvolle Lernen, fördern. So wissen wir zum Beispiel inzwischen recht gut, wie die Zusammenarbeit zwischen Lernern gestaltet sein sollte. Auch die Gestaltung von Lösungsbeispielen oder die Anregung zu analogem Denken durch Kontrastierung von Beispielen ist recht gut erforscht, und die Ergebnisse werden bereits bei der Gestaltung von Lerngelegenheiten genutzt.

Der Vergleich der Hirnaktivitäten von Menschen, die in einer verständnisfördernden Bedingung gelernt haben, mit Menschen, für die dies eher nicht zutrifft, könnte zu einem besseren Verständnis des Verstehens beitragen. Wie sich Automatisierung und Explikation von Wissen durch Lernen im Gehirn niederschlagen, könnte sowohl beim Fremdsprachenlernen als auch beim Erwerb mathematischer Kompetenzen recht gut untersucht werden.

#### 4. *Werden durch Lernen allgemeine Hirnfunktionen trainiert?*

Wenn sich eine Person etwas nicht merken kann – zum Beispiel eine Zahlenfolge, ein neues Wort oder eine Definition –, dann kann dies unter Bezug auf unterschiedliche wissenschaftliche Konstrukte ganz unterschiedlich erklärt werden. In der Lehr-Lern-Forschung würde man sagen, dass dieser Person das Wissen fehlt, an das die eingehende Information angebunden werden kann. Aus einer eher funktionalen Perspektive, die auch die Hirnforschung einnimmt, würde man hingegen darauf verweisen, dass die Person in ihrer Konzentrations- oder Merkfähigkeit beeinträchtigt ist. Vereinfacht gesprochen, würde die Lehr-Lern-Forschung die Defizite eher in der Software suchen, während sich die Neurowissenschaften auf die Hardware konzentrieren.

Vor dem Hintergrund der Ergebnisse der empirischen Lehr-Lern-Forschung ist die Konstruktion einer Wissensbasis der einzig mögliche Weg zur Verbesserung der geistigen Kompetenzen. Aus der Perspektive der empirischen Lehr-Lern-Forschung muss ganz klar davor gewarnt werden, geistige

Kompetenzen in der Schule sozusagen am Inhalt vorbei, zum Beispiel mit Gehirnjogging oder Methodentraining, verbessern zu wollen. Auf der Grundlage kognitionspsychologischer Theorien zu Erwerb und Nutzung von Wissen lassen sich jedoch keine Aussagen über neurophysiologische Aktivierungsprozesse im Gehirn machen. Ob das Gehirn unspezifisch zum Beispiel durch Neurofeedback (siehe Kap. 10) auf das Lernen vorbereitet werden kann, lässt sich nicht auf der Ebene der Wissenspsychologie klären. Langfristiges Ziel der Kognitionswissenschaft wie auch der Lehr-Lern-Forschung muss es natürlich sein, Theorien über den Erwerb, die Repräsentation und die Nutzung von Wissen so zu formulieren, dass sie direkt an neurowissenschaftliche Theorien anknüpfen. Dies erfordert einen interdisziplinären Austausch.

5. *Wie vollziehen sich Konsolidierungsprozesse von Gelerntem unter günstigen und weniger günstigen Umständen?*

Die schulische wie auch die außerschulische Umgebung bietet ununterbrochen Lerngelegenheiten an, aus denen eine Auswahl getroffen werden muss. Nicht selten aber werden auch die ausgewählten Lernziele nicht oder nur mit Verzögerung erreicht. Vieles wird so schnell wieder vergessen, dass es keine nachhaltigen Lerneffekte gibt. Mit anderen Worten: Die Konsolidierung von Gelerntem verläuft häufig suboptimal. Eine Ursache hierfür kann die Interferenz von Wissen sein: Neu eingehende Informationen verhindern die Konsolidierung des frisch Gelernten. Durch eine Ruhepause zur richtigen Zeit hätte der Lernprozess optimiert werden können. In der neurowissenschaftlichen Forschung zeichnet sich derzeit ab, dass dem Schlaf bei Konsolidierungsprozessen eine besondere Bedeutung zukommt. Für die Gestaltung von selbstorganisierten Lernprozessen sind derartige Befunde von großem Interesse. Vielfach wird in neurowissenschaftlichen Untersuchungen mit artifiziellem Material wie zum Beispiel sinnlosen Silben gearbeitet. Es wäre zu überlegen, ob stattdessen schulrelevantes Material wie zum Beispiel englische Vokabeln eingesetzt werden könnte. Experimentell kontrollierte Variationen im natürlichen Umfeld bieten sich bezüglich der Erforschung von Konsolidierungsprozessen geradezu an.

6. *Welche Möglichkeiten der Fehlerverarbeitung gibt es, und wie wirkt sich diese auf den weiteren Lernprozess aus?*

Am Anfang eines Lernprozesses steht das Versagen: Eine Anforderung kann gar nicht oder nur unzureichend bewältigt werden. Mit anderen Worten: Es kommt zu Fehlern. Die Verarbeitung von Fehlerrückmeldungen ist ein essenzieller Bestandteil des Lernens, und aus der empirischen Lehr-Lern-Forschung ist bekannt, dass hier große interindividuelle Unterschiede zu beobachten sind. Zum Umgang mit Fehlern beim schulischen Lernen gibt es großen Forschungsbedarf. Gegenwärtig ist nur rudimentär geklärt, unter welchen Umständen es für den Lernprozess sinnvoll sein kann, Schüler Fehler machen zu lassen, und wo Fehler vermieden werden sollten, weil sie sich negativ auf den weiteren Lernverlauf auswirken. Wie sich ein produktiver und ein weniger produktiver Umgang mit Fehlern im Gehirn des Lernenden abbilden, ist für die Lehr-Lern-Forschung von großem Interesse.

7. *Können interindividuelle Unterschiede in der Effizienz der Gehirnfunktionen auf der Ebene der kortikalen Informationsverarbeitung kompensiert werden?*

Aus der Expertiseforschung, der Forschung zur geistigen Entwicklung im Kindesalter und der Forschung zur Leistungsentwicklung in der Schule, ist bekannt, dass eine gut strukturierte, laborierte Wissensbasis eine notwendige und hinreichende Bedingung für Leistung ist. Sobald Vorwissen als Prädiktor einbezogen wird, verlieren Intelligenzunterschiede für die Erklärung von Leistungsunterschieden an Bedeutung. Diese Ergebnisse ziehen natürlich keineswegs die Existenz von Intelligenzunterschieden in Zweifel. Unbestritten ist, dass die in Intelligenztests abgebildeten Leistungsunterschiede ihre Grundlage in der Effizienz von Hirnfunktionen haben, die wiederum teilweise genetischen Ursprungs sind. Auch wenn sich auf der Leistungsebene bei hinreichendem Vorwissen keine Einflüsse von Intelligenzunterschieden zeigen, könnten sich doch intelligente und weniger intelligente Personen in der Art der Informationsverarbeitung auf kortikaler Ebene unterscheiden. Ein Blick in das Gehirn von unterschiedlich intelligenten Personen, die Aufgaben aus Gebieten bearbeiten, für die sie reichhaltiges Vorwissen mitbringen, kann interessante Erkenntnisse zur Frage der Verankerung von Intelligenzunterschieden im Gehirn liefern.

8. *Lassen sich Unterschiede in den Lernverläufen auf Unterschiede in der kortikalen Informationsverarbeitung zurückführen?*

Ob erfolgreich gelernt wurde, zeigt sich in Form von Leistungssteigerung: Eine Anforderung, die zuvor nicht bewältigt werden konnte, kann nun bewältigt werden. Die dafür benötigte Zeit kann sehr stark variieren. Ein einziger Lerndurchgang kann bereits zum Ziel führen, aber es kann auch sein, dass erst die ausdauernde und von vielen Rückschlägen begleitete Beschäftigung mit dem Lerngegenstand zum Erfolg führt. In der Lehr-Lern-Forschung unterscheidet man zwischen Lernen und Leistung, weil davon ausgegangen wird, dass sich bereits grundlegende Veränderungen in der Wissensstruktur vollziehen, noch ehe das Leistungskriterium erreicht wird. Auch wenn zum Beispiel erst als Folge eines Aha-Erlebnisses ein abrupter Leistungsanstieg zu beobachten ist, wurde zuvor bereits gelernt. Allerdings ist die Unterscheidung zwischen Leistung und Lernen eine rein theoretische, solange Leistung der einzige Indikator für Lernen ist. Mit einiger Mühe kann es zwar manchmal gelingen, bereits Vorläuferleistungen für einen erfolgreichen Lernprozess zu identifizieren, aber dazu bedarf es einer sehr intensiven und zeitaufwändigen Auseinandersetzung mit dem jeweiligen Inhaltsgebiet. Für die Lehr-Lern-Forschung wäre es von außerordentlichem Gewinn, wenn man schon vor Erreichen des Leistungskriteriums Indikatoren für einen erfolgreichen Lernprozess finden könnte.

