

**Vom Tiermodell zum Unterrichtsmodell:
Zur Entwicklung neurodidaktischer Konzepte vor
dem Hintergrund kortikaler und präfrontaler
Lateralisation**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Didaktik der Naturwissenschaften
Dr. phil. nat.

der Fakultät für Biologie
der Universität Bielefeld
vorgelegt von
Sven Horstmann

Bielefeld 2006

INHALTVERZEICHNIS

<i>ZUSAMMENFASSUNG</i>	1
1 <i>Einleitung</i>	5
1.1 Asymmetrie und Hemisphärendominanz als Leitmarken für eine Modellentwicklung	6
1.2 Repräsentationen von parallelen und seriellen Schaltkreisen	9
1.2.1 Zur Lateralisierung des occipitalen Kortex.....	9
1.2.2 Zur Lateralisierung des parietal-frontalen Kortex.....	10
1.3 Zur Lateralisation des Stirnhirns	15
1.3.1 Übergeordnete Kontrollfunktion des Stirnhirns.....	16
1.3.2 Lateralisierte Stirnhirnfunktionen in Verhaltenstests.....	17
1.3.3 Asymmetrie von Transmittern im Stirnhirn.....	18
1.3.4 Asymmetrische Verarbeitung von Gedächtnisinhalten im PFC.....	20
2 <i>Neurobiologische Grundlagen</i>	23
2.1 Die Kompensationstheorie: Ein Lernmodell	23
2.2 Schulische Bezüge der Gehirnasymmetrie und Neuroplastizität	29
2.3 Fehlentwicklungen der Gehirnasymmetrie im Kindesalter	31
2.4 Ein Tiermodell zur Simulation von Umwelteinflüssen und Stressfaktoren	36
3 <i>Ziele der Arbeit</i>	37
3.1 Experimenteller Teil	38
3.2 Didaktische Anwendung der Neurobiologie	38
4 <i>Experimentelle Untersuchung zur Lateralisierung des PFC</i>	40

4.1	Material und Methode	40
4.1.1	Tracerstudie der callosalen Verbindungen	41
4.1.2	Quantitative Auswertung der Serotoninfaserdichte im Gebiet FR2.....	46
4.2	Ergebnisse.....	49
4.2.1	Biocytin Tracerstudie.....	49
4.2.2	Darstellung der Faserverläufe bei Gehegetieren.....	53
4.2.3	Darstellung der Faserverläufe bei IR-Tieren und IR-MA-Tieren	56
4.2.4	Quantifizierung glutamaterger L-V- Projektionen.....	62
4.2.5	Quantifizierung der Serotoninfasern im FR2-Gebiet	63
4.3	Diskussion.....	67
4.3.1	Zur Lateralisierung von glutamatergen Fasern im PFC bei Gerbils	69
4.3.2	Zur Reifung von lateralisierten serotoninergen Fasern im PFC.....	77
4.3.3	Konsequenzen für den Schulunterricht	78
5	<i>Lernen im Biologieunterricht</i>	82
5.1	Entwicklung eines neurodidaktischen Unterrichtsmodells.....	82
5.2	Zur Umsetzung der neurodidaktischen Prinzipien	85
5.3	Methoden und Materialien in einem neurodidaktischen Unterrichtskonzept.....	87
5.3.1	Bewusstes Üben von Kommunikationsstrukturen	87
5.3.2	Prinzipien für die Arbeitsmaterialgestaltung.....	89
5.3.3	Der Einsatz von Graphiken und Animationen.....	90
5.3.4	Sprachliche und visuelle Informationsverarbeitung.....	93
5.3.5	„Problemlösendes Denken“ - eine neurophysiologische Leistung beider Hemisphären	95
5.4	Lernen auf der Ebene von Nervennetzen als Unterrichtsinhalt	98
5.4.1	„Hebb’s Cell assembling“ als vorläufiges Lernmodell	98

5.4.2	Präzision des Lernmodells: Reorganisationsprozesse in kritischen Phasen	100
5.4.3	Lerntypen werden von Hemisphärenpräferenzen dominiert	105
5.5	Workshops: „Wie lernt das Gehirn?“	111
5.5.1	Workshop „Lernen durch Bewegung“	112
5.5.2	Workshop „Mathematik“	116
5.5.3	Reflexion der Unterrichtseinheiten	118
6	<i>Zur Reflexion neurodidaktischer Ideen</i>	121
7	<i>Literaturverzeichnis</i>	133

ZUSAMMENFASSUNG

Die vorliegende interdisziplinäre Arbeit gliedert sich in einen neurobiologisch-experimentellen und einen didaktischen Teil, wobei der Schwerpunkt auf letzterem liegt. Experimente wurden von mir in den Jahren 1998 und 1999 in der Abteilung für Neuroanatomie der Universität Bielefeld zu dem etablierten Tiermodell an Gerbils durchgeführt. Sie bildeten die Grundlage für die aus den Daten zur Stirnhirnreifung und Lateralisierung abgeleiteten neurodidaktischen Konzepten. Somit ist ein Unterrichtsmodell entstanden, das ich während meiner sechsjährigen Tätigkeit als Lehrer entwickelt habe.

Die dem neurodidaktischen Konzept zugrunde liegenden allgemeinen Erkenntnisse lauten: Für LERNEN und GEDÄCHTNISBILDUNG gibt es kein Zentrum im Gehirn. Vielmehr erfolgt LERNEN ganzheitlich vor dem Hintergrund einer funktionellen Entwicklung von Nervennetzen innerhalb verschiedener Subsysteme. Die **Kompensationstheorie** erklärt, wie reifende Transmitter und andere morphogene Substanzen dies steuern, wie Nervenzellen in reifenden sensorischen, motorischen und assoziativen Systemen des Gehirns destabilisiert und reorganisiert werden und wie sich Umweltreize in synaptische Verschaltungen einbringen. Diese **Prozesse** von Organisation und Reorganisation sind selbstorganisierend und bilden im Rahmen einer Struktur-Funktionskopplung die Grundlage für das LERNEN im Kindes- und Jugendalter. Aus dem Mechanismus der **Kompensation** lässt sich auch die Ausbildung von **Kortexasymmetrien** und **Stirnhirnfunktionen** ableiten. **Kritische** Zeitfenster für diese dynamischen Prozesse wurden an unserem Tiermodell vielschichtig erarbeitet und von mir speziell für die Lateralisierung des Stirnhirns in der postnatalen Entwicklung gezeigt. Daraus und aus meinen ersten schulpädagogischen Erfahrungen ließ sich das **parallel-serielle Hemisphärenmodell** entwickeln, welches dem pädagogischen Konzept dieser Schrift zugrunde liegt. Gerade das **Stirnhirn** ist von besonderer Bedeutung für

pädagogische Konzepte, da es als höchste Integrationsebene für Antizipation, Sozialisation und darüber hinaus Gedächtnisbildung verantwortlich ist.

Die sehr langsame Reifung von Verschaltungen zwischen den beiden Hälften des Stirnhirns (**Präfrontaler Kortex** = PFC) wurde an jung-erwachsenen Tieren (*Meriones unguiculatus*) mit Hilfe quantitativer immunhistochemischer Darstellungen von Transmittern erarbeitet. Es wurde eine asymmetrisch reifende Dichteverteilung von serotonergen Fasern entdeckt. Tracerstudien zur glutamatergen Efferenz mit Ursprung in den Pyramidenzellen des Stirnhirns zeigen, dass **Umbauprozesse** in Abhängigkeit von Umweltfaktoren stehen: Soziale Deprivation während der Aufzucht (IR) und eine einmalige frühkindliche Traumatisierung mittels Methamphetamin-Intoxikation (MA) induzieren eine **Dyskonnektion** von callosalen L-III und L-V-Projektionen, und das meint eine verstärkte Reifung von L-V- und verminderte Reifung von L-III-Efferenzen. Die Daten unterstützen die zuvor für andere Hirnareale erhobenen Befunde unserer Arbeitsgruppe. Insgesamt lässt sich somit eine Verschiebung von seriellen und parallelen Verschaltungen im Kortex (den PFC erstmalig eingeschlossen) belegen.

Aus den experimentellen Studien zur lateralisierten Reifung des PFC lassen sich für die Entwicklung **neurodidaktische Konzepte** neue verbindliche Hinweise ableiten: Umweltfaktoren nehmen einen starken Einfluss auf die Transmitterreifung und hierüber auf die Ausbildung parallel-serieller Schaltungen insbesondere im Stirnhirn. Individuell ist mit entsprechenden Unterschieden für die generelle Lerndisposition zu rechnen, woraus sich individuelle **Lerntypen** definieren. **Selbst organisierte Unterrichtsphasen** sollen die Lernvoraussetzungen prinzipiell fördern. Für die Gruppendynamik sind „Lernkrisen“ vorprogrammiert, die es durch offene Unterrichtsmethoden (Unterrichtsaufbau und Arbeitsmaterialien) zu bewältigen gilt. Eine methodische Einführung in das Prinzip **Lernen durch Lehren** ist vorteilhaft und wird durch

die neurobiologischen Erkenntnisse zur Kompensationstheorie unterstützt. Die Schülergruppen üben progressiv sich **selbst zu organisieren** und **Vorträge selbstständig** zu konzipieren. Die Integration der Ergebnisse aus der **Plastizitätsforschung** in die Unterrichtsinhalte im Kurshalbjahr Neurobiologie soll die Eigenaktivität der Schüler¹ fördern und die Reflexionskompetenz für eigenständiges LERNEN stärken. Die inhaltliche Verknüpfung neuroplastischer Prozesse mit klassischen Lernformen im Kurshalbjahr Neurobiologie stellt ein Novum dar, das über die üblichen neurophysiologischen Lerninhalte weit hinausgeht und die Schüler auch für andere Fächer hoch motiviert.

Die Erkenntnisse zur Lateralisation und Stirnhirnreifung bilden die neurobiologische Grundlage für eine Vielzahl von fächerübergreifenden Aspekten: Eine zu geringe Sequenzierungsfähigkeit der linken Hemisphäre bedingt u.a. ein **Ordnungsschwellenproblem**. Durch das eigenständige Gliedern, Formulieren und Sprechen, aber auch durch sequenzielle motorische Übungen, können linkshemisphärische **Schlüsselfunktionen** (z.B. **Sequenzierungsfähigkeit**) gestärkt werden. Solche bilden die Grundlage für das analytische Denken. Die Schulung der rechten Hemisphäre stärkt Parallelschaltungen, die eine neuronale Grundlage für komplexe Verarbeitungsprozesse sind, wie **Kreativität, räumliches** und **ganzheitliches Denken**. Für das Fach Mathematik wird weithin entwickelt, dass das rechtzeitige **Enaktivieren** paralleler Schaltkreise in einer kritischen Reifungsphase der Kortexasymmetrien für das Lösen komplexer geometrischer Aufgabenstellungen von besonderer Bedeutung ist. Das Stärken von **Schlüsselfunktionen** im Unterricht bereitet Schüler auf zukünftige Problemstellungen vor; damit erfährt der von Klafki geprägte Begriff der Zukunftspropädeutik eine Renaissance. Weiterhin impliziert die natürlicherweise sehr langsame Reifung des Stirnhirns und seiner Leistungen ein enormes Methodenspektrum für verschiedene

¹ hiermit ist die weibliche Form ‚Schülerinnen‘ mit einbezogen.