9. *Lassen sich unterschiedliche kortikale Aktivitäten in Abhängigkeit vom Aufgabenformat finden?*

Im Bereich der Logik, der Mathematik und der Naturwissenschaften wurde in sehr vielen Untersuchungen an unterschiedlichen Altersgruppen nachgewiesen, dass die Schwierigkeit bei formal gleichen Aufgaben in Abhängigkeit vom Kontext und der Situation sehr stark variieren kann. Dies ist beispiels-

weise bei mathematischen Textaufgaben der Fall. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass in Kontexten, in denen die Zahlen als Instrumente zum Zählen verstanden werden können, an so genannte privilegierte numerische Konzepte angeknüpft werden kann. Auch Aufgaben, in denen natürliche Häufigkeiten vorkommen, sind deutlich einfacher als Wahrscheinlichkeitsaufgaben. Intraindividuelle Unterschiede in den Hirnaktivitäten in Abhängigkeit vom Aufgabenformat könnten in vielerlei Hinsicht Aufschluss geben über die Funktionsweise des menschlichen Gehirns. Da auf der Leistungsebene sehr große Diskrepanzen in der Bearbeitung von Aufgaben unterschiedlichen Formats zu beobachten sind, sollten sich diese Unterschiede auch in der Hirnaktivierung zeigen.

#### *10. Wie verändern sich Hirnfunktionen in Abhängigkeit von Lernumgebungen?*

Bei der Gestaltung und Vorgabe von Lernmaterial gibt es sehr viele unterschiedliche Optionen, zum Beispiel hinsichtlich der Frage nach der Integration von Bildern und Texten. In der Lehr-Lern-Forschung wird insbesondere die Gestaltung von computergestützten Lerngelegenheiten vor dem Hintergrund einer optimalen Ausnutzung des Arbeitsgedächtnisses diskutiert. Wie sich visuell und auditiv dargebotene Informationen sinnvoll ergänzen können, wird insbesondere unter Berücksichtigung des Arbeitsspeichermodells von Baddeley (siehe Kap. 6) erforscht. Ein Blick in das Gehirn von Personen, die sich in einer nach kognitionswissenschaftlichen Prinzipien konstruierten Lerngelegenheit befinden, kann Hinweise darauf geben, ob die theoretischen Annahmen, die in die Gestaltung dieser Lerngelegenheit eingegangen sind, ihre Berechtigung haben. Computergestützte Lerngelegenheiten können so gestaltet werden, dass die methodischen Voraussetzungen für die Erfassung von Hirnaktivitäten erfüllt sind.

### **13.2 Abschließende Bewertung und Empfehlungen für die Forschungsförderung**

Obwohl kurzfristig nicht zu erwarten ist, dass sich schulisches Lernen mit Hilfe der Hirnforschung optimieren lässt, kann doch davon ausgegangen werden, dass Methoden der Hirnforschung zukünftig dazu beitragen, manche Aspekte des schulischen Lernens besser erklären zu können. Gleichzeitig können Befunde und Forschungsparadigmen der Lehr-Lern-Forschung ihren Beitrag dazu leisten, typisch menschliche Hirnfunktionen besser zu verstehen. Es sollten Voraussetzungen für interdisziplinäre Diskussionen geschaffen werden, aus denen sich dann interessante und umsetzbare Fragestellungen entwickeln. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt würde eine sinnvolle Förderung darin bestehen, möglichst viele interessierte Wissenschaftler aus unterschiedlichen Disziplinen in die Diskussion einzubeziehen. Ergebnisse und Paradigmen aus unterschiedlichen Forschungsrichtungen sollten in gemeinsamen Workshops ausgetauscht werden und auf dieser Grundlagen könnten erfolgversprechende Forschungsfragen präzisiert und auf ihre Machbarkeit hin überprüfen werden.

In der konkreten Umsetzung könnte dies wie folgt aussehen: Mindestens eine Person aus der Lehr-Lern-Forschung und eine Person aus der neurowissen-

schaftlichen Forschung beantragen beim BMBF Mittel für einen Workshop, zu dem in- und ausländische Wissenschaftler eingeladen werden. Auf diesem Workshop sollten konkrete Designs geplant und Kooperationen etabliert werden. Der Workshop wird rechtzeitig auf der Homepage bekannt gegeben und bisher nicht angesprochene Wissenschaftler können die Teilnahme beantragen.

Im Anschluss an einen Workshop können Anträge auf Forschungsförderung für konkrete Untersuchungen gestellt werden. Die Untersuchungen sollten so angelegt sein, dass am Ende der Laufzeit des Projekts eine Publikation bei einer internationalen Zeitschrift mit Peer-Reviewsystem eingereicht wird. Die Genehmigung von Folgeanträgen hängt im Wesentlichen von der Qualität der Zeitschriftenpublikationen ab.

Alle an der BMBF-Leitvision „Das Denken verstehen“ beteiligten Disziplinen sollten darüber hinaus aufgerufen werden, im konstruktiven Diskurs neue, die bisherigen Grenzen des Faches überwindende Forschungsfragestellungen und -ansätze zu entwickeln. Insofern beschreiben die in Kapitel 13.1. benannten Fragestellungen auch nicht ein in sich abgeschlossenes Forschungsprogramm, sondern sie bilden den Auftakt für einen dynamischen Forschungsprozess, in dem sich alle Beteiligten offen neuen Entwicklungen in den jeweiligen Teildisziplinen zuwenden und sie konstruktiv aufnehmen und weiterentwickeln müssen.

# Literatur

- Ackerman, P. L. (1986). Individual differences in information processing: An investigation of intellectual abilities and task performance. *Intelligence*, 10, 101-139.
- Ackerman, P. L., Beier, M. E., & Boyle, M. O. (2002). Individual differences in working memory within a nomological network of cognitive and perceptual speed abilities. *Journal of Experimental Psychology, General*, 131, 567-589.
- Aine, C. J. (1995). A conceptual overview of critique of functional neuroimaging techniques in humans: I. MRI/fMRI and PET. *Critical Reviews in Neurobiology*, 9, 229-309.
- Alpert, N. M., Badgaiyan, R. D., Livni, E., & Fischman, A. J. (2003). A novel method for non-invasive detection of neuromodulatory changes in specific neurotransmitter systems. *NeuroImage*, 19, 1049-1060.
- Alzheimer, A. (1907). Über eine eigenartige Erkrankung der Hirnrinde. *Allgemeine Z. Psychiatrie Psychisch-Gerichtliche Med.*, 64, 146-148.
- Andersen, S. L. (2003). Trajectories of brain development: point of vulnerability or window of opportunity? *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 27, 3-18.
- Andreasen, N. C., O'Leary, D. S., Arndt, S., Cizadlo, T., Rezai, K., Watkins, G. L., Boles Ponto, L. L., & Hichwa, R. D. (1995a). I. PET studies of memory: novel and practiced free recall of complex narratives. *NeuroImage*, 2, 284-295.
- Andreasen, N. C., O'Leary, D. S., Cizadlo, T., Arndt, S., Rezai, K., Watkins, G. L., Boles Ponto, L. L., & Hichwa, R. D. (1995b). II. PET studies of memory: novel versus practiced free recall of word lists. *NeuroImage*, 2, 296-305.
- Antonova, E., Sharma, T., Morris, R., & Kumari, V. (2004). The relationship between brain structure and neurocognition in schizophrenia: a selective review. *Schizophrenia Research*, 70, 117-145.
- Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory : A proposed system an its control processes. In K. W. Spence (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (pp. 89-195). New York: Academic Press.
- Baddeley, A. (1996). The fractionation of working memory. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 93, 13468-13472.
- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer: A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 417-423.
- Baddeley, A. D. (2002). Is working memory still working? *European Psychologist*, 7, 85-97.
- Baddeley, A. (2003a). Working memory and language: an overview. *Journal of Communication Disorders*, 36, 189-208.
- Baddeley, A. (2003b). Working memory: Looking back and looking forward. *Nature Reviews Neuroscience*, 4, 829-839.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1974). Working memory. In G. A. Bower (Ed.), *Recent advances in learning and motivation* (Vol. 8, pp. 47-90). New York: Academic Press.
- Baird, A. A., Kagan, J., Gaudette, T., Walz, K. A., Hershlag, N., & Boas, D. A. (2002). Frontal lobe activation during object permanence: Data from near-infrared spectroscopy. *NeuroImage*, 16, 1120-1126.
- Bartenstein, P. (2004). PET in neuroscience – dopaminergic, GABA/benzodiazepine, and opiate system. *Nuklearmedizin-Nuclear Medicine*, 43, 33-42.
- Basar, E., Basar-Eroglu, C., Karakas, S., & Schürmann, M. (2001). Gamma, alpha, delta, and theta oscillations govern cognitive processes. *International Journal of Psychophysiology*, 39, 241-248.