Altersstufen: Immer wieder sind Planungsphasen im Unterricht einzufordern, in denen die Lernenden den Stand der Erkenntnis reflektieren und neue Ansätze entwickeln. Dieses methodische Vorgehen erweist sich als ein geeignetes Instrument, Stirnhirnkompetenzen zu schulen. Dadurch wird insbesondere auch das Denken in historischen Kontexten und sozialen Bezügen eingeübt.

FAZIT

Die dargestellten neurobiologischen Prozesse bilden eine Basis, die sich in einer Vielzahl von empirisch entwickelten pädagogischen Konzepten natürlich bereits niedergeschlagen hat. Ziel der vorliegenden Arbeit war es, vor dem Hintergrund neurobiologischer Erkenntnisse und mit Hilfe eigener Unterrichtsansätze eine Bewertungsebene für pädagogische Konzepte zu entwickeln, die einen **verbindlichen, naturwissenschaftlichen** Zugang zu pädagogischen Leitideen schaffen.

1 EINLEITUNG

„Die erschreckenden Ergebnisse der Pisa-Studien haben eine heftige Diskussion über Pädagogik, Didaktik und die Schulpolitik der Kultusministerien ausgelöst. Schulmodelle werden in Frage gestellt; Kuschelpädagogik gegen Drill, Leistungsdruck und Disziplin abgewogen.“ (aus: www.spiegel-online.de). So und ähnlich dokumentiert die deutsche Presse die Pisa-Studie (vgl. Artelt et al., 2001), bei der nach der TIMMS (vgl. Baumert et al., 2000) die deutschen Schüler erneut bei problemlösenden Aufgaben und kreativer Ideenproduktion von Lösungsansätzen unterdurchschnittlich abgeschnitten haben. Bei den Handlungsvorschlägen findet der interessierte Leser alles, vom Ganztagschulmodell über das Aufleben von traditionellen Lernmethoden bis hin zum multimedialen Unterricht. Es stellt sich nun die Frage, wie diese Flut an Vorschlägen zu bewerten ist. Für eine solche Bewertung sollten allerdings nicht nur empirische beziehungsweise heuristische Forschungen betrieben werden, sondern vor allem auch die Mechanismen des Lernens auf der Ebene von hirnpfysiologischen Prozessen betrachtet werden.

Kein Informatiker würde sich an die Programmierung eines PC trauen, ohne Einblicke in die grundlegenden Funktionsweisen eines Computers zu haben. Ebenso sollte bei der Frage nach neuen Wegen der Didaktik und insbesondere der Methodik das Gehirn - als Organ des Lernens und Denkens - in den Mittelpunkt des Interesses gerückt werden. Doch macht die Komplexität der neuronalen Vorgänge im Gehirn eine pädagogische Auswertung von neurowissenschaftlichen Erkenntnissen schwierig und eine praktische Anwendung scheint Pädagogen, die in Neurobiologie nicht ausgebildet sind, fast utopisch. Der Anspruch der vorliegenden Arbeit ist es, hier einen Brückenschlag zu leisten. Es ist speziell die Plastizitätsforschung, die in den letzten zwanzig Jahren entscheidende Erkenntnisse zur Neurobiologie des Lernens beigetragen hat. Im Hinblick auf die steigende Dynamik gesellschaftlicher Veränderungen, die sich speziell auf die Kind- und Jugendphase so dramatisch auswirken und eine Methoden- und Medienvielfalt im Unterricht längst angestoßen haben, nimmt ein „hirngerechtes“

Lernen eine immer wichtigere Rolle ein, den unsere Schulen Aufmerksamkeit entgegenbringen müssen, wollen sie den veränderten Bedingungen, die speziell das kindliche Gehirn treffen, zukünftig gerecht werden. Gefragt sind deswegen praktikable Modellvorstellungen, die auch einem nicht biologisch vorgebildeten Pädagogen einen Zugang zu diesen Erkenntnissen der Neurobiologie verschaffen.

1.1 Asymmetrie und Hemisphärendominanz als Leitmarken für eine Modellentwicklung

Kognitive Prozesse stehen bei der Verarbeitung von Informationen in einer engen Korrelation zur ausgeprägten Asymmetrie von Hirnrindengebieten und deren Funktionen (rev. in Kolb und Wishaw, 1996). Im occipitalen Kortex betrifft dieses vor allem die visuelle und räumliche Verarbeitung, im parietalen Kortex die Sprachbildung und -verarbeitung und im frontalen Kortex die raumzeitbezogene Konzeptbildung. Während der nachgeburtlichen Entwicklung schreitet die Reifung dieser neuronalen Areale von occipital nach frontal sehr langsam – und zwar asymmetrisch voran (rev. in Teuchert-Noodt und Lehmann, 2003; vgl. Abbildung 1.1). Da Reifung und Lernen die zwei Seiten einer Medaille sind, sollen einleitend die Reifungsgeschehnisse im Folgenden sehr genau analysiert werden, um die Frage nach den Lernmechanismen im Kindes- und Jugendalter vorzubereiten. Dabei gilt es, folgende Schwerpunkte zu setzen:

- Die **Reifung von kognitiven Funktionen** im Kortex folgt einem Gradienten. Visuelle und räumliche Prozessbildung wird über den occipitalen Kortex bereits im Säuglingsalter vollzogen und geübt (Hubel, 1989). Das im occipitalen-parietalen Kortex reifende Sprachverständnisareal (Wernicke-Areal) folgt in der funktionellen Reifung und ist dem Kleinkind bereits früher verfügbar als das im vorderen parietalen Kortex reifende Sprachbildungsareal (Broca-Areal), sodass sich ein Sprachverständnis vor der Sprachproduktion entwickelt. Noch stärker verzögert reift der frontale Kortex mit den charakteristischen Funktionen des Stirnhirns. Sie sind beim Menschen erst im

jungerwachsenen Alter wirklich ausgereift (rev. in Krasnegor; Lyon und Golman-Rakic, 1997).

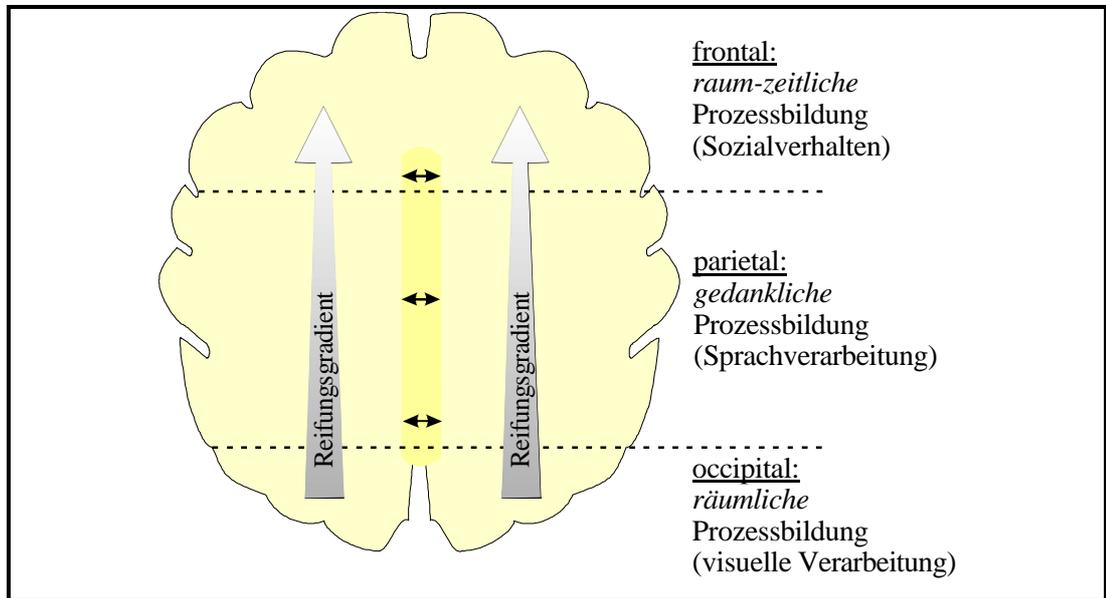


Abbildung 1.1

Reifungsgradient kortikaler Systeme von occipital nach frontal und die zugeordneten Teilfunktionen (nach Teuchert-Noodt und Lehmann, 2003)

- Die kognitiven Funktionen in den occipitalen, parietalen und frontalen Kortexarealen beruhen weitgehend auf **lateralisierten Verarbeitungsstrategien** (Abbildung 1.2). Die rechte Hemisphäre verarbeitet die Informationen *parallel*, während die Schlüsselfunktion der linken Hemisphäre die Sequenzierungsfähigkeit ist, die es erlaubt, Informationen *seriell* abzuarbeiten. Dieses sich auf die Strukturen beziehende Verschaltungsprinzip findet seinen Niederschlag in entsprechenden funktionsbezogenen Leistungen der beiden Hemisphären. So dienen die rechtshemisphärischen parallelen Schaltungen der Bildung ganzheitlicher, hoch komplexer Teilaspekte und die linkshemisphärischen seriellen Schaltungen der Bildung analytischer, einfach strukturierter Teilaspekte. Beide, strukturelle und funktionelle Aspekte, sollen in dem *parallel-seriellen Hemisphärenmodell* berücksichtigt werden und die in der Literatur etablierten Modelle (rev. in Lürken, 2000) mit einschließen. Besonders berücksichtigt werden darüber hinaus **plastische Reorganisationsprozesse** von asymmetrischen

Verschaltungsmustern, die bei der Reifung eine tragende Säule für die Modellvorstellung bedeuten, denn erst damit wird der Stellenwert deutlich erkennbar, den diese neurobiologischen Erkenntnisse für die Pädagogik einnehmen müssen. Außerdem werden individuelle Ausprägungen von Hemisphärendominanzen erkennbar.

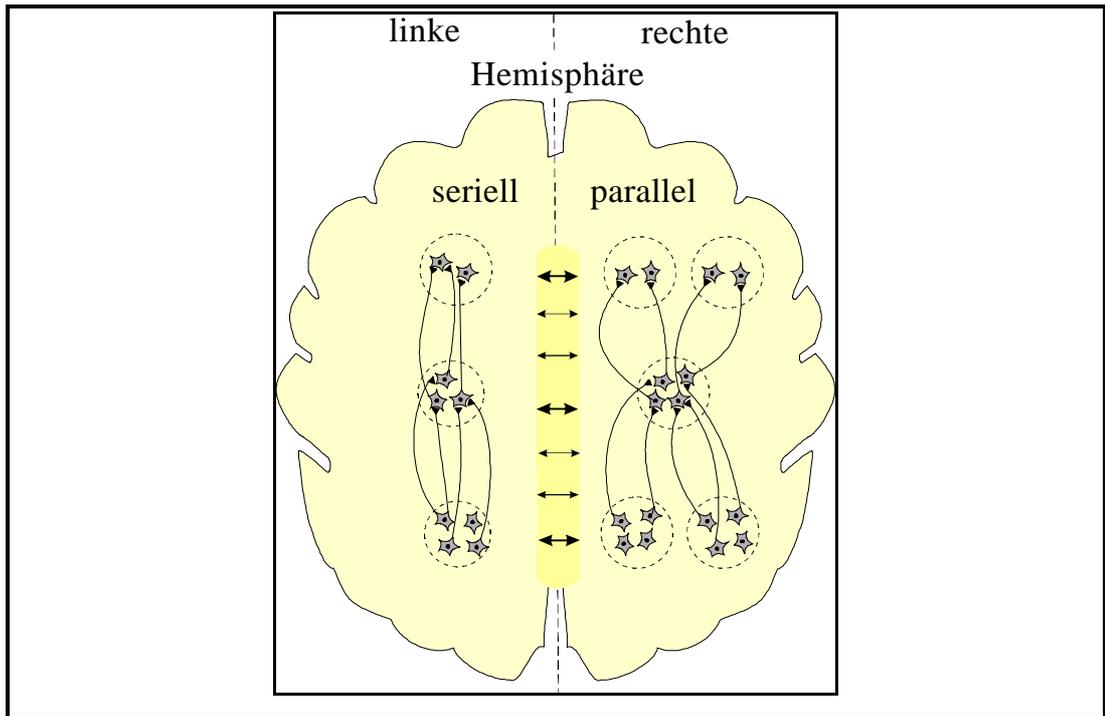


Abbildung 1.2

Symbolische Darstellung des *parallel-seriellen Hemisphärenmodells* unter Berücksichtigung weniger Funktionsmodule.

- Die Orientierung an den Schlüsselfunktionen der beiden Hemisphären macht es möglich, das *parallel-serielle Hemisphärenmodell* im **didaktischen Teil** dieser Arbeit auf wesentliche Inhalte zu reduzieren, so dass sich eine zugängliche Modellvorstellung entwickelt, an der Schüler und Lehrer² Lernprozesse reflektieren können. Die seriellen und parallelen Verarbeitungsstrategien sollen unter dem Gesichtspunkt der von occipital nach frontal reifenden Hirnarealen beschrieben werden. Die Integration von neuroplastischen Prozessen in das

² hiermit ist die weibliche Form ‚Lehrerinnen‘ mit einbezogen.

didaktische Konzept und die vorgestellten Unterrichtseinheiten sollen die Dynamik von Lernprozessen herausstellen.

1.2 Repräsentationen von parallelen und seriellen Schaltkreisen

1.2.1 Zur Lateralisierung des occipitalen Kortex

Dem occipitalen-frontalen Reifungsgradienten folgend, ist die Sehrinde im occipitalen Kortex bereits im frühkindlichen Alter gereift (vgl. Hubel, 1989). Bei der Verarbeitung von visuellen Reizen müssen viele Informationen in einer kurzen Zeit von der Retina über die Sehbahn in die primäre Sehrinde geleitet werden. Während dieses Prozesses wird der Lichtreiz in vier Submodalitäten (Farbe, Form, Bewegung und Tiefe) aufgeteilt, die auf parallelen Bahnen zum Gehirn gelangen (vgl. Kandel, 1996). Innerhalb der rechten und linken Sehrinde werden Reizmuster entsprechend dem *parallel-seriellen Hemisphärenmodell* unterschiedlich weiterverarbeitet. Raumbezogene Informationen werden vor allem in der rechten Hemisphäre verarbeitet. Hinweise dafür gab es bereits aus den dreißiger und vierziger Jahren des letzten Jahrhunderts (Sperry, 1968). So konnten bei visuellen-räumlichen Problemstellungen prägnante Überlegenheiten der rechten Gehirnhälfte gezeigt werden (Weisenberg et al., 1935). In einer anderen Studie wurden Abbildungen von Kreisbögen nur in eine Gesichtshälfte von Split-Brain-Patienten projiziert. Dann sollten die Patienten aus Kreisen mit verschiedenen Radien den zu dem Kreisbogen passenden herausfinden. Die Leistungen waren signifikant besser, wenn die Bilder in der linken Gesichtshälfte dargeboten wurden und so die rechte Hemisphäre an der Verarbeitung beteiligt war (vgl. R.D. Nebes, 1978). Erst in den 80er Jahren konnten Elektrophysiologen den diskreten rechtshemisphärischen Verlauf einer occipito-parietalen Leitungsbahn für die Objekterkennung und einer infero-temporalen für die Koordinatenberechnung bis hin zum Hippocampus beschreiben (O'Keefe et al., 1978). Die Reifung dieser rechtshemisphärischen Bahnen erfolgt zeitgleich mit den linkshemisphärischen Aspekten und wollen folglich entsprechend trainiert

werden. Auf solche Erkenntnisse hat sich die Schulpädagogik leider bis heute nicht bewusst eingestellt (vgl. hierzu Kapitel 5.4).

In Abbildung 1.2 ist dargelegt, dass die parallelen Bahnen auch über den parietalen Kortex hinaus nach frontal verlaufen. Diese direkte kortikale und die indirekte hippocampale Bahn erreichen letztendlich gemeinsam den PFC und ermöglichen ein ganzheitliches Erfassen der Informationen und ein schnelles Zuordnen von Lösungsstrategien (vgl. Mesulam, 1998). So werden den Funktionen der rechten Hemisphäre auch das Kreative und die Ideenproduktion zugeschrieben (vgl. Blakeslee, 1992 und Springer und Deutsch, 1998). Außerdem finden sich synthetische Fähigkeiten in der rechten Gehirnhälfte, die komplexe Informationen auf das Wesentliche reduzieren und das Hauptsächliche herausfiltern (vgl. Kolb und Whishaw, 1996). Die rechtshemisphärischen Funktionen zeigen, dass sie einen entscheidenden Beitrag zu den kognitiven Fähigkeiten des Menschen leisten. Noch vor drei Jahrzehnten hat Eccles der rechten Hemisphäre eine bewusste Verarbeitung aberkannt und vermutet, dass bewusste rechtshemisphärische Fähigkeiten von der linken Hemisphäre über das Corpus Callosum eingespielt werden (vgl. Eccles, 1975). Jedoch sieht eine neurobiologisch moderne Sichtweise die seriellen und parallelen Verarbeitungsstrategien als zwei Komponenten eines ganzheitlichen Bewusstseins, das sich emergent herausbildet und ganzheitlich auch die Ebene von synaptischen Verschaltungen innerhalb rechts- und linkshemisphärischer Subareale einbezieht (vgl. Mesulam, 1998). Auch diese Erkenntnis muss der Schulpädagogik im Rahmen der Förderung von Kreativität und problemlösendem Denken viel bedeuten (s. z.B. Kapitel 5.3.5).

1.2.2 Zur Lateralisierung des parietal-frontalen Kortex

Parietale Sinnesfelder (somato-sensorischer Kortex) reifen unmittelbar in Anlehnung an die frontal gelegenen motorischen Areale (somato-motorischer Kortex). Erst später reifen in diesen Arealen assoziative sensorische und prämotorische Felder. Insgesamt sind sie in ihrer Reifung gegenüber occipitalen

Assoziationsfeldern verzögert (Teuchert-Noodt und Lehmann, 2003). So reift im Kleinkindalter das sprachliche Erfassen vor dem Sprechen können, und darüber hinaus das gedankliche Erfassen vor einem gezielten Handeln können. Bemerkenswerterweise erhält sich diese Sequenzierung auch später, sodass auch ältere Schüler viel besser im assoziativen Verarbeiten als in der verbalen Gestaltung des Gelernten sind. Solche Erkenntnisse müssen Berücksichtigung finden, indem Schüler zu neuen Lerninhalten ein möglichst breiter assoziativer Zugang, zum Beispiel durch freies Beobachten, ermöglicht wird. Darüber hinaus müssen die neuronalen Netzwerke durch das gezielte Einfordern einer verbalen Umsetzung so strukturiert werden, dass ein flexibles Abrufen der gespeicherten Information möglich wird. Auch dieses methodische Vorgehen wird in Kapitel 5 konkretisiert.

Auch im parietalen Kortex ist die rechte Hemisphäre für die Verarbeitung räumlicher Prozesse verantwortlich. In den diesbezüglichen Untersuchungen wurden den Split-Brain-Patienten Strichzeichnungen von geometrischen Figuren gezeigt, die in Einzelteile zerlegt waren. Die Patienten sollten durch blindes Ertasten aus drei verschiedenen Formen die passende zuordnen. Die Testergebnisse wurden für die rechte und linke Hand getrennt dokumentiert. Sie zeigten, dass die linke Hand, die von der rechten Hemisphäre kontralateral gesteuert wird, die besseren Leistungen erbrachte, während die Erfolge der rechten Hand auf Zufallsniveau lagen. Ein weiterer Patient wurde gebeten, Würfel mit verschiedenfarbigen Seiten zu einem vorgegebenen Muster zusammenzulegen. Der Split-Brain-Patient zeigte eine auffällige Bevorzugung der linken Hand. Als er gebeten wurde, nur die linkshemisphärisch kontrollierte rechte Hand zu benutzen, sanken die Leistungen stark ab, und er versuchte die Tätigkeit mit der linken Hand zu unterstützen. Nachdem der Untersuchende die linke Hand des Patienten vom Tisch zog, schob dieser die Würfel wieder planlos umher. Nur die rechte Hemisphäre scheint das vorgegebene Muster zu erfassen und kann die Einzelteile zu einem „Ganzen“ zusammensetzen (rev. in Deutsch und Springer, 1995).

Teilweise ist sogar die Kommunikation eine rechtshemisphärisch induzierte Verarbeitungsstrategie des parietalen Kortex. Für das Erkennen und die Produktion der Sprachbetonung und -melodik, die Prosodie, existieren auf der rechten Hemisphäre ausgedehnte Areale (vgl. Kandel 1996). Sind die caudalen Bereiche geschädigt, ist das Erkennen der Prosodie beeinträchtigt, während die Läsion der rostralen Areale eine Störung der Produktion des Sprachrhythmus bedingt. Säuglinge und Kleinkinder sind früh darauf angewiesen, die Betonung der Eltern zu decodieren, bevor sie selbst Sprache mit der passenden Betonung produzieren. Das zeigt, welche hohe Bedeutung die verbale Kommunikation im frühkindlichen Alter für die Strukturierung von Informationen hat.