- Basar-Eroglu, C., Strüber, D., Schürmann, M., Stadler, M., & Basar, E. (1996). Gamma-band responses in the brain: A short review of psychophysiological correlates and functional significance. *International Journal of Psychophysiology*, 24, 101-112.
- Bastiaansen, M., & Hagoort, P. (2003). Event-induced theta responses as a window for the dynamics of memory. *Cortex*, 29, 967-992.
- Baumert, J., Kunter, M., Brunner, M., Krauss, S., Blum, W., & Neubrand, M. (2004). Mathematikunterricht aus der Sicht der PISA-Schülerinnen und -Schüler und ihrer Lehrkräfte. In M. Prenzel, J. Baumert, W. Blum, R. Lehmann, D. Leutner, M. Neubrand & et al. (Eds.), *PISA 2003: Der Bildungsstand der Jugendlichen in Deutschland – Ergebnisse des zweiten internationalen Vergleichs* (pp. 314-354). Münster: Waxmann.
- Berger, H. (1929). Über das Elektroencephalogramm des Menschen. *Arch. Psychiat. Nerv.-Krankh.*, 87, 527-570.
- Binder, J. R., Frost, J. A., Hammeke, T. A., Bellgowan, P. S. F., Rao, S. M., & Cox, R. W. (1999). Conceptual processing during the conscious resting state: A functional MRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11, 80-93.
- Birbaumer, N. (1984). Operant control of slow cortical potentials: a tool in the investigation of the potentials' meaning and its relation to attentional dysfunction. In T. Elbert, B. Rockstroh, W. Lutzenberger, & N. Birbaumer (Eds.), *Self-regulation of the brain and behaviour* (pp. 227-239). New York: Springer.
- Birbaumer, N., Elbert, T., Rockstroh, B., & Lutzenberger, W. (1981). Biofeedback on event-related potentials of the brain. *International Journal of Psychology*, 16, 389-415.
- Birbaumer, N., & Flor, H. (1999). Applied psychophysiology and learned physiological regulation. *App Psychophysiol Biofeedback*, 24, 35-37.
- Birbaumer, N., Ghanayim, N., Hinterberger, T., Iversen, I., Kotchoubey, B., Kubler, A., Perelmouter, J., Taub, E., & Flor, H. (1999). A spelling device for the paralysed. *Nature*, 398, 297-298.
- Blakemore, S.J., & Frith, U. (2005). *The learning brain. Lessons for education*. London: Blackwell.
- Boas, G. (2004). Noninvasive imaging of the brain. *Optics & Photonics News*, 15, 52-55.
- Boedeker, K. (2004). *Die Entwicklung intuitiven physikalischen Wissens im Kulturvergleich*. Dissertation angenommen an der Freien Universität Berlin.
- Brodmann, K. (1908). Beiträge zur histologischen Lokalisation der Grosshirnrinde. VI. Mitteilung. Die Cortexgliederung des Menschen. *Journal für Psychologie und Neurologie*, 10, 231-246.
- Brodmann, K. (1909). *Vergleichende Lokalisationslehre der Grosshirnrinde*. Leipzig: J. A. Barth.
- Byrnes, J. P. (2001). *Minds, brains, and learning: understanding the psychological and educational relevance of neuroscientific research*. New York: Guilford Press.
- Cabeza, R., & Nyberg, L. (2000). Imaging Cognition II: An empirical review of 275 PET and fMRI studies. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 1-47.
- Carpenter, P. A., & Just, M. A. (1975). Sentence comprehension: A psycholinguistic processing model of verification. *Psychological Review*, 82, 45-73.
- Casey, B. J., Giedd, J. N., & Thomas, K. M. (2000). Structural and functional brain development and its relation to cognitive development. *Biological Psychology*, 54, 241-257.
- Castellanos, F. X., Giedd, J. N., March, W. L., et al. (1996). Quantitative brain magnetic resonance imaging in attention-deficit hyperactivity disorder. *Arch. Gen. Psychiatry*, 53, 607-616.

- Castelli, F., Frith, C. D., Happé, F., & Frith, U. (2002). Autism, Asperger syndrome and brain mechanisms for the attribution of mental states to animated shapes. *Brain*, 125, 1839-1849.
- Castro-Caldas, A., Petersson, K. M., Reis, A., Stone-Elander, S., & Ingvar, M. (1998). The illiterate brain. Learning to read and write during childhood influences the functional organization of the adult brain. *Brain*, 121, 1053-1063.
- Clarke, J. (1993). The new superconducting electronics. In H. Weinstock & R. W. Ralston (Eds.), *The new superconducting electronics* (p. 123). Dordrecht: Kluwer.
- Collette, F., & van der Linden, M. (2002). Brain imaging of the central executive component of working memory. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 26, 105-125.
- Colom, R., Rebollo, I., Palacios, A., Juan-Espinosa, M., & Kyllonen, P. C. (2004). Working memory is (almost) perfectly predicted by g. *Intelligence*, 32, 277-296.
- Conway, A. R. A., Cowan, N., Bunting, M. F., Theriault, D. J., & Minkoff, S. R. B. (2002). A latent variable analysis of working memory capacity, short-term memory capacity, processing speed, and general fluid intelligence. *Intelligence*, 30, 163-183.
- Conway, A. R. A., Kane, M. J., & Engle, R. W. (2003). Working memory capacity and its relation to general intelligence. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 547-552.
- Cowan, Maxwell (1983) *Die Entwicklung des Gehirns*. Heidelberg: Spektrum der Wissenschaft, 101 – 110.
- Daneman, M., & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 19, 450-466.
- Daneman, M., & Merikle, P. M. (1996). Working memory and language comprehension: A meta-analysis. *Psychonomic Bulletin and Review*, 3, 422-433.
- deCharms, R. C., Christoff, K., Glover, G. H., Pauly, J. M., Whitfield, S., & Gabrieli, J. D. E. (2004). Learned regulation of spatially localized brain activation using real-time fMRI. *NeuroImage*, 21(1), 436-443.
- Deitmer, J. W. (2000). Sind Gliazellen an der synaptischen Übertragung beteiligt? *Neuroforum*, 4, 269-273.
- Dehaene, S. (1997). *The number sense*. New York: Oxford University Press, Cambridge (UK): Penguin Press.
- DeLoache, J. S., et al. (2004). Scale errors offer evidence for a perception-action dissociation early in life. *Science*, 304, 1027-1029.
- Dennett, D. (1987). *The intentional stance*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Duncan, J., Seitz, R. J., Kolodny, J., Bor, D., Herzog, H., Ahmed, A., Newell, F. N., & Emslie, H. (2000). A neural basis for general intelligence. *Science*, 289, 457-460.
- Ebrahimi, T., Vesin, J. -M., & Garcia, G. (2003). Brain-computer interface in multimedia communication. *IEEE Signal Processing Magazine* 20(1), 14-24.
- Egner, T., & Gruzelier, J. H. (2001). Learned self-regulation of EEG frequency components affects attention and event-related brain potentials in humans. *Neuroreport*, 12, 4155-4159.
- Egner, T., & Gruzelier, J. H. (2003). Ecological validity of neurofeedback: modulation of slow wave EEG enhances musical performance. *Neuroreport*, 14, 1225-1228.
- Egner, T., & Gruzelier, J. H. (2004). EEG Biofeedback of low beta band components: frequency-specific effects on variables of attention and event-related brain potentials. *Clin Neurophysiol*, 115, 131-139.
- Egner, T., Strawson, E., & Gruzelier, J. H. (in press). EEG signature and phenomenology of alpha/theta neurofeedback training versus mock feedback. *Applied Psychophysiology and Biofeedback*.
- Engle, R. W., Tuholski, S. W., Laughlin, J. E., & Conway, A. R. A. (1999). Working memory, short-term memory, and general fluid intelligence: A latent-variable approach. *Journal of Experimental Psychology*, 128, 309-331.

- Fletcher, P. C., & Henson, R. N. A. (2001). Frontal lobes and human memory. Insights from functional neuroimaging. *Brain*, 124, 849-881.
- Frank, M. J., Seeberger, L. C., & O'Reilly, R. C. (2004). By carrot or by stick: Cognitive reinforcement learning in Parkinsonism. *Science*, 306, 1940-1943.
- Frith, U. (2001). What framework should we use for understanding developmental disorders? *Developmental Neuropsychology*, 20, 555-563.
- Fuchs, T., Birbaumer, N., Lutzenberger, W., Gruzelier, J. H., & Kaiser, J. (2003). Neurofeedback treatment for attention-deficit/hyperactivity disorder in children: a comparison with methylphenidate. *Appl Psychophysiol Biofeedb*, 28, 1-12.
- Fuster, J. M. (1988). *The prefrontal cortex: Anatomy, physiology, and neuropsychology of the frontal lobe*. New York: Raven.
- Gabrieli, J. D. E. (1998). Cognitive Neuroscience of human memory. *Annual Review of Psychology*, 49, 87-115.
- Gardner, H. (1983). *Frames of mind: the theory of multiple intelligences*. New York: Basic Books.
- Gaser, C., & Schlaug, G. (2003). Brain structures differ between musicians and non-musicians. *The Journal of Neuroscience*, 23, 9240-9245.
- Geary, D. C. (1996). Sexual selection and sex differences in mathematical abilities. *Behavioural and Brain Sciences*, 19(2), 229-284.
- Goldman, R. I., Stern, J. M., Engel, J., Jr., & Cohen, M. S. (2000). Acquiring simultaneous EEG and functional MRI. *Clinical Neurophysiology*, 111, 1974-1980.
- Goswami, U. (2003). Why theories about developmental dyslexia require developmental designs. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 534-540.
- Goswami, U. (2004). Neuroscience and education. *British Journal of Educational Psychology*, 74, 1-14.
- Grabner, R. H., Fink, A., Stipacek, A., Neuper, C., & Neubauer, A. C. (2004). Intelligence and working memory systems: Evidence of neural efficiency in alpha band ERD. *Cognitive Brain Research*, 20, 212-225.
- Grabner, R. H., Stern, E., & Neubauer, A. C. (2003). When intelligence loses its impact: Neural efficiency during reasoning in a familiar area. *International Journal of Psychophysiology*, 49, 89-98.
- Grafton, S. T., Mazziotta, J. C., Presty, S., Friston, K. J., Frackowiak, R. S., & Phelps, M. E. (1992). Functional anatomy of human procedural learning determined with regional cerebral blood flow and PET. *Journal of Neuroscience*, 12, 2542-2548.
- Gray, J. R., & Thompson, P. M. (2004). Neurobiology of intelligence: science and ethics. *Nature Reviews Neuroscience*, 5, 471-482.
- Guger, C., Schlögl, A., Neuper, C., Walterspacher, D., Strein, T., & Pfurtscheller, G. (2001). Rapid prototyping of an EEG-based Brain-Computer-Interface (BCI). *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 9(1), 49-58.
- Habib, R., McIntosh, A. R., & Tulving, E. (2000). Individual differences in the functional neuroanatomy of verbal discrimination learning revealed by positron emission tomography. *Acta Psychologica*, 105, 141-157.
- Haier, R. J. (2001). PET studies of learning and individual differences. In J. L. McClelland & R. S. Siegler, *Mechanisms of cognitive development: Behavioral and neural perspectives* (pp. 123-148). New Jersey: Erlbaum.
- Haier, R. J. (2003). Brain imaging studies of intelligence: Individual differences and neurobiology. In R. J. Sternberg, J. Lautrey & T. I. Lubart (Eds.), *Models of intelligence: International perspectives* (pp. 185-193). Washington, DC: American Psychological Association.
- Haier, R. J., Jung, R. E., Yeo, R. A., Head, K., & Alkire, M. T. (2004). Structural brain variation and general intelligence. *NeuroImage*, 23, 425-433.

- Haier, R. J., Siegel, B. V., MacLachlan, A., Soderling, E., Lottenberg, S., & Buchsbaum, M. S. (1992a). Regional glucose metabolic changes after learning a complex visuospatial/motor task: a positron emission tomographic study. *Brain Research*, 570, 134-143.
- Haier, R. J., Siegel, B. V., Nuechterlein, K. H., Hazlett, E., Wu, J. C., Paek, J., Browning, H. L., & Buchsbaum, M. S. (1988). Cortical Glucose Metabolic Rate Correlates of Abstract Reasoning and Attention Studied with Positron Emission Tomography. *Intelligence*, 12, 199-217.
- Haier, R. J., Siegel, B., Tang, C., Abel, L., & Buchsbaum, M. S. (1992b). Intelligence and changes in regional cerebral glucose metabolic rate following learning. *Intelligence*, 16, 415-426.
- Haxby, J. V., Gobbini, M. L., Furey, M. L., Ishai, A., Schouten, J. L., & Pietrini, P. (2001). Distributed and overlapping representations of faces and objects in ventral temporal cortex. *Science*, 293, 2425-2430.
- Hebb, D. O. (1949). *The organization of behaviour*. New York: Wiley.
- Heeger, D. J., & Ress, D. (2002). What does fMRI tell us about neuronal activity? *Nature Reviews Neuroscience*, 3, 142-151.
- Heyder, K., Suchan, B., & Daum, I. (2004). Cortico-subcortical contributions to executive control. *Acta Psychologica*, 115, 271-289.
- Huttenlocher, P. R., Dabholkar, A. S. (1997). Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *Journal of Comparative Neurology*, 387, 167-178.
- Jackson, J. H. (1876). Case of large cerebral tumour without optic neuritis and with left hemiplegia and imperception. *R. London Ophthal. Hosp. Rep.* 8, 434-441.
- Jäncke, L. (2005). *Methoden der Bildgebung in der Psychologie und den kognitiven Neurowissenschaften*. Berlin: Kohlhammer.
- Jay, T. M. (2003). Dopamine: A potential substrate for synaptic plasticity and memory mechanisms. *Progress in Neurobiology*, 69, 375-390.
- Jensen, A. R. (1998). *The g factor: the science of mental ability*. Westport, CT: Praeger.
- Jöbsis, F. (1977). Non-invasive infrared monitoring of cerebral and myocardial oxygen sufficiency and circulatory parameters. *Science*, 198, 1264-1267.
- Johnson, M. H., Munakata, Y., & Gilmore, R. O. (2002). *Brain development and cognition: A reader*. Oxford: Blackwell.
- Jost, K., Beinhoff, U., Hennighausen, E., & Rösler, F. (2004). Facts, rules, and strategies in single-digit multiplication: Evidence from event-related brain potentials. *Cognitive Brain Research*, 20, 183-193.
- Kail, R., & Hall, L. K. (2001). Distinguishing short-term memory from working memory. *Memory & Cognition*, 29, 1-9.
- Kamiya, J. (1968). Conscious control of brainwaves. *Psychol Today* 1, 56-60.
- Kane, M. J., & Engle, R. W. (2002). The role of the prefrontal cortex in working memory capacity, executive attention, and general fluid intelligence: an individual differences perspective. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9, 637-671.
- Kennan, R. P., Horovitz, S. G., Maki, A., Yamashita, Y., Koizumi, H., & Gore, J. C. (2002). Simultaneous recording of event-related auditory oddball response using transcranial near infrared optical topography and surface EEG. *NeuroImage*, 16, 587-59
- Kim, S.-G. (2003). Progress in understanding functional imaging signals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100, 3550-3552.
- Kim, J. (2005). *Physicalism, or something near enough*. Princeton and Oxford: Princeton University Press.
- Kintsch, W. (1998). *Comprehension: A paradigm for cognition*. New York: Cambridge University Press.

- Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: A review and analysis. *Brain Research Reviews*, 29, 169-195.
- Klimesch, W., Sauseng, P., & Gerloff, C. (2003). Enhancing cognitive performance with repetitive transcranial magnetic stimulation at human individual alpha frequency. *Europ. J Neurosci*, 17, 1129-1133.
- Koepp, M. J., Gunn, R. N., Lawrence, A. D., Cunningham, V. J., Dagher, A., Jones, T., Brooks, D. J., Bench, C. J., & Grasby, P. M. (1998). Evidence for striatal dopamine release during a video game. *Nature*, 393, 266-268.
- Koizumi, H., Yamashita, Y., Maki, A., Yamamoto, T., Ito, Y., Itagaki, H., & Kennan, R. (1999). Higher-order brain function analysis by trans-cranial dynamic near-infrared spectroscopy imaging. *Journal of Biomedical Optics*, 4, 403-413.
- Kosslyn, S. (1999). If neuroimaging is the answer, what is the question? (Review). *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.*, 354(1387), 1283-94.
- Kotchoubey, B., Strehl, U., Uhlmann, C., et al. (2001). Modification of slow cortical potentials in patients with refractory epilepsy: a controlled outcome study. *Epilepsia*, 42(3), 406-416.
- Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2000). Electrophysiology reveals semantic memory use in language comprehension. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 463-470.
- Kyllonen, P. C., & Christal, R. E. (1990). Reasoning ability is (little more than) working memory capacity?! *Intelligence*, 14, 389-433.
- Laruelle, M. (2000). Imaging synaptic neurotransmission with in vivo binding competition techniques: A critical review. *Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism*, 20, 423-451.
- Laufs, H., Kleinschmidt, A., Beyerle, A., Eger, E., Salek-Haddadi, A., Preibisch, C., & Krakow, K. (2003). EEG-correlated fMRI of human alpha activity. *NeuroImage*, 19, 1463-1476.
- Levy, F. (1991). The dopamine theory of attention deficit hyperactivity disorder (ADHD). *Australian and New Zealand Journal of Psychiatry*, 25, 277-283.
- Lickliter, R. (2000). The role of sensory stimulation in perinatal development. *Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics*, 21, 437-447.
- Linden, M., Habib, T., & Radojevic, V. (1996). A controlled study of the effects of EEG biofeedback on cognition and behaviour of children with attention deficit disorder and learning disabilities. *Biofeedb Self-Reg*, 21, 35-51.
- Lissauer, H. (1890). Ein Fall von Seelenblindheit nebst einen Beitrage zur Theorie derselben. *Arch. Psychiatrie Nervenkrankheiten*, 21, 222-270.
- Lloyd, D. (2000). Terra cognita: From functional neuroimaging to the map of the mind. *Brain and Mind*, 1, 93-116.
- Logothetis, N. K., Pauls, J., Augath, M., Trinath, T., & Oeltermann, A. (2001). Neurophysiological investigation of the basis of the fMRI signal. *Nature*, 412, 150-157.
- Lopes da Silva, F. (1991). Neural mechanisms underlying brain waves: from neural membranes to networks. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, 79, 81-93.
- Lopes da Silva, F. H., & Pfurtscheller, G. (1999). Basic concepts on EEG synchronization and desynchronization. In G. Pfurtscheller & F. H. Lopes da Silva (Eds.), *Event-Related Desynchronization, Handbook of Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, Revised Series, Vol. 6* (pp. 3-11). Amsterdam: Elsevier.
- Lubar J. F. (1997). Neocortical dynamics: implications for understanding the role of neurofeedback and related techniques for the enhancement of attention. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 22(2), 111-26.
- Lubar, J. F., & Lubar, J. O. (1999). Neurofeedback assessment and treatment for attention deficit/hyperactivity disorders. In J. R. Evans & A. Abarbanel (Eds.), *Introduc-*