Bei 95 % der Mitteleuropäer werden Sprache und Schrift von der linken Gehirnhälfte verarbeitet (vgl. Loring et al., 1990). Weiterhin gilt es zu bedenken, dass die Entwicklung der menschlichen Kultur eng an Sprache und Schrift gekoppelt ist. Erst diese Fähigkeiten ermöglichten es, neue Entwicklungen und kulturelle Errungenschaften an die folgenden Generationen weiterzugeben. Demgegenüber haben Menschenaffen die Möglichkeiten der Sprachbildung nur sehr begrenzt, da ihr Sprachorgan nicht so leistungsfähig ist und die hemisphärische Repräsentation erheblich weniger Substrat zur Verfügung stellt. Wilde Schimpansen benutzen ca. 36 Laute (vgl. Calvin, 1994). Der Mensch ist ihnen dabei keineswegs überlegen, auch er kann rund drei Dutzend Laute bilden. Somit ist fraglich, worin der grundlegende Unterschied liegt, der die verbale Sprache des Menschen so leistungsfähig macht? Bei den Schimpansen sind die Laute der Wortschatz, jeder Laut hat seine Bedeutung. In der menschlichen Sprache haben die einzelnen Laute (Phoneme) eine untergeordnete Bedeutung, denn erst die Konstruktion zu Wörtern gibt den Phonemen einen Inhalt. Unsere Sprache ist nach festgelegten Regeln aufgebaut. Im Allgemeinen wird durch einen Satz die Information in der Form: „Wer hat wem, was, womit, wann, wo getan?“ vermittelt. Dabei teilt sich unsere Sprache in Abschnitte auf. Dies geschieht sowohl beim Sprechen als auch beim Hören. So werden Sequenzen von Phonemen zu Wörtern, Sequenzen von Wörtern zu Sätzen und Sequenzen von Sätzen zu Texten (vgl. Calvin, 1994).

Eine solches *lineares* Zusammenfügen von Einzelaspekten findet sich auch für andere linkshemisphärische Funktionen wieder (rev. in Lürken, 2000). Bei der Zeitplanung zum Beispiel müssen die zeitlichen Abläufe von Prozessen in eine Reihenfolge gebracht und so koordiniert werden. Schon 1963 beschrieb Efron die linkshemisphärische Verarbeitung bei der Beurteilung von zeitlichen Reihenfolgen. Interessanterweise gehören auch motorische Prozesse zu diesen seriellen Funktionen der linken Hemisphäre, unter denen das Durchziehen von Linien nur ein triviales Beispiel ist (vgl. Abbildung 2.3). Aus der Behandlung von Aphasikern weiß die klinische Forschung aber schon seit vielen Jahrzehnten, dass eine sequenzielle Bewegung der rechten Hand, die kontralateral von der linken Hemisphäre gesteuert wird, den Sprachneuerwerb positiv beeinflussen kann (rev. in Deutsch und Springer, 1995). In Lehrbüchern zur Kinesiologie sind weitere Phänomene beschrieben, bei denen körperliche Feedbackschleifen zum Ausbau neuronaler Strukturen führen (vgl. Klinghardt, 2004).

Es kann gefolgert werden, dass die serielle Verarbeitung ein grundlegendes Prinzip ist und durch bewusste lineare Aktivitäten gefördert, aber auch überfordert werden kann. Diese linearen Aktivitäten werden für den Unterricht in Kapitel 5. an konkreten Situationen entwickelt. In der Abbildung 1.2 ist die sequenzielle Verarbeitung durch eine Serialschaltung der Neuronenmodule symbolisiert.

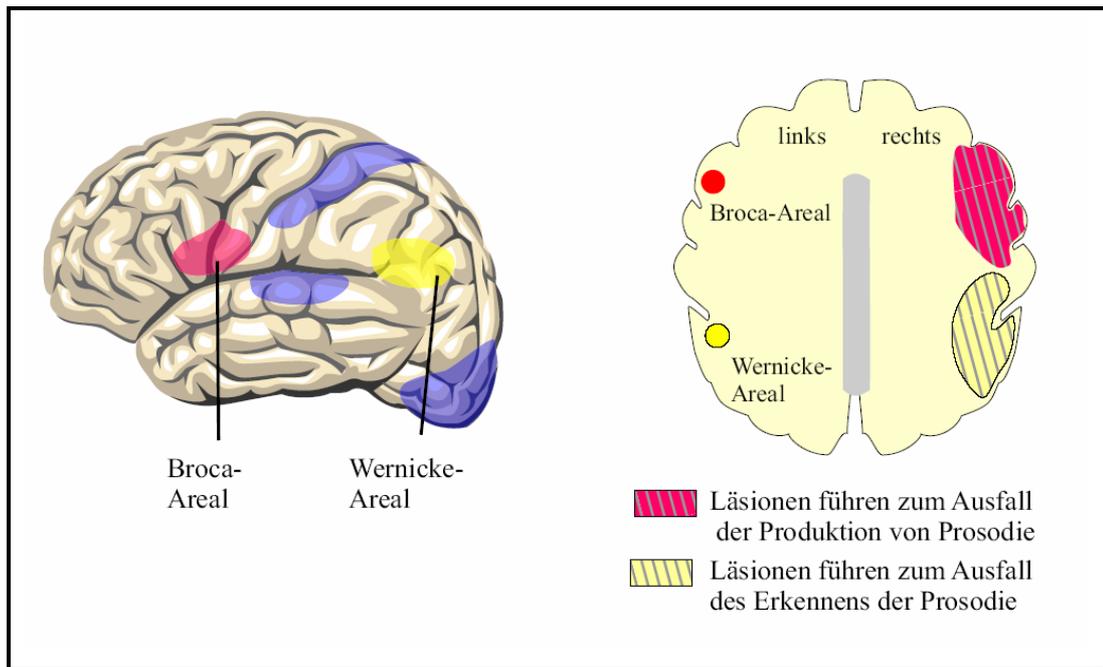


Abbildung 1.3

Verarbeitung von Sprache und Prosodie im Vergleich:

Die diskreten Areale zur Spracherkennung (gelb) und Sprachproduktion (rot) auf der linken Hemisphäre stehen ausgedehnten Arealen zum Erkennen (gelb schraffiert) und zur Produktion (rot schraffiert) von der Sprechmelodik auf der rechten Hemisphäre gegenüber (verändert nach Kandel, 1996). Bei dem Vergleich der Areale für die Sprach- und Prosodieverarbeitung fallen auch die neuroanatomischen Unterschiede deutlich auf, die serielle und parallele Verarbeitungsprinzipien widerspiegeln: Das Broca- und Wernicke-Areal stellen definierte Strukturen auf der linken Hemisphäre dar, die über den Fasciculus arcuatus seriell verbunden sind. Die Verarbeitung der Prosodie ist dagegen in größeren Arealen repräsentiert, die eine breitere integrative Verschaltung vermuten lassen (vgl. Kandel, 1996; Abbildung 1.3).

Grundsätzlich sind es gerade die hoch entwickelten, kognitiven Funktionen, die von der rechten oder linken Hemisphäre asymmetrisch gesteuert werden (rev. in Kolb und Whishaw, 1996, Abbildung 2.1). Inwieweit die individuelle Entwicklung der Hirnasymmetrie genetisch vorgegeben ist, wird in der Literatur kontrovers diskutiert (rev. in Springer und Deutsch, 1998). Vieles spricht dafür, dass die individuellen Dispositionen für eine rechts- bzw. linkshemisphärische Dominanz schon vorgeburtlich festgelegt sind (vgl. Molfes, 1988) und nachgeburtlich reifen. Untersuchungen an Patienten, bei denen in Folge schwerer Erkrankungen in verschiedenen Altersstufen die Entfernung einer Hemisphäre durchgeführt wurde (Hemisphärenektomie), haben dokumentiert, dass asymmetrisch gesteuerte Funktionen nicht von Geburt an ausgereift sind,

sondern sich während der Kindheits- und Jugendphase entwickeln (vgl. Bishop, 1993 und Stark, 1995).

Bei dem Phänomen der Rechts- bzw. Linkshändigkeit zeigt sich, dass die Zuordnungen zwischen den Funktionen und Hemisphären nicht immer eindeutig sind. Vielmehr können zum Beispiel bei Linkshändern auch sequenzielle Verarbeitungen - wie die sprachliche - in der rechten Hemisphäre stattfinden (vgl. Loring et al., 1990). Solche graduellen Phänomene zeigen die unterschiedlichen Dispositionen für rechts- bzw. linkshemisphärische Fähigkeiten, die bei der Reflexion des Lernverhaltens vor dem Hintergrund des *parallel-seriellen Hemisphärenmodells* entscheidende Bedeutung gewinnen. In der Literatur wird kontrovers diskutiert, ob der so genannte ‚kognitive Set‘ (= Strategien zur Problemlösungen) ausschließlich von den Hemisphärendominanzen bestimmt wird (rev. in Kolb und Whishaw, 1996). Unter didaktischen Aspekten treten solche Überlegungen allerdings in den Hintergrund. Vielmehr sollen das *parallel-serielle Hemisphärenmodell* mehr zur Kategorisierung von kognitiven Funktionen dienen.

1.3 Zur Lateralisation des Stirnhirns

Zuletzt reift das Stirnhirn. Die diesbezüglichen Erkenntnisse stammen aus den 80er Jahren. Denn erst mit Hilfe von immunhistologischen Transmitterstudien wurde es möglich, das Stirnhirn erstmals anatomisch abzugrenzen. Es ist das Areal, in dem sich Projektionen aus dem dorso-medialen Kern des Thalamus mit Projektionen aus den mesencephalen Dopaminkernen überlappen. Letztere reifen als meso-präfrontale Dopaminbahn extrem langsam heran und sind nach Untersuchungen in unserer Abteilung erst jenseits der Geschlechtsreife bei drei Monate alten Tieren gereift (Czaniera, 1993; Dawirs et al., 1994). Beim Menschen ist diese Bahn erst im Alter von etwa 18 Jahren ausgereift (vgl. Krasnegor; Lyon und Golman-Rakic, 1997). Konsequenzen dieser Befunde aus der neuesten Hirnforschung sollten dringend in der Pädagogik Berücksichtigung

finden. Als Lehrer habe ich mich bereits im Studium für dieses Gebiet besonders interessiert und meine experimentellen Arbeiten darauf ausgerichtet.

1.3.1 Übergeordnete Kontrollfunktion des Stirnhirns

Die Prinzipien der Konnektivität des präfrontalen Kortex spiegeln die multimodalen Informationsverarbeitungen in dieser Gehirnregion wider. Nahezu alle Verbindungen sind im Frontalhirn reziprok. Bei den kortikalen Verbindungen wechseln sich kontralateral und ipsilateral innervierte Kolumnen ab, die auch im präfrontalen Kortex diskret arbeiten und dessen Durchmesser etwa 300 - 700 μm betragen (vgl. Förstl, 2002). Durch diese vielschichtige Verschaltung und den ständigen Abgleich von Reizmustern ist eine Separation von lateralisierten Funktionen am Verhalten nur schwer beschreibbar (s.u.). So übt das Stirnhirn auf beide Hemisphären eine ganzheitliche Kontrollfunktion aus.