- tion to quantitative EEG and neurofeedback (pp. 103-146). San Diego: Academic Press.
- Lubar, J. F., Swartwood, M. O., Swartwood, J. N., & O'Donnell, P. H. (1995). Evaluation of the effectiveness of EEG neurofeedback training for ADHD in a clinical setting as measured by changes in T. O. V. A. scores, behavioral ratings, and WISC-R performance. *Biofeedb Self-Reg*, 20, 83-99.
- Mackintosh, N. J. (1998). *IQ and human intelligence*. Oxford: Oxford University Press.
- Maguire, E. A., Frackowiak, R. S. J., & Frith, C. D. (1997). Recalling Routes around London: Activation of the Right Hippocampus in Taxi Drivers. *The Journal of Neuroscience*, 17, 7103-7110.
- Maguire, E. A., Gadian, D. G., Johnsrude, I. S., Good, C. D., Ashburner, J., Frackowiak, R. S. J., & Frith, C. D. (2000). Navigation-related structural change in the hippocampus of taxi drivers. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 97, 4398-4403.
- Marshall, J. C., & Fink, G. R. (2003). Cerebral localization, then and now. *NeuroImage*, 20, 2-7.
- McClure, S. M., York, M. K., & Montague, P. R. (2004). The neural substrates of reward processing in humans: The modern role of fMRI. *Neuroscientist*, 10, 260-268.
- McClure, W. F. (2003). 204 years of near infrared technology: 1800-2003. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 11, 487-518.
- McIntosh, A. R. (2000). Towards a network theory of cognition. *Neural Networks*, 13, 861-870.
- Metha, M. A., Manes, F. F., Magnolfi, G., Sahakian, B. J., & Robbins, T. W. (2004). Impaired set-shifting and dissociable effects on tests of spatial working memory following the dopamine D-2 receptor antagonist sulpiride in human volunteers. *Psychopharmacology*, 176, 331-342.
- Miller, G. A., Galanter, E., & Pribram, K. H. (1960). *Plans and the structure of behavior*. New York: Holt, Rinehart & Winston.
- Miyake, A., & Shaw, P. (1999). *Models of working memory. Mechanisms of active maintenance and executive control*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Monastra, V. J., Monastra, D. M., & George, S. (2002). The effects of stimulant therapy, EEG biofeedback, and parenting style on the primary symptoms of attention-deficit/hyperactivity disorder. *Appl. Psychophysiol Biofeedb*, 27, 231-249.
- Monderer, R. S., Harrison, D. M., & Haut, S. R. (2002). Neurofeedback and epilepsy. *Epilepsy & Behavior*, 3(3), 214-218.
- Morton, J., & Frith, U. (2001). Why we need cognition. In E. Dupoux (Ed.), *Festschrift für Jacques Mehler* (pp. 192-214). Cambridge, MA: MIT Press.
- Mulholland, T. (1995). Human EEG, behavioral stillness and biofeedback. *International Journal of Psychophysiology*, 19, 263-279.
- Neubauer, A., Freudenthaler, H. H., & Pfurtscheller, G. (1995). Intelligence and Spatio-temporal Patterns of Event-Related Desynchronization (ERD). *Intelligence*, 20, 249-266.
- Neubauer, A. C., Grabner, R. H., Freudenthaler, H. H., Beckmann, J. F., & Guthke, J. (2004). Intelligence and individual differences in becoming neurally efficient. *Acta Psychologica*, 116, 55-74.
- Neuper, C., & Pfurtscheller, G. (1999). Motor imagery and ERD. In G. Pfurtscheller & F. H. Lopes da Silva (Eds.), *Event-related desynchronization. Handbook of Electroencephalography and Clinical Neurophysiology* (Revised Edition, Vol. 6, pp. 303-325). Amsterdam: Elsevier.
- Neuper, C., Müller, G., Kübler, A., Birbaumer, N., & Pfurtscheller, G. (2003). Clinical application of an EEG-based brain-computer interface: a case study in a patient with severe motor impairment. *Clinical Neurophysiology*, 114, 399-409.

- Neuper, C., Schlögl, A., & Pfurtscheller, G. (1999). Enhancement of left-right sensorimotor EEG differences during feedback-regulated motor imagery. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 16(4), 373-82.
- Nichols, M. J., & Newsome, W. T. (1999). The neurobiology of cognition. *Nature*, 402, C35-C38.
- Nunez, P. L. (1995). *Neocortical dynamics and human EEG rhythms*. New York, NY: Oxford University Press.
- Obermaier, B., Neuper, C., Guger, C., & Pfurtscheller, G. (2001). Information transfer rate in a 5-classes brain-computer interface. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 9(3), 283-288.
- Olesen, P. J., Westerberg, H., & Klingberg, T. (2004). Increased prefrontal and parietal activity after training of working memory. *Nature Neuroscience*, 7, 75-79.
- Olson, D. R. (1996). Literate mentalities: Literacy, consciousness of language, and modes of thought. In R. David & N. Torrance (Eds.), *Modes of thought: Explorations in culture and cognition* (pp. 141-151). New York: Cambridge University Press.
- Pascual-Marqui, R. D., Lehmann, D., Koenig, T., Kochi, K., Merlo, M. C. G., Hell, D., & Koukkou, M. (1999). Low resolution brain electromagnetic tomography (LORETA) functional imaging in acute, neuroleptic-naïve, first-episode, productive schizophrenics. *Psychiatry Research: Neuroimaging*, 90, 169-179.
- Paterson, D., & Nordberg, A. (2000). Neuronal nicotinic receptors in the human brain. *Progress in Neurobiology*, 61, 75-111.
- Pauen, S. (2004). Zeitfenster der Gehirn- und Verhaltensentwicklung: Modethema oder Klassiker? *Zeitschrift für Pädagogik*, 50(4), 521-530.
- Penfield, W., & Jasper, H. (1954). *Epilepsy and the functional anatomy of the human brain*. Boston: Little, Brown.
- Petersen, S. E., van Mier, H., Fiez, J. A., & Raichle, M. E. (1998). The effects of practice on the functional anatomy of task performance. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 95, 853-860.
- Pfurtscheller, G., & Aranibar, A. (1977). Event-related cortical desynchronisation detected by power measurements of scalp EEG. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 42, 817-826.
- Pfurtscheller G., & Neuper C. (2001). Motor imagery and direct brain-computer communication (Invited paper). *Proceedings of the IEEE (Special Issue); Neural Engineering: Merging Engineering & Neuroscience*, 89(7), 1123-1134.
- Pfurtscheller, G., & Neuper, C. (2004). Brain-Computer Interface. In G. Adelman & B. H. Smith (Eds.), *Encyclopedia of Neuroscience* (3rd edition). Elsevier.
- Pfurtscheller, G., Neuper, C., Flotzingern D., & Pregenzer, M. (1997). EEG-based discrimination between imagination of right and left hand movement. *Electroenceph Clin. Neurophysiol*, 103(5), 1-10.
- Poldrack, R. A. (2000). Imaging brain plasticity: conceptual and methodological issues – a theoretical review. *NeuroImage*, 12, 1-13.
- Polyak, S. (1957). *The vertebrate visual system*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Posner, M. I., & Dehaene, S. (1994). Attentional networks. *Trends in Neurosciences*, 17, 75-79.
- Posner, M. I., & DiGirolamo, G. J. (2000). Cognitive neuroscience: Origins and promise. *Psychological Bulletin*, 126, 873-889.
- Posner, G., & Raichle, M. E. (1994). *Images of mind*. New York, NY: Scientific American Library.
- Posner, M. I., & Snyder, C. R. R. (1975). Attention and cognitive control. In R. L. Solso (Ed.), *Information processing and cognition*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.

- (1998). Behind the scenes of functional brain imaging: A historical and physiological perspective. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95, 765-772.
- Raichle, M. E. (2003). Functional brain imaging and human brain function. *The Journal of Neuroscience*, 23, 3959-3962.
- Raichle, M. E., Fiez, J. A., Videen, T. O., MacLeod, A-M. K., Pardo, J. V., Fox, P. T., & Peterson, S. E. (1994). Practice-related changes in human brain functional anatomy during nonmotor learning. *Cerebral Cortex*, 4, 8-26.
- Ramnani, N., Behrens, T. E. J., Penny, W., & Matthews, P. M. (in press). New approaches for exploring anatomical and functional connectivity in the human brain. *Biological Psychiatry*.
- Raven, J. C. (1958). *Advanced Progressive Matrices*. London: Lewis.
- Reichle, E. D., Carpenter, P. A., & Just, M. A. (2000). The neural bases of strategy and skill in sentence-picture verification. *Cognitive Psychology*, 40, 261-295.
- Risberg, J., Maximilian, A. V., & Prohovnik, I. (1977). Changes of cortical activity patterns during habituation to a reasoning test. A study with the 133XE inhalation technique for measurement of regional cerebral blood flow. *Neuropsychologia*, 15, 793-798.
- Roberts, L. E., Birbaumer, N., Rockstroh, B., Lutzenberger, W., & Elbert, T. (1989). Self-report during feedback regulation of slow cortical potentials. *Psychophysiology*, 26(4), 392-403.
- Rockstroh, B., Elbert, T., Birbaumer, N., Wolf, P., Dutching-Roth, A., Reker, M., Daum, I., Lutzenberger, W., & Dichgans, J. (1993). Cortical self-regulation in patients with epilepsies. *Epilepsy Research*, 14, 63-72.
- Rosenberg, J. R., Halliday, D. M., Breeze, P., & Conway, B. A. (1998). Identification of patterns of neuronal connectivity – partial spectra, partial coherence, and neuronal interactions. *Journal of Neuroscience Methods*, 83, 57-72.
- Rosenfeld, J. P., Rudell, A. P., & Fox, S. S. (1969). Operant control of neural events in humans. *Science*, 165, 821-823.
- Rösler, F., & Heil, M. (1998). Kognitive Psychophysiologie. In: F. Rösler (Ed.), *Ergebnisse und Anwendungen der Psychophysiologie* (pp. 165-224). Göttingen: Hogrefe.
- Rösler, F. (2005). Neurowissenschaftliche Theorien in der Psychologie. In: K. Pawlik (Ed.), *Psychologie*. Heidelberg: Springer.
- Rossiter, T. R. (2004). The effectiveness of neurofeedback and stimulant drugs in training ADHD: part I. review of methodological issues. *Appl. Psychophysiol Biofeedback*, 29(2), 95-112.
- Rossiter, T. R., & LaVaque, T. J. (1995). A comparison of EEG biofeedback and psychostimulants in treating attention deficit hyperactivity disorders. *Journal of Neurotherapy*, 1, 48-59.
- Sakai, K., Hikosaka, O., Miyauchi, S., Takino, R., Sasaki, Y., & Pütz, B. (1998). Transition of brain activation from frontal to parietal areas in visuomotor sequence learning. *The Journal of Neuroscience*, 18, 1827-1840.
- Sarter, M., Berntson, G. G., & Cacioppo, J. T. (1996). Brain imaging and cognitive neuroscience. *American Psychologist*, 51, 13-21.
- Savoy, R. L. (2001). History and future directions of human brain mapping and functional neuroimaging. *Acta Psychologica*, 107, 9-42.
- Schlögl, A., Neuper, C., & Pfurtscheller, G. (2002). Estimating the mutual information of EEG-based Brain-Computer communication. *Biomedizinische Technik*, 47(1-2), 3-8.
- Schultz, W. (2002). Getting formal with dopamine and reward. *Neuron*, 36, 241-263.