Schon aus den früheren Funktionsbeschreibungen des Frontalhirns wird die Komplexität dieses Gehirnareals deutlich. Persönlichkeitsstörungen bei Frontallappenläsionen sind schon seit dem 19. Jahrhundert beschrieben. Patienten mit Stirnhirnschädigung zeigen oft auffällige Defizite im Sozialverhalten (vgl. Röhrenbach, 1995). Die Fähigkeit zu erkennen, dass es für ein Problem mehrere Ursachen und Lösungen geben kann, ist in unserem Alltag eine entscheidende Fähigkeit unseres Stirnhirns. Studien bei Patienten mit Stirnhirn-Dysfunktionen zeigen, dass sie unter einem Verlust an „divergentem“ Denken leiden. Es fällt diesen Patienten oft schwer zu erkennen, dass Gegenstände multifunktional einsetzbar sind. In Testsituationen wird für solche Objekte jeweils nur eine Funktion benannt (rev. in Kolb und Wishaw, 1996). Diese beiden Beispiele mögen die integrativen, multimodalen Funktionen des Stirnhirns verdeutlichen.

Förstle (2002) beschreibt folgende Frontalhirnfunktionen: *Aufgabenwechselprozesse, strategische Planungsprozesse, Antizipation, selektive Aufmerksamkeit, Interferenzabwehr, kognitive Kontrolle, Gedächtnisabruf, soziale und emotionale Selbstregulation*. Bei der Fülle an dargestellten Funktionen des Frontalhirns wird deutlich, dass eine Lokalisationslehre, bei der

einzelnen Arealen der Hirnrinde wie auf einer Karte die Funktionen eins zu eins zugeordnet werden, ihre Berechtigung verlieren. Diese Lokalisationslehre beruht in den sensorischen und motorischen Rindenfeldern auf der topischen Organisation in den primären Arealen und auf einer deskriptiven, modularen Innervation, zum Beispiel durch U-Fasern der assoziativen Rindenfelder. Andererseits beruhen die hoch komplexen Funktionen des multimodal arbeitenden Stirnhirns auf der Zusammenarbeit vieler kortikaler Felder, die ihre Funktionalität durch Synchronisation integrativer Reizmuster erhalten. So ist es entgegen ursprünglicher Annahmen wohl unmöglich, den Stirnhirnfunktionen definierte und diskrete neuronale Korrelate zuzuordnen (Förstle, 2002). Zusammenfassend gilt, dass sich über das multimodale Interface, PFC, übergeordnete Funktionen realisieren, wie zum Beispiel Arbeitsgedächtnis, willentliche Entscheidungen und Sozialverhalten.

1.3.2 Lateralisierte Stirnhirnfunktionen in Verhaltenstests

In Verhaltenstests weisen die übergeordneten Kontrollfunktionen des Stirnhirns (Präfrontalkortex = PFC) in den Beiträgen von Röhrenbach (1995) kaum Lateralisierungseffekte auf. Röhrenbach hat in ihrer Arbeit Läsionsstudien mit psychologischen Testverfahren kombiniert und die Probanden unter den Gesichtspunkten ‚räumlich-zeitliche Organisation von Gedächtnisinhalten‘, ‚prospektives Denken‘ und ‚affektives Entscheiden‘ untersucht: Gerade bei kognitiven Prozessen (wie bei der räumlich-zeitlichen Organisation von Gedächtnisinhalten) zeigten sich in Röhrenbachs Arbeit kaum Lateralisierungseffekte bei rechts- oder linksseitigen Stirnhirnschädigungen. Beim prospektiven Denken offenbarten sich leichte Lateralisierungseffekte. So zeigten Patienten mit rechtshemisphärischen Läsionen im Frontalhirn signifikant mehr perspektivische Ideen als linkshemisphärisch lädierte. Beim prospektiven Erinnern zeigten sich allerdings wieder keinerlei Lateralisierungseffekte. Auch bei affektiven Entscheidungen konnte Röhrenbach keine Unterschiede in der Informationsverarbeitung im Stirnhirn bei rechts- oder linkshemisphärischen Reizdarbietungen mittels Tachistoskop nachweisen. (vgl. Röhrenbach, 1995)

Die Diskrepanzen zwischen den Verhaltenstests von Levy (1978), die eine Lateralisierung der Funktionen des occipitalen und parietalen Kortex signifikant nachweisen, und den Ergebnissen zur Lateralisation des Stirnhirns von Röhrenbach liegen wohl in den komplexen Kontrollfunktionen des Frontalhirns begründet. Aus diesen Überlegungen ergibt sich, dass eine Lateralisation des Stirnhirns nicht wie in anderen Kortexarealen über Verhaltensexperimente wirklich belegt werden kann. Erst eine Kombination von Erkenntnissen aus Tiermodellen und exakteren, bildgebenden Messverfahren wurde nötig, um die funktionelle Asymmetrie des PFC besser beschreiben zu lernen.

1.3.3 Asymmetrie von Transmittern im Stirnhirn

Zu den asymmetrischen Verteilungen von Neurotransmittern in beiden Hemisphären ist im Prinzip bisher wenig gearbeitet worden. Es soll hier auch nicht auf allgemein mögliche asymmetrische Zustände eingegangen werden, sondern das Augenmerk wird auf den PFC gerichtet, der in seiner übergeordneten Funktionalität von Transmittersystemen gesteuert wird, die stoffwechselfysiologisch eng miteinander kommunizieren. Wie wir heute aus der klinischen Psychiatrie wissen, ist eine pathologisch geprägte rechts-links Imbalance von Transmitterinteraktionen ein wesentlicher Bestandteil der Psychose. Deswegen sollte es gerade im Kindesalter von großer Bedeutung sein, dass die präfrontale Transmitterreifung möglichst harmonisch vonstatten gehen kann. Das spielt insbesondere bei Kindern eine Rolle, die keine ausgeprägte Rechtspräferenz beim Schreibenlernen haben bzw. eine deutliche Linkspräferenz aufweisen.

Im PFC existiert eine enorme Bandbreite von Transmittersystemen, die hier von allen subkortikalen und kortikalen Systemen zusammenlaufen. Von besonderer Bedeutung ist das dopaminerge System, das von einer aus dem Mittelhirn aufsteigenden prominenten Projektionsbahn gebildet wird. Die hohe Bedeutung der langsamen Reifung dieser Bahn wird uns heute durch die im Kindesalter auftretende Aufmerksamkeits-Defizit-Symptomatik (ADS) vor Augen

geführt. Diese bei Kindern zunehmend auftretende Verhaltensauffälligkeit hat u. a. ihre Ursache in einer extrem retardierten Dopaminreifung im Stirnhirn. So titulierte der „Spiegel“ ein Interview mit Prof. Dr. Hüther „Funkstille im Frontalhirn“ („Spiegel“, 11/2002). Ähnliche pathologische Verhaltensmuster bei Stirnhirnschäden finden sich in Dokumentationen über Kinder und Jugendliche, die unter ADHS leiden. Ist der Dopaminspiegel im Frontalhirn zu gering, fehlt die Kontrollfunktion, die einen Menschen in seinem sozialen Gefüge angemessen reagieren lässt. Hier setzt die Wirkung des Wirkstoffs Methylphenidat (unter dem Medikamentennamen Ritalin® bekannt) ein. Methylphenidat verhindert nach Forschungen von Nora Volkow, Psychiaterin am Brookhaven National Laboratory in New York, die Wiederaufnahme von Dopamin in die Präsynapse (vgl. Volkow et al., 1999). So bleibt der Transmitter länger im synaptischen Spalt und erhält eine Langzeitaktivierung der postsynaptischen Zellen. Der Wirkungsmechanismus der Synapse ist analog zu der von Kokain, allerdings zeigt Methylphenidat kein Suchtpotenzial. Diese knappen Hinweise möchten darauf aufmerksam machen, wie wichtig es ist, dass sich Pädagogen mit den wissenschaftlichen Inhalten befassen, um den Problemen in den Schulen besser entgegenzutreten (vgl. Schäfers, Grund und Teuchert-Noodt, 2005)

Die Reifung von Stirnhirnfunktionen ist, abgesehen von endogenen Mechanismen, ganz wesentlich von zwei Faktoren abhängig (vgl. zur Lateralisierung Berridge et al, 2003 und zur Transmitterreifung Teuchert-Noodt, 2000):

- Transmitter reifen aktivitätsgesteuert, und somit stehen Umweltbedingungen in einer direkten Beziehung zu den physiologischen Prozessen der reifenden Neurone und Nervenetze im Frontalhirn.
- Über die Umwelt kommen auch Stressoren zur Wirkung, die kognitive und affektive Dysfunktionen veranlassen.

Kongruent zu diesen Maximen konnte an unserem Tiermodell eine umwelt- und stressbedingte Veränderung in der Reifung des dopaminergen

Systems gezeigt werden. So bedingen restriktive Aufzuchtbedingungen eine hoch signifikant verminderte Reifung der dopaminergen Innervationen im PFC (Neddens, 2001 und Winterfeld, 1998). Gleichwohl konnte nach der einmaligen Gabe von Methamphetamin (MA) im juvenilen Entwicklungsstadium (14 d) eine hoch signifikant verringerte Faserdichtereifung dokumentiert werden (vgl. Darwis et al., 1994). Als Folge einer verminderten Dopamininnervation im PFC reifen die Pyramidenzellen verändert, und das verbunden mit einer höheren lokalen GABA- und Serotonin-Innervation der pyramidalen Dendriten (vgl. Nossoll et al, 1997, Bläsing et al, 2001 und Neddens et al., 2002).

Die dopaminerge Innervation des PFC zeigte schon in früheren Studien eine Lateralisierung. Allerdings ist die Ausprägung der lateralisierten Verteilung nicht einheitlich dokumentiert. Die Muster der Lateralität wechseln von Tierart zu Tierart und hängen, wie oben dargelegt, von Umweltfaktoren während der Aufzucht ab. Eine einfache Futterdeprivation zeigte, dass die Dopaminkonzentration im Vergleich zu den Kontrolltieren im linken PFC signifikant höher ausfiel als in der rechten (rev. in Berridge et al., 2003). Andere Studien zeigten, dass die Dopamininnervation im rechten PFC höher ist. Insgesamt zeigt die Asymmetrie der Dopamininnervation eine größere Anfälligkeit für Stressoren als die anderer Transmittersysteme. So haben Studien erwiesen, dass die Unterschiede zwischen Ratten mit stereotypen Verhaltenweisen einen höchst signifikanten Unterschied in der Dopamininnervation aufwiesen. Dagegen lagen die Unterschiede bei den Quantifizierungen der asymmetrischen Verteilung des Serotoninrezeptors 5-HT auf einem niedrigeren Signifikanzniveau (rev. in Berridge et al., 2003).

1.3.4 Asymmetrische Verarbeitung von Gedächtnisinhalten im PFC

Die HERA-Theorie (Hemispheric Encoding/Retrieval Asymmetry) geht davon aus, dass Gedächtnisinhalte im PFC asymmetrisch verarbeitet werden (Tulving, 1994). So haben Untersuchungen mit der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) gezeigt, dass beim Lernen (Encoding) und beim Abrufen

(Retrieval) von Gedächtnisinhalten unterschiedliche Seiten des Stirnhirns involviert sind. Außerdem existieren grundsätzliche Unterschiede zwischen der Verarbeitung von episodischen und semantischen Gedächtnisinhalten (s. Abbildung 1.4). So ist der linke PFC für die Kodierung und der rechte für den Abruf von episodischen Gedächtnisinhalten verantwortlich, dieses gilt sowohl für ‚verbale‘ als auch für ‚non-verbale‘ Reize (Habib et al., 2003).

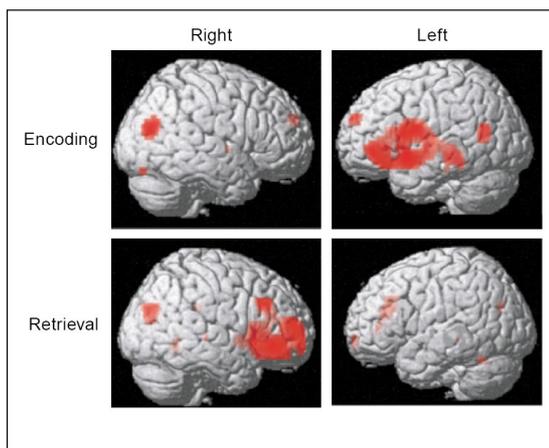


Abbildung 1.4

Aktivierung des linken bzw. rechten PFC in einer PET-Studie beim Speichern (Encoding) und Abrufen (Retrieval) von episodischen Gedächtnisinhalten.

Die PET-Studien zeigen eine deutlich höhere Aktivierung des linken PFC beim Speichern und des rechten beim Abrufen von episodischen Gedächtnisinhalten (aus: Habib et al., 2003)

Im Gegensatz dazu wird beim Abruf von semantischen Gedächtnisinhalten der linke PFC aktiviert (Blanchet et. al., 2001). Die linksseitige präfrontale Aktivierung wird nach dem CARA (cortical asymmetry of reflective activity) - Modell durch eine hohe Anforderung beim Abrufen von episodischen Details erklärt (Nolde et al., 1998).

Diese funktionellen Unterschiede des rechten und linken PFC im Rahmen der Gedächtnisbildung lassen sich in das *parallel-serielle Hemisphärenmodell* integrieren. So basieren episodische Lernvorgänge auf semantischen Prozessen (Habib et al., 2003). Der semantische Aufbau von Gedächtnisinhalten beruht also auf linearen Verarbeitungsstrukturen, so dass auch für den linken PFC ein sequenzielles Verarbeitungsmuster zu fordern ist. Beim rechtsseitigen episodischen Erinnern muss eine Vielzahl von Informationen bewertet werden (Habib et al., 2003), so dass eine komplexe Verarbeitung nötig ist. Die Zuordnung

zum rechten PFC entspricht dem parallelen Verarbeitungsmuster der rechten Hemisphäre.

Auch die Untersuchungen von Suchan et al. (2002) haben bei den lateralisierten Verarbeitungen von rein visuellen Gedächtnisinhalten im Stirnhirn eine Asymmetrie gezeigt, die ebenfalls dem *parallel-seriellen Hemisphärenmodell* entspricht. Dabei wurden räumlich-visuelle Gedächtnisinhalte im rechten Stirnhirn verarbeitet. Das linke Stirnhirn wurde angesprochen, wenn sequenziell dargebotene Gedächtnisinhalte abgerufen werden sollten.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass das *parallel-serielle Hemisphärenmodell* ein brauchbares Werkzeug für Pädagogen ist. Prinzipiell gilt, dass die *Aufnahme* von Informationen -über den *occipital-parietalen* Kortex-, die *Verarbeitung* von Informationen -über den *parietal-frontalen* Kortex- und die *Speicherung* von Informationen -über den *frontalen* Kortex- geleistet werden. Diese Teilleistungen werden -nach dem geforderten seriellen bzw. parallelen Verarbeitungsmustern- von den Hemisphären unterschiedlich dominiert. In den im Kapitel 5 beschriebenen Unterrichtseinheiten trägt das *parallel-serielle Hemisphärenmodell* dazu bei, Kortexfunktionen in systematische Bezüge zu setzen. Pädagogen und Schülern wird so der Einstieg in die funktionellen neurologischen Grundlagen des Lernens erleichtert.

Eine genauere Kenntnis der hier umrissenen neurobiologischen Details sollte also als Grundlage für die Entwicklung hirngerechter Unterrichtskonzepte genutzt werden. Damit ergibt sich an dieser Stelle die Frage, wie sich Lerninhalte auf asymmetrische Weise in das Gehirn plastisch einschreiben. Der **Hirnplastizität** wird deswegen hier einleitend ein eigenes Kapitel gewidmet, denn sowohl bei der Reifung seriell und parallel arbeitender Nervenetze als auch beim Lernen finden essentielle Umbauprozesse statt, bei denen die Subsysteme kompensatorisch interagieren.

2 NEUROBIOLOGISCHE GRUNDLAGEN

2.1 Die Kompensationstheorie: Ein Lernmodell

Das Leitwort der **Plastizitätsforschung** heißt „*aktivitätsgesteuerte Reorganisation*“ von Nervennetzen. Im experimentellen Teil dieser Arbeit wird am Tiermodell gezeigt, dass umweltbezogene Reize einen entscheidenden Einfluss auf die Ausprägung der präfrontalen Asymmetrie von Transmittern im präpubertären Alter nehmen (vgl. Teuchert-Noodt und Lehmann, 2003). Auch beim Menschen spezialisieren sich die Hemisphären im Kindesalter in kritischen Phasen und erlangen die Fähigkeiten, die im *parallel-seriellen Hemisphärenmodell* zusammengefasst sind (s. Abbildung 2.1).

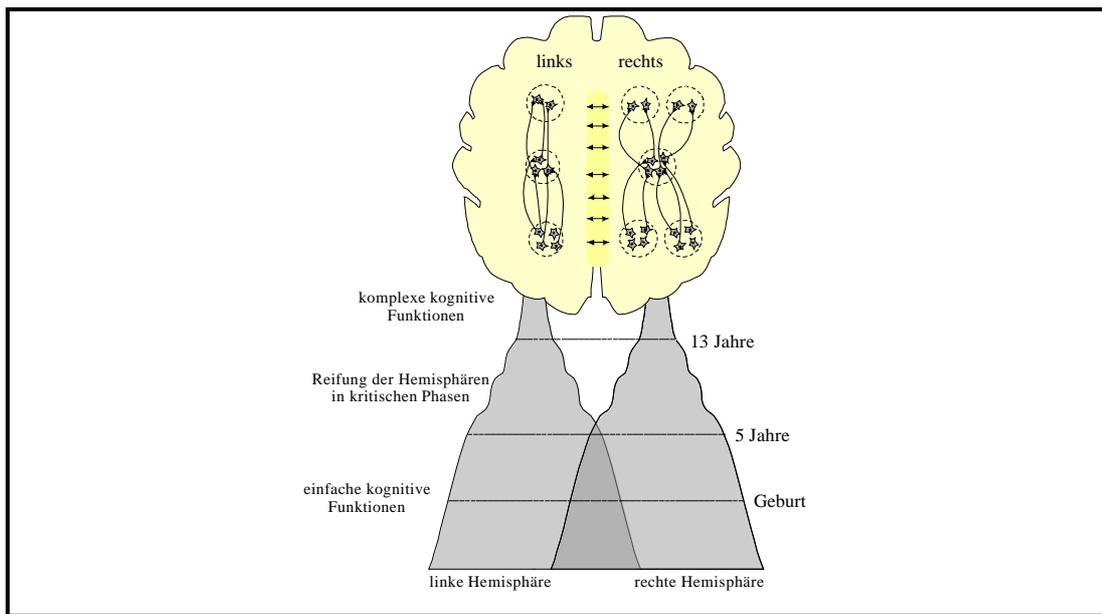


Abbildung 2.1

Modellvorstellung zur Entwicklung der spezialisierten Hemisphärenfunktionen, die pränatal beginnt und nach der Pubertät als stark eingeschränkt gilt. Dabei repräsentiert die Schnittfläche die plastische Potenz der Hemisphären Funktionen der kontralateralen Seite zu übernehmen. Die Entwicklung der Asymmetrie verläuft im Zeitfenster des fünften und dreizehnten Lebensjahres nicht kontinuierlich. (als Wellenlinie dargestellt; verändert nach Kolb und Whishaw, 1996).

Auf der Ebene von Neuronen und Nervennetzen beschreibt die Kompensationstheorie der Synaptogenese von Wolff (1978) den theoretischen Hintergrund solcher Reorganisationsprozesse. In seiner Modellvorstellung konkretisiert Wolff das „Hebbsche Cell assembling“ (vgl. Hebb, 1948) und vervollständigt es in entscheidenden Punkten. Wolff geht wie Hebb (1948) davon aus, dass die synaptischen Kontakte durch sensorische Reize aus der Umwelt verändert und durch Wiederholung der Reize stabilisiert werden. Allerdings postuliert er über Hebb (1948) hinausgehend, dass sich Verbindungen nicht zurückbilden müssen, die in keinen funktionellen Zusammenhang treten, sondern unter Hemmung gestellt werden können, um später erneut reaktiviert werden zu können. Mit der Ausbildung spezifischer Verbindungen (Synaptogenese) nimmt nach Wolff die Wahrscheinlichkeit für synaptische Kontakte mit zunehmender Reifung des ZNS immer weiter ab. Das liegt vor allem an der fortschreitenden Myelinisierung von Nervenbahnen. Auch der Zelltod spielt eine wichtige Rolle (= selektiver Zelltod).

Dementsprechend spricht Wolff auch von primären Faktoren, die die Morphogenese des Gehirns steuern, er nennt zum Beispiel die Mitoserate in der Ontogenese und die Blutversorgung durch einwachsende Arterien (vgl. Wolff 1978). Wahrscheinlich werden durch solche morphogenetischen Faktoren die Rahmenbedingungen für einen funktionsorientierten Aufbau des ZNS geschaffen, da sie die Möglichkeiten der Synapsenbildung einschränken. Sekundäre Faktoren, die selektiv den Zelltod hervorrufen, ermöglichen eine spezifischere Einschränkung der Synapsenbildung. Die Wahrscheinlichkeit für die Synaptogenese wird weiter durch die Myelinisierung der Axone sowie durch räumliche Anordnung der Neurone bestimmt.

Wolff bezieht den Begriff der Synaptogenese allerdings nicht auf die Entwicklung des ZNS allein. Er sieht die Synaptogenese als lebenslangen Prozess, der entscheidend an der Gedächtnisbildung beteiligt ist. Dabei steht das Spektrum der hemmenden und erregenden synaptischen Verbindungen im Mittelpunkt der Betrachtungen. Ausgehend von den Untersuchungen von Sotelo (1978), der eine

erhöhte Anzahl von Dornen an Purkinje-Zellen nach Durchtrennung der Kletterfasern festgestellt hat, fordert Wolff: Jede Zelle hat ein optimales Membranpotential, das sie anstrebt.