- Schwartz, G. E. (1979). Disregulation and systems theory: A behavioral framework for biofeedback and behavioral medicine. In N. Birbaumer & H. D. Kimmel (Eds.), *Biofeedback and self-regulation* (pp. 19-48). Hillsdale, N. J. : Lawrence Erlbaum.
- Sergent, J. (1994). Brain-imaging studies of cognitive functions. *Trends in Neurosciences*, 17, 221-227.
- Shaywitz, B. et al. (2002). Disruption of posterior brain systems for reading in children with developmental dyslexia. *Biological Psychiatry*, 20, 101-110.
- Shiffrin, R. M., & Schneider, W. (1977). Controlled and automatic human information processing: II. Perceptual learning automaticity, attending and a general theory. *Psychological Review*, 84, 127-190.
- Shulman, L. S. (1987). Knowledge and teaching: Foundations of the new reform. *Harvard Educational Review*, 57(1), 1-21.
- Sidtis, J. J., Strother, S. C., & Rottenberg, D. A. (2003). Predicting performance from functional imaging data: methods matter. *NeuroImage*, 20, 615-624.
- Simos, P. G., et al. (2002). Dyslexia-specific brain activation profile becomes normal following successful remedial training. *Neurology*, 58, 1203-1213.
- Siniatchin, M., Kropp, P., & Gerber, W. D. (2000). Neurofeedback – The significance of reinforcement and the search for an appropriate strategy for the success of self-regulation. *Appl. Psychophysiol. Biofeedback*, 25(3), 167-175.
- Smith, E. E., & Jonides, J. (2003). Executive control and thought. In L. R. Squire, F. E. Bloom, S. K. McConnell, J. L. Roberts, N. C. Spitzer & M. J. Zigmond (Eds.), *Fundamental neuroscience* (2<sup>nd</sup> ed., pp. 1377-1394). San Diego, CA: Academic Press.
- Sohn, M.-H., Goode, A., Koedinger, K. R., Stenger, V. A., Fissell, K., Carter, C. S., & Anderson, J. R. (2004). Behavioural equivalence, but not neural equivalence – neural evidence of alternative strategies in mathematical thinking. *Nature Neuroscience*, 7, 1193-1194.
- Stark, H., Rothe, T., Wagner, T., & Scheich, H. (2004). Learning a new behavioral strategy in the shuttle-box increases prefrontal dopamine. *Neuroscience*, 126, 21-29.
- Stark, H., & Scheich, H. (1997). Dopaminergic and serotonergic neurotransmission systems are differentially involved in auditory cortex learning: A long-term microdialysis study of metabolites. *Journal of Neurochemistry*, 68, 691-697.
- Staub, F., & Stern, E. (2002). The nature of teachers' pedagogical content beliefs matters for students' achievement gains: quasi-experimental evidence from elementary mathematics. *Journal of Educational Psychology*, 93, 144-155.
- Stepnoski, R. A., LaPorta, A., Racchia-Behling, F., Blonder, G. E., Slusher R. E., & Kleinfeld, D. (1991). Noninvasive detection of changes in membrane potential in cultured neurons by light scattering. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 88, 9382-9386.
- Sterman, M. B. (1996). Physiological origins and functional correlates of EEG rhythmic activities: implications for self-regulation. *Biofeedb Self-Reg*, 21, 3-33.
- Sterman, M. B. (2000). Basic concepts and clinical findings in the treatment of seizure disorders with EEG operant conditioning. *Clin Electroencephalogr* 31, 45-55.
- Sterman, M. B., et al. (1969). Electroencephalographic and behavioral studies of monomethyl hydrazine toxicity in the cat. Technical Report, Ohio: Air Systems Command, Wright Patterson Air Force Base.
- Stern, E. (2001). Intelligenz, Wissen, Transfer und der Umgang mit Zeichensystemen. In E. Stern & J. Guthke (Eds.), *Perspektiven der Intelligenzforschung* (pp. 163-204). Lengerich: Pabst Publisher.
- Stern, E., & Schumacher, R. (2004). Intelligentes Wissen als Lernziel. *Universitas*, 59(2), 121-134.

- Strangman, G., Culver, J. P., Thompson, J. H., & Boas, D. A. (2002). A quantitative comparison of simultaneous BOLD fMRI and NIRS recordings during functional brain activation. *NeuroImage*, 17, 719-731.
- Süß, H.-M., Oberauer, K., Wittmann, W. W., Wilhelm, O., & Schulze, R. (2002). Working memory capacity explains reasoning ability – and a little bit more. *Intelligence*, 30, 261-288.
- Swanson, J., Castellanos, F. X., Murias, M., LaHoste, G., & Kennedy, J. (1998). Cognitive neuroscience of attention deficit hyperactivity disorder and hyperkinetic disorder. *Current Opinion in Neurobiology*, 8(2), 263-271.
- Tallon-Baudry, C. (2003). Oscillatory synchrony and human visual cognition. *Journal of Physiology-Paris*, 97, 355-363.
- Tallon-Baudry, C., & Bertrand, O. (1999). Oscillatory gamma activity in humans and its role in object representation. *Trends in Cognitive Sciences*, 3, 151-162.
- Tansey, M. A. (1984). EEG sensorimotor rhythm biofeedback training: some effects on the neurologic precursors of learning disabilities. *International Journal of Psychophysiology*, 1, 163-177.
- Thompson, L., & Thompson, M. (1998). Neurofeedback combined with training in metacognitive strategies: effectiveness in students with ADD. *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 23(4), 243-63.
- Toga, A. W., & Mazziotta, J. C. (2002). *Brain mapping: The methods* (Second Edition). New York, NY: Academic Press.
- Tomasello, M. (2003). *Constructing a language: A usage-based theory of language acquisition*. Harvard University Press.
- Ungless, M. A. (2004). Dopamine: the salient issue. *Trends in Neurosciences*, 27, 702-706.
- Utz, S. W. (1994). The effect of instructions on cognitive strategies and performance in biofeedback. *J. Behavioral Medicine*, 17, 291-308.
- Vandenberghe, R., Dupont, P., Bormans, G., Mortelmans, L., & Orban, G. (1995). Blood flow in human anterior temporal cortex decreases with stimulus familiarity. *NeuroImage*, 2, 306-313.
- Varela, F., Lachaux, J. P., Rodriguez, E., & Martinerie, J. (2001). The brainweb phase synchronization and large-scale integration. *Nature Review Neuroscience*, 2, 229-239.
- Vernon, D., Egner, T., Cooper, N., Compton, T., Neilands, C., Sheri, A., & Gruzelier, J. H. (2003). The effect of training distinct neurofeedback protocols on aspects of cognitive performance. *International Journal of Psychophysiology*, 47, 75-85.
- Vidal, J. (1973). Toward direct brain-computer communication. *Ann Rev Biophysics Bioengng*, 157-180.
- Villringer, A., & Chance, B. (1997). Non-invasive optical spectroscopy and imaging of human brain function. *Trends in Neurosciences*, 20, 435-442.
- Vogel, J. J., Bowers, C. A., & Vogel, D. S. (2003). Cerebral lateralization of spatial abilities: A meta-analysis. *Brain and Cognition*, 52, 197-204.
- Volke, H.-J., Dettmar, P., Richter, P., Rudolf, M., & Buhss, U. (2002). On-coupling and off-coupling of neocortical areas in chess experts and novices as revealed by evoked EEG coherence measures and factor-based topological analysis – a pilot study. *Journal of Psychophysiology*, 16, 23-36.
- Wagner U., Gais S., Haider H., Verleger R., & Born J. (2004). Sleep inspires insight. *Nature*, 427, 352-355.
- Weiskopf, N., Veit, R., Erb, M., Mathiak, K., Grodd, W., Goebel R., & Birbaumer, N. (2003). Physiological self-regulation of regional brain activity using real-time func-

- tional magnetic resonance imaging (fMRI): methodology and exemplary data. *NeuroImage*, 19, 577-586.
- Wise, R. A. (2004). Dopamine, learning and motivation. *Nature Reviews Neuroscience*, 5, 1-12.
- Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G., & Vaughan, T. M. (2002). Brain-computer interfaces for communication and control. *Clin. Neurophysiol.*, 113(6), 767-791.
- Wynn, K. (1992). Addition und subtraction by human infants. *Nature*, 358, 749-750.