Wenn zum Beispiel excitatorische Reize ein Neuron erregen, werden diese durch inhibitorische ausgeglichen. Bei den Purkinje-Zellen in den Untersuchungen von Sotelo lag der umgekehrte Fall vor. Hier entfiel der excitatorische Reiz, und die Zelle bildete neue Dornen aus, mit deren Hilfe sie den Verlust an Erregung kompensierte. Um den Ablauf dieser „Kompensation“ besser zu strukturieren, teilt Wolff den Prozess in drei Zustandsformen ein (s. Abbildung 2.2):

1. Der strukturelle Zustand

Spektrum der excitatorischen und inhibitorischen Synapsen

2. Der morphogenetischer Zustand

Neuronale Differenzierung (Ausprägung von Axonen und Dendriten, Grad der Myelinisierung, vorhandene Transmitter)

3. Der funktionelle Zustand

Veränderung durch neuronale und/oder sensorische Reize, die auf die spezifischen postsynaptischen Potentiale wirken.

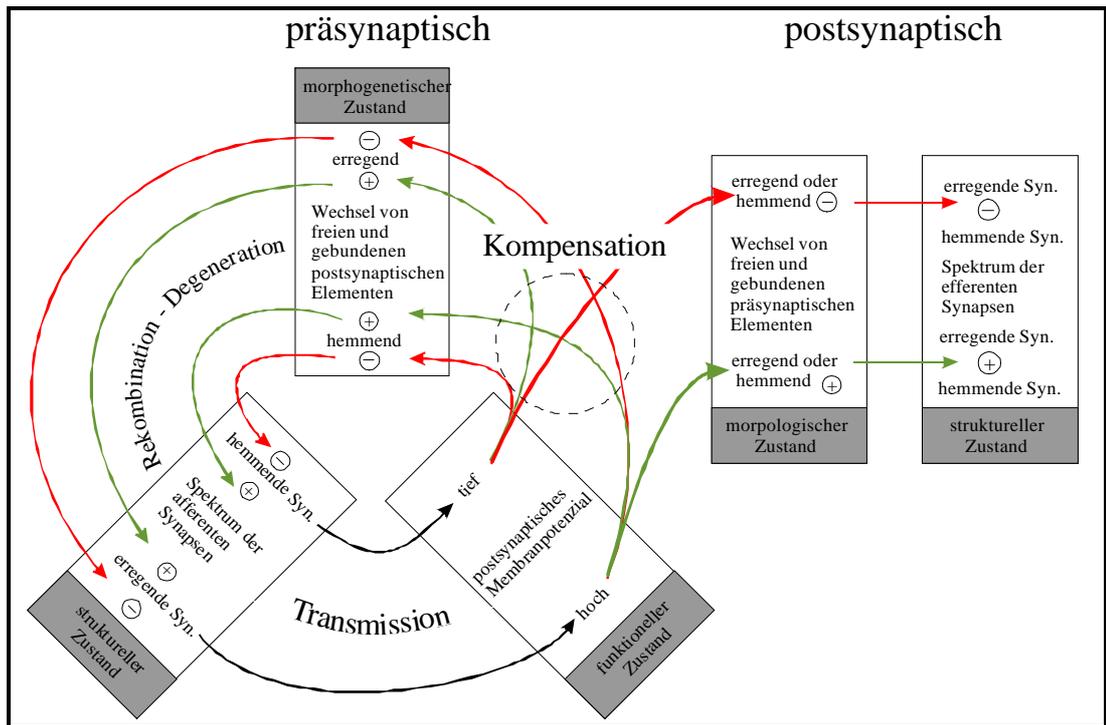


Abbildung 2.2

Graphische Darstellung des Regelkreises der drei Zustandsformen der Synaptogenese auf präsynaptischer Seite und deren Wirkung auf der postsynaptischen Seite. Rote Pfeile stellen eine Verminderung des nächsten Stadiums dar, grüne eine Erhöhung (nach Wolff, 1983).

Diese drei Zustandsformen wirken aufeinander in Form eines Regelkreises (s. Abbildung 2.5): Der Wechsel von gebundenen und freien postsynaptischen Elementen steuert das afferente Synapsenspektrum. Werden zum Beispiel mehr inhibitorische Afferenzen aufgenommen, so steigt auch das Gesamtspektrum der inhibitorischen Wirkung. Dieses hat wieder direkten Einfluss auf das postsynaptische Membranpotential (funktioneller Zustand). Steigt das Spektrum inhibitorischer Afferenzen, dann sinkt das Membranpotential. Der so beeinflusste funktionelle Status hat sowohl Auswirkungen auf den prä- als auch auf den postsynaptischen Teil des Neurons. Auf der postsynaptischen Seite schließt der funktionelle Zustand den Regelkreis und bewirkt die Kompensation, indem ein hohes Membranpotential eine Verringerung des excitatorischen und eine Vergrößerung des inhibitorischen Angebotes bewirkt. Ein niedriges Membranpotential erzeugt genau das Gegenteil. So werden die hemmenden und erregenden Komponenten an einer Nervenzelle in einem sensiblen Gleichgewicht

gehalten. Das so kompensierte präsynaptische Wirkungsspektrum bringt sich in das funktionelle Gefüge des übergeordneten Systems wieder ein. Dieser Prozess ist fortlaufend, solange morphoge Einflussfaktoren als positive Störgrößen bestehen. Insbesondere können Hormone solche Störgrößen darstellen.

Jeglicher Einfluss, zum Beispiel ein sensorischer Reiz aus der Umwelt, wird dieses Gleichgewicht stören. Das Neuron ist gezwungen, es eigendynamisch durch andere synaptische Kontakte wiederherzustellen. So findet durch jede sensorische Information, die wir mit unseren Sinnesorganen aufnehmen, eine gewisse adaptive Umstrukturierung von Synapsen statt. Eine anhaltende Gedächtnisbildung ist so anatomisch fast garantiert. In der Ontogenese werden Primärverschaltungen initiiert, die Nervenzellen zwar für sich selbst in einen funktionellen Zusammenhang setzen, aber nicht als funktionell im Sinne ihrer späteren Bedeutung im ZNS realisieren. In dieser Hinsicht sinngebend wird diese Verschaltung erst, wenn Reize aus der Umwelt in die Verschaltung einfließen und das primäre Gleichgewicht stören, so dass Synapsen degenerieren und sich neu organisieren können.

Die gleichen Mechanismen, die in der Kompensationstheorie auf der Ebene von Neuronen und Nervennetzen formuliert sind, können auch für ganze Subsysteme des Gehirns geltend gemacht werden, somit auch für die Entstehung und Ausreifung serieller und paralleler Schaltkreise in beiden Hemisphären bei der Sprachentwicklung. Von dem ersten deutlichen „Plappern“ bis zu einer Sprachkompetenz, die sich der des Erwachsenen nähert, vergehen in der Regel vier bis fünf Jahre der menschlichen Entwicklung. Natürlich spiegeln sich hier ganz klar Reifungsgeschehnisse wider, die auf pränatale Rahmenbedingungen aufbauen. So haben 67 Prozent der Rechtshänder ein größeres Planum temporale in der linken Hemisphäre, die in dem Bereich der Repräsentation von Sprache eine signifikante Asymmetrie zeigt und schon in der 31. Schwangerschaftswoche ausgebildet wird. Gleiche Muster des Spracherwerbs in den verschiedenen Kulturen deuten außerdem auf eine einheitliche Prädisposition in Form einer primären Verschaltung der neuronalen Netze hin (rev. in Kandel, 1996).

Die Vielfalt der menschlichen Sprachen und Dialekte zeigt jedoch eindrucksvoll, dass vor allem Umweltfaktoren, wie die vom Säugling gehörten Spezifikationen einer Muttersprache, die verbale Entwicklung des Individuums beeinflussen. So stellt der Spracherwerb eine Realisation des Modells der aktivitätsgesteuerten Reorganisationsprozesse von Wolff (1983) auf höchster kognitiver Ebene dar. Die Primärverschaltungen scheinen innerhalb einer kritischen Phase aufzubrechen und im Rahmen einer Reorganisation durch Reize aus der Umwelt in einen funktionellen Zusammenhang gebracht zu werden. Teuchert-Noodt hat solche kritischen Phasen in den Arealen der sensorischen Systeme bei Vögeln bereits mit deren sensiblen Prägungsphasen korrelieren können (Teuchert-Noodt, 1991). Auch für den Säuger ist die Existenz einer „sensiblen Phase“ während der Stirnhirnreifung nachgewiesen (Dawirs et al., 1992, Teuchert-Noodt & Tootzy, 1997) und hat beim Menschen auch im Spracherwerb zwischen dem vierten und vierzehnten Lebensjahr ihre Gültigkeit.

Jedenfalls weiß man, dass in sozialer Isolation aufwachsende Kinder (so genannte Kaspar-Hauser-Kinder) nach der Pubertät Schwierigkeiten haben, eine Sprache zu erlernen (vgl. Kandel, 1996). Auch das Erlernen von Fremdsprachen ist mit dem Ende der Pubertät eingeschränkt, und wirklich zweisprachig können nur diejenigen aufwachsen, die innerhalb des besonders plastischen Zeitraums immer wieder mit der zweiten Sprache konfrontiert werden. Sprachliche Fähigkeiten können allerdings auch verlernt werden, so dass Menschen, die bestimmte Sprachen gelernt haben, manche Laute nicht aussprechen oder akustisch differenzieren können. Zum Beispiel sind Japaner außerstande, zwischen den Phonemen 'r' und 'l' zu unterscheiden. Menschen mit der Muttersprache Englisch können nicht den Unterschied eines harten und weichen 'l' im Russischen gegeneinander abgrenzen. Demgegenüber beherrschen Kleinkinder aus beiden Gruppierungen die Differenzierung der Phoneme (vgl. Kandel, 1996). Ihre sprachlichen Anforderungen verlangen allerdings nicht diese speziellen Fähigkeiten, und so werden die synaptischen Kontakte zurück- und umgebildet, und eine Degeneration von Nervenbahnen findet statt. Die frühkindlich vorhandenen Fähigkeiten werden somit zu Durchgangsstadien für

daraus hervorgehende höhere und komplexere Fähigkeiten. Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage für ein dynamisches neurodidaktisches Unterrichtsmodell.

2.2 Schulische Bezüge der Gehirnasymmetrie und Neuroplastizität

Es ist nicht leicht, die neurobiologischen Erkenntnisse in schulische Bezüge zu setzen. Wenn es um den Bereich des physischen Lernens geht, findet sich in der pädagogischen Literatur oft eine deskriptive Auflistung lateralisierter Funktionen (vgl. Bovet und Huwendiek, 1998; Abbildung 2.3).