# Anhang

## A1 : Fragebogen „Lehr-Lern-Forschung aus neurowissenschaftlicher Perspektive“

Im Zuge der Workshopvorbereitung wurden alle Teilnehmer mit dem folgenden Fragebogen aufgefordert, Vorschläge für aus ihrer Sicht lohnende und aussichtsreiche Forschungsprojekte zu machen, bei denen neurophysiologische Untersuchungen zur Klärung von Fragen der Lehr-Lern-Forschung durchgeführt werden:

### Fragebogen

Bitte beantworten Sie die Fragen in der Datei, die Ihnen per e-mail dieser Tage zugeht.

Name:

*Frage 1: Ich kann an dem Workshop am 19./20. November teilnehmen (bitte ankreuzen).*

Ja                       Nein

*Frage 2: Wie sieht Ihr wissenschaftliches Wunschprojekt aus?*

Stellen Sie sich vor, Sie könnten eine hohe Summe an Forschungsgeldern für ein innovatives, aber innerhalb von fünf Jahren zu realisierendes Projekt abrufen, in dem die folgenden drei Randbedingungen zu beachten sind:

1. Die Probanden Ihrer Studie werden mit Aufgaben konfrontiert, die im Zusammenhang mit mindestens einem der folgenden schulrelevanten Kompetenzbereiche stehen: Mathematik, Naturwissenschaften, mündliche und schriftliche Muttersprache, Fremdsprache. (Der musische Bereich bleibt an dieser Stelle noch unberücksichtigt, da er in einem Anschlussprojekt gesondert behandelt werden soll.)
2. Es müssen kognitionspsychologische Konstrukte herangezogen werden, um das Zustandekommen von Kompetenzen in den unter 1. genannten Bereichen zu erklären (z.B. Arbeitsspeicher, Automatisierung, Konzeptbildung, implizites/explicit Wissen, träges Wissen, Transfer, Intelligenz, Aufmerksamkeit). Diese kognitionspsychologischen Konstrukte können auch in Verbindung mit anderen psychologischen Konstrukten gebracht werden (z.B. Emotion und Motivation).
3. Die Erhebung von Variablen mit psychologischen Methoden (Befragung, Verhaltensbeobachtung, Leistungsmessung) muss ergänzt werden durch hirnelektrische Messungen (z.B. EEG, PET, fMRI). Es muss spezifiziert werden, wie psychologische und hirnelektrische Variablen zusammenhängen könnten.

In der Wahl Ihres Designs sind Sie frei. Sie können in experimentellen Studien die Aufgaben in bestimmten Aspekten variieren oder in experimentellen Trainingsstudien die Probanden unterschiedlichen Lernbedingungen aussetzen. In quasi-experimentellen Studien dürfen Sie psychologische und hirnpfysiologische Variablen in Abhängigkeit von der individuellen Lerngeschichte (z.B. der Unterrichtsqualität) und/oder Persönlichkeitsmerkmalen (z.B. der Intelligenz) untersuchen. In Längsschnittstudien können Sie Fragen nach der interindividuellen Variabilität und Stabilität nachgehen, und in mikrogenetischen Studien dürfen Sie Verläufe studieren. Wenn es Ihnen gelingt, alles unter einer sinnvollen Fragestellung zu vereinen, dürfen Sie auch Designs kombinieren. Tun Sie so, als ob Ihnen Sachmittel (Mitarbeiter, Hilfskräfte, Ausstattung) in der benötigten Höhe zur Verfügung stehen würden.

Sie können gern mit den auf der Liste genannten Kollegen gemeinsame Forschungsprojekte planen. Falls Sie weitere, nicht auf der Liste genannte Kollegen hinzuziehen möchten, sprechen Sie dies bitte mit mir ab – auch weil die mir zur Verfügung stehenden Reisemittel begrenzt sind.

Bei der Auswahl der Probanden sollten Sie keineswegs nur Schüler oder Lehrer im Auge haben. Solange ein Bezug zu den in der Schule zu erwerbenden Kompetenzen hergestellt wird, ist alles erlaubt. Sie können Vorläuferfähigkeiten bei Kleinkindern und Säuglingen studieren oder auch Auswirkungen der schulischen Lerngeschichte auf das höhere Erwachsenenalter. Wenn Sie begründen können, dass sich Vorläuferfähigkeiten höherer geistiger Kompetenzen bei Tieren besonders gut untersuchen lassen, müssen Sie sich nicht einmal auf die menschliche Spezies beschränken.

Bitte beschreiben Sie (in einer anderen Farbe) an dieser Stelle Ihr Wunschprojekt so knapp wie möglich unter Berücksichtigung der aufgeführten Punkte (die Sie gern in die für Sie passende Reihenfolge bringen können). Eine letzte Bitte: Erwähnen Sie auch, an welchen Stellen Sie bereits auf eigene langjährige Erfahrung zurückgreifen können, und wo Sie auf die Zusammenarbeit mit anderen Experten angewiesen sind.

- Fragestellung,
- schulbezogener Inhalt und Art der kognitiven Anforderung,
- involvierte psychologische Konstrukte,
- Probanden,
- gewünschte hirnpfysiologische Methode,
- Design,
- erwartete Erkenntnisse.

Viel Spaß beim Denken ohne finanzielle und zeitliche Beschränkungen und dafür mit starker inhaltlicher Fokussierung!

*Frage 3: Gibt es bereits veröffentlichte oder unveröffentlichte Papiere, in denen Teile Ihrer Wunschvorstellung umgesetzt sind? Bitte attachen Sie diese Arbeiten oder legen Sie Links.*

## A2: Teilnehmer am Workshop

Folgende Personen nahmen am Workshop „Lehr-Lern-Forschung aus neuro-wissenschaftlicher Perspektive“ von 19. bis 20. November 2004 in Berlin teil:

Name, Vorname Titel	Institut	Universität
Ansari, Daniel Prof. Dr.	Department of Education	Dartmouth College
Bösel, Rainer M. Prof. Dr.	Psychologie	Freie Universität Berlin
Buchaas-Birkholz, Dorothee Dr.	BMBF	
Buchholz, Christiane	BMBF	
Dorlöchter, Marlies Priv.-Doz. Dr.	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Projektträger des BMBF im DLR (PT-DLR) - Gesundheitsforschung -	
Euler, Manfred Prof. Dr.	Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften (IPN)	Abteilung Didaktik der Physik
Falkenstein, Michael PD Dr.	Leiter Projektbereich 3: Kognitive Neurophysiologie Institut für Arbeitsphysiologie	Universität Dortmund
Felbrich, Anja	Institut für Erziehungswissenschaften, Abt. Systematische Didaktik und Unterrichtsforschung	Humboldt-Universität zu Berlin
Fickermann, Detlef	BMBF	
Frith, Uta Prof. Dr.	Institute of Cognitive Neuroscience	University College London
Grabner, Roland Mag.	Institut für Psychologie	Universität Graz
Hardy, Ilonca Dr.	Max-Planck-Institut für Bildungsforschung	
Herz, Andreas Prof. Dr.	Institut für Theoretische Biologie	Humboldt-Universität zu Berlin
Hüther, Gerald Prof. Dr.	Klinik für Psychiatrie und Psychotherapie – Neurobiologie	Georg-August-Universität Göttingen
Indefrey, Peter Dr.	Max Planck Institute for Psycholinguistics	
Jacobs, Arthur M. Prof. Dr.	Arbeitsbereich Allgemeine Psychologie	Freie Universität Berlin
Klann-Delius, Gisela Prof. Dr.	FB Philosophie und Geisteswissenschaften, Institut für Deutsche und Niederländische Philologie	Freie Universität Berlin
Körndle, Hermann Prof. Dr.	Institut für Psychologie IV	TU Dresden
Li, Shu-Chen Dr.	Max-Planck-Institut für Bildungsforschung	
Lindenberger, Ulman Prof. Dr.	Max-Planck-Institut für Bildungsforschung	

Name, Vorname Titel	Institut	Universität
Martignon, Laura F. Prof. Dr.	Institut für Mathematik und Informatik	Pädagogische Hochschule Ludwigsburg
Narciss, Susanne Dr.	Institut für Psychologie IV	TU Dresden
Neubauer, Aljoscha C. Prof. Dr.	Institut für Psychologie	Universität Graz
Neuper, Christa Dr.	Institut für Psychologie	Universität Graz
Ohl, Frank Dr.	Leibniz-Institut für Neurobiologie	Abteilung Akustik, Lernen, Sprache
Palm, Günther Prof. Dr.	Abteilung Neuroinformatik	Universität Ulm
Plötzner, Rolf Prof. Dr.	Mediendidaktik	Pädagogische Hochschule Freiburg
Rösler, Frank Prof. Dr.	Psychologisches Institut AG Kognitive Psychologie	Philipps-Universität Marburg
Saalbach, Henrik	Max-Planck-Institut für Bildungsforschung	
Saniter, Andreas Dr.	Fachbereich 1: Institut für Didaktik der Physik	Universität Bremen
Scheich, Henning Prof. Dr.	Leibniz-Institut für Neurobiologie	Abteilung Akustik, Lernen, Sprache
Schumacher, Ralph PD Dr.	Institut für Philosophie	Humboldt-Universität zu Berlin
Stern, Elsbeth Prof. Dr.	Max-Planck-Institut für Bildungsforschung	
von Aufschnaiter, Claudia Prof. Dr.	Universität Hannover	Didaktik der Naturwissenschaften
von Aufschnaiter, Stefan Prof. Dr.	Fachbereich 1: Institut für Didaktik der Physik	Universität Bremen
<b>Gäste</b>		
Schneider, Michael	Max-Planck-Institut für Bildungsforschung	
Rötger, Antonia	Max-Planck-Institut für Bildungsforschung	
Cierniak, Gabriele		Universität Koblenz-Landau

Folgende Personen konnten nicht an dem Workshop teilnehmen, haben aber Vorschläge zur Forschungsförderung eingebracht: Prof. Dr. Niels Birbaumer, Universität Tübingen; Prof. Dr. Onur Güntürkün, Universität Bochum; PD. Dr. Andrea Rodenbeck, Universität Göttingen; Prof. Dr. Wolf Singer, Max-Planck-Institut für Hirnforschung.

## A3 Programm des Workshops

---

### Freitag, 19. November 2004

---

11.00 – 12.00	<p>Elsbeth Stern:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Begrüßung und Vorstellung der TeilnehmerInnen</li> <li>• Kurzer Einführungsvortrag: „Ist es sinnvoll, von hirngerechtem Lernen zu sprechen?“</li> </ul> <p>Vortrag Ralph Schumacher: „Wie verhalten sich neurophysiologische, kognitions- und pädagogische Erklärungen zueinander? Überlegungen zum Problem der Reduktion von Theorien.“</p>
12.00 – 13.00	<p>Vortrag Uta Frith: „How the brain learns“</p> <p><i>Thema der Diskussion:</i> Was suchen Lehr-Lern-ForscherInnen im Gehirn, was können sie finden?</p>
13.00 – 14.00	Mittagessen im Hotel Henriette
14.00 – 15.15	<p><b>Motivation und Emotion auf neuronaler Ebene und beim schulischen Lernen</b></p> <p>Vortrag Henning Scheich: „Dopaminmechanismen und erfolgsorientiertes Lernen“</p> <p><i>Themen der Diskussion:</i> Konsequenzen für die Gestaltung von Lerngelegenheiten, insbesondere Feedback. Gibt es neurophysiologisch nachweisbare emotional-/motivationale Zustände, welche das Lernen erleichtern bzw. erschweren?</p> <p><i>Statements werden erbeten von:</i> Michael Falkenstein, Gerald Hüther, Hermann Kördle, Günther Palm, Frank Rösler</p>
15.15 – 16.00	<p><b>Wo sagt das Gehirn „nein“? Aspekte der kurz- und längerfristigen Plastizität</b></p> <p>Kurzvortrag Elsbeth Stern und Henrik Saalbach: Gehirnentwicklung: Chancen und Grenzen für das Lernen</p> <p><i>Statements werden erbeten von:</i> Daniel Ansari, Uta Frith, Gerald Hüther, Ulman Lindenberger, Aljoscha Neubauer</p>
16.00 – 16.30	Kaffeepause
16.30 – 19.00	<p><b>Der Erwerb und die Nutzung von Wissen in schulrelevanten Inhaltsgebieten (Schriftsprache, Fremdsprachen, Mathematik, Naturwissenschaften)</b></p> <p><i>Thema der Diskussion:</i> Finden die Lehr-Lern-ForscherInnen im Gehirn, was sie suchen?</p> <p>Kurzvortrag Elsbeth Stern</p> <p><i>Statements werden erbeten von:</i> Rainer Bösel, Michael Falkenstein, Shu-Chen Li, Ulman Lindenberger, Frank Ohl, Günther Palm, Frank Rösler</p> <p>Kurzvortrag Elsbeth Stern: „Befunde aus der Lehr-Lern-Forschung zum Erwerb von intelligentem Wissen in zentralen Schulfächern“</p> <p>Thematisiert werden u.a. die Entstehung und das Zusammenwirken unterschiedlicher Wissensarten (implizit, explizit, prozedural, konzeptuell, deklarativ) sowie das Zustandekommen und der Umgang mit Fehlern.</p>

---

---

	Kurzvortrag Roland Grabner: Überblick über die eingereichten Forschungs-ideen zum Lernen in den Bereichen Sprache, Naturwissenschaften und Mathematik
	<i>Ergänzende Statements aus didaktischer Perspektive werden erbeten von:</i> Ilonca Hardy, Peter Indefrey (Fremdsprachen); Anja Felbrich, Laura Martignon, (Mathematik); Stefan von Aufschnaiter, Manfred Euler (Physik)
	<i>Ergänzende Statements aus der Forschung zu Lernschwierigkeiten werden erbeten von:</i> Uta Frith, Arthur Jacobs (Lese-Rechtschreib-Schwäche); Daniel Ansari (Rechenschwäche)
ab 20.00	Abendessen
<hr/>	
<b>Samstag, 20. November 2004</b>	
09.00 – 09.45	Fortsetzung: Der Erwerb und die Nutzung von Wissen in schulrelevanten Inhaltsgebieten
09.45 – 11.15	<b>Kann das Gehirn unspezifisch auf das Lernen vorbereitet werden?</b> Vortrag Christa Neuper: “Zur Anwendbarkeit moderner Neurofeedback-Technologien in der Lehr-Lernforschung“ <i>Thema der Diskussion:</i> Verwertbarkeit für schulisches Lernen Kurzvortrag Roland Grabner: Überblick über die eingereichten Forschungs-ideen zu effizientem Lernen und Gestaltungsformen von Lerngelegenheiten <i>Statements werden erbeten von:</i> Daniel Ansari, Rainer Bösel, Michael Falkenstein, Ulman Lindenberger, Aljoscha Neubauer, Frank Rösler
11.15 – 11.30	Kaffeepause
11.30 – 13.00	<b>Hirnforschung und Lernen mit Multimedia</b> Vortrag Rolf Plötzner: „Trends und Fragen der Forschung zum Lernen mit Multimedia“ <i>Themen der Diskussion:</i> 1. Lernen mit Multimedia in zentralen Schulfächern <i>Statements werden erbeten von:</i> Peter Indefrey (Fremdsprachen); Laura Martignon (Mathematik); Claudia von Aufschnaiter, Andreas Saniter (Physik) 2. Sind Multimedia-Lernumgebungen für neurophysiologische Untersuchungen besonders gut geeignet? <i>Statements werden erbeten von:</i> Uta Frith, Gerald Hüther, Arthur Jacobs, Susanne Narciss, Frank Rösler
13.30 – 14.30	Mittagessen
14.30 – 15.30	Abschlussdiskussion

---

## A4 Workshop-Materialien

Als Diskussionsanregungen dienten folgende Materialien, welche beim Workshop allen Teilnehmern ausgehändigt wurden:

### Fragen:

- I. In welchen Hinsichten erfordern die Ergebnisse der Hirnforschung ein Umdenken in der Lehr-Lern-Forschung?
  1. In welchen Bereichen gibt es bereits Hinweise aus der Hirnforschung, dass schulisches Lernen auf eine Weise gefördert werden kann, die bisher nicht in der Lehr-Lern-Forschung beachtet wurde?
  2. Gibt es bereits Hinweise aus der Hirnforschung, wonach schulisches Lernen NICHT so gefördert werden kann, wie man in der Lehr-Lern-Forschung (nicht in der Schulpraxis!) annahm?
- II. Können Methoden der Hirnforschung überhaupt zur empirischen Überprüfung von Theorien aus der Lehr-Lern-Forschung herangezogen werden?
  1. Können wir mit Methoden der Hirnforschung Einsichten gewinnen, die über das hinausgehen, was wir mit Verhaltensbeobachtung, Befragung oder Leistungsmessung erfassen können? Was suchen Lernforscher im Gehirn?
  2. Was können Lernforscher im Gehirn finden?
    - a. Welche neurophysiologischen Methoden eignen sich?
    - b. Wie sieht ein für hirnpfysiologische Methoden geeignetes Stimulusmaterial aus?
  3. Welche hirnpfysiologischen Charakteristika können als Korrelate psychischer Vorgänge (kognitiv, emotional, motivational) angesehen werden?
    - a. Welche hirnpfysiologischen Charakteristika führen nach bisherigem Kenntnisstand ein von der psychischen Ebene losgelöstes Eigenleben?
    - b. Für welche am Lernen beteiligten psychologischen Konstrukte können bisher keine hirnpfysiologischen Korrelate gefunden werden?

Diese Druckschrift wird im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unentgeltlich abgegeben. Sie ist nicht zum gewerblichen Vertrieb bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlbewerberinnen/Wahlbewerbern oder Wahlhelferinnen/Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament. Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen und an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zwecke der Wahlwerbung.

Unabhängig davon, wann, auf welchem Weg und in welcher Anzahl diese Schrift der Empfängerin/dem Empfänger zugegangen ist, darf sie auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Bundesregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte



# 13

Seitdem moderne Untersuchungsverfahren Einblicke in die neurophysiologischen Vorgänge bei der Informationsverarbeitung des Menschen ermöglichen, lassen sich sowohl Wissenschaftler als auch Laien von Bildern des denkenden und lernenden Gehirns faszinieren. Die bisher vorliegenden Befunde der neurophysiologischen Lernforschung sind allerdings nur selten eindeutig interpretierbar. Wenn überhaupt, lassen sich nur sehr allgemeine Schlussfolgerungen ableiten, die nicht selten den irreführenden Eindruck erwecken, dass eine Verbesserung zum Beispiel des schulischen Lernens mit Erkenntnissen der Hirnforschung leicht zu erreichen sei.

Jenseits solcher unmittelbaren praktischen Anwendungen neurophysiologischer Forschungsergebnisse ist die Zeit aber reif für die Frage, wie mit den Methoden der Hirnforschung Lehr-Lern-Prozesse besser verstanden werden können.

Die Autoren der vorliegenden Expertise haben deshalb für schulisches Lernen relevante Untersuchungen und Paradigmen aus der neurophysiologischen Forschung zusammengetragen und auf dieser Grundlage weiterführende Forschungsperspektiven entwickelt.