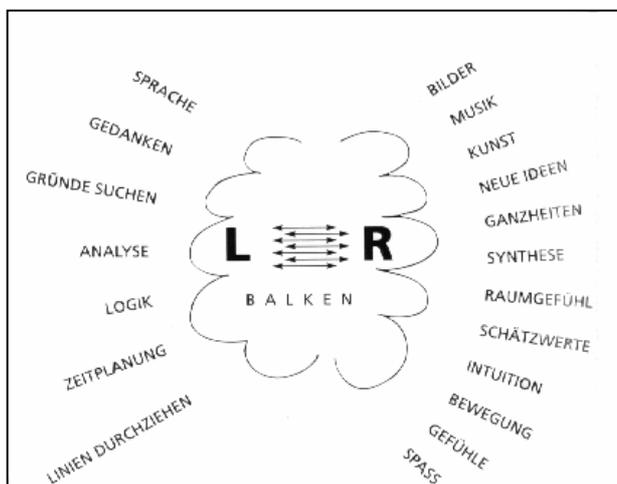


Abbildung 2.3

Funktionen der beiden Hemisphären (aus: Bovet und Huwendiek, 1998, S.236).

Im Gegensatz zu solch deskriptiven Darstellungen lateralisierter Funktionen bietet das *parallel-serielle Hemisphärenmodell* einen für die Pädagogik brauchbaren Zugang zu den Verarbeitungsstrategien des Kortex, da es Pädagogen eine vereinfachte Vorstellung sequenzieller und komplexer Gehirnfunktionen bietet. So ermöglicht es den Schülern und Lehrern das Lernverhalten systematischer zu reflektieren und zu verbessern.

Die Kompensationstheorie von Wolff (1978) zeigt, dass die seriellen und parallelen Schaltkreise in beiden Hemisphären über die gesamte Entwicklungsdauer hindurch durch endogene Störgrößen (reifende Transmitter, Hormone) und zusätzlich durch exogene Faktoren (allgemeine Umweltreize, Stressoren) in ihrer Ausprägung beeinflusst werden. Kompensationsmechanismen

realisieren Reorganisationsprozesse, in denen ein struktureller Zustand eines Nervennetzes in den nächsten (einer Störung besser angepassten) strukturellen Zustand übergeht. Somit bildet jeder strukturelle Zustand eines Nervennetzes die Grundlage für den nächsten Anpassungsschritt. Da diese Reorganisationsprozesse somit immer aktivitätsgesteuert von jedem Schüler individuell angestoßen vonstatten gehen, ergeben sich -von der Auswahl der Unterrichtsmethoden bis zu der Gestaltung von Arbeitsmaterialien- konkrete Anforderungen an einen „gehirngerechten“ Unterricht (s. Kapitel 5.3).

Da die Dispositionen für links- bzw. rechtshemisphärische Begabungen nicht immer gleich sind (rev. in: Springer und Deutsch, 1998), kommt es für die Kinder und Jugendlichen darauf an, die individuellen Stärken zu kennen und an den Schwächen zu arbeiten. Die Erfahrungen in meinen Leistungskursen Biologie haben gezeigt, dass rechtshemisphärisch disponierte Schüler zu reflektierten, stringenteren Arbeiten motiviert werden können, wenn ihnen die neuronalen Grundlagen der Informationsverarbeitung bewusst gemacht wurden und sie somit den Sinn des Einübens in logisches Denken erkennen.

Die Umsetzung des *parallel-seriellen Hemisphärenmodells* im Unterricht verwirklicht Ideen, die Klafki (1963) in seinen bildungstheoretischen Überlegungen entwickelt hat. Klafki hat den Begriff der „Zukunftsbedeutung“ für Lerninhalte und methodische Schwerpunkte geprägt. Die konsequente Ausbildung von seriellen und parallelen Schaltkreisen im Kortex ist ein strukturelles Korrelat dieser Theorien und bietet Lehrern einen modellhaften Zugang zu dieser komplexen Materie (vgl. Kapitel 5 und 6). So zeigt das *parallel-serielle Hemisphärenmodell* ganz allgemein, wie aus neurobiologischen Erkenntnissen entwickelte Modellvorstellungen den Lernprozess positiv begleiten und unterstützen können. Im Speziellen wird darauf später in Kapitel 5.3 zurückgegriffen.

2.3 Fehlentwicklungen der Gehirnasymmetrie im Kindesalter

Fehlentwicklungen der Gehirnasymmetrie induzieren Lernschwierigkeiten und im Ernstfall sogar Psychosen (Rahimi, 2001). In diesem Zusammenhang erhält das *parallel-serielle Hemisphärenmodell* eine besondere Bedeutung für die unterschiedlichen Lerndispositionen von Kindern. Die frühkindliche Festlegung für asymmetrische neuronale Aktivitäten ist speziell für die Händigkeit in der Literatur dokumentiert (vgl. Bründel, 1993). Bei Säuglingen besteht bereits eine signifikante Korrelation zwischen der Richtung frühkindlicher Drehbewegungen des Kopfes und der späteren Ausprägung einer Handpräferenz (vgl. Viriam, Trahewitz and Krap, 1978). Die Ableitung evozierter Potentiale nach auditiver Darbietung von einzelnen Silben zeigt bereits nachgeburtlich eine deutlich sprachliche Präferenz der linken Hemisphäre (vgl. Molfese, 1975). Später, im Alter von acht Monaten, weisen Babys eine rechtshemisphärische Spezialisierung auf musische Reize, wie Klavierakkorde, auf (vgl. Wada, 1977). Aus diesen Untersuchungen kann gefolgert werden, dass viele Kinder schon vor dem Schulalter für individuelle kognitive Strategien disponiert sind. Bereits früh in der Entwicklung kommen also umweltbezogene Aspekte zum Tragen, denen bislang kaum Beachtung geschenkt wurde.

Die jüngste Plastizitätsforschung hat gezeigt, dass Umwelterfahrungen in den werdenden Verschaltungen des frühkindlichen Gehirns ihren Niederschlag finden. Dieses trifft gerade auch auf die Reifung serieller und paralleler Schaltkreise zu. So fordert das rechtshändige Schreiben die linke Hemisphäre heraus, die dafür verfügbaren Nervenetze auszubauen. Andererseits werden durch Musizieren, beidhändiges Basteln und Malen rechtshemisphärische Teilprozesse geschult. Diese Erkenntnisse beginnen erst in jüngster Zeit sich in Konzepten wie der Suggestopädie (vgl. Edelmann, 1994) niederzuschlagen. Allerdings führen solche Konzepte in der Pädagogik auch zu Konfusionen. Nach meiner Erfahrung wird die Nutzung von rechtshemisphärischen Fähigkeiten in didaktischen Konzepten gerade von naturwissenschaftlichen Kollegen mehr als ein esoterischer als ein wissenschaftlich fundierter Zugang zum Lernenden

angesehen. Demgegenüber macht eine systematische Sichtweise asymmetrischer Hirnfunktion, wie sie das *parallel-serielle Hemisphärenmodell* bietet, den Zugang zu Lernstörungen einfacher, die gerade in jüngster Zeit immer deutlicher den Schulalltag beherrschen.

Eine schwerwiegendere Form solcher Verarbeitungsstörungen in den beiden Hemisphären ist die Legasthenie, die auch auf mangelnde Sequenzierungsfähigkeit zurückgeführt wird. Beschrieben ist eine häufige Vertauschung der Buchstaben (p-q, d-b oder m-w). Dabei ist dem Schreibenden die Verwechslung der Buchstaben auch nach einem Hinweis gar nicht bewusst (vgl. Betz und Breuninger, 1996). Vielmehr wird das äußere Erscheinungsbild des Buchstabens wahrgenommen und die Spiegelung und Drehung einem Symbol zugeordnet. Diese rechtshemisphärische Leistung kann durch die Spiegelung oder Drehung des Bildes von einer Tasse verdeutlicht werden. Egal wie die Tasse abgebildet wird, sie bleibt für den Betrachter eine Tasse. Auch das Erscheinungsbild von einem ‚d‘ oder einem ‚b‘ ist nur gespiegelt (vgl. Abbildung 2.4). Fehlt eine analytische, sequenzielle Verarbeitung an dieser Stelle, fällt eine Differenzierung der Buchstaben schwer. Deshalb neigen Linkshänder wohl auch häufiger als Rechtshänder zu spiegelbildlichen Schreibungen (vgl. Sommer-Stumpfenhorst, 1989). Dieses Phänomen spricht dafür, dass bei Linkshändern die rechtshemisphärische Verarbeitung tendenziell besser ausgeprägt ist. Besondere Aufmerksamkeit verdienen linkshändig veranlagte Kinder, die aus Unkenntnis von Eltern bzw. Pädagogen auf den rechten Handgebrauch zwangsweise umgestellt werden. Es hat sich gezeigt, dass solches auf die lateralisierte Stirnhirnreifung als äußerst problematisch erweist und nicht selten psychotische Probleme initiiert (vgl. Rahimi, 2001). Heute zeichnen sich auf Grund der Erkenntnisse zur endogenen Hirnrhythmik erstmalig physiologische Therapieformen ab, die im Folgenden kurz angesprochen werden sollen.

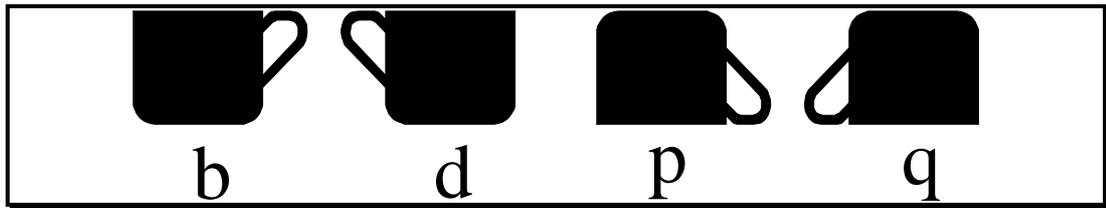


Abbildung 2.4

Graphische Verdeutlichung für das Verwechseln von gespiegelten Buchstaben. Vom Lernenden wird die Orientierung der abgebildeten Buchstaben als unwichtige Information ausgeblendet. Genauso wie auch die Orientierung der Tassen für den Betrachter keinen Informationsgehalt bietet (verändert nach Betz & Breuninger, 1996).

Die Forschungen von Günter Haffelder unterstützen die Theorie, dass Lernstörungen und Lateralisierungsprobleme eng korreliert sind (vgl. Haffelder, 1998). Nach ihm sollen die Ursachen von Lern- und Gedächtnisstörungen speziell auf endogenen Rhythmusstörungen von Hirnstamm eigenen Rhythmen beruhen, die sich auf die interhemisphärische Kommunikation negativ auswirken. Durch seine EGG-Messungsmethode lassen sich Delta-Frequenzen als Signale aus dem Hirnstamm und dem limbischen System auf BETA-Wellen aus kortikolimbischen Feldern erfassen. Sind die beiden Wellenmuster in beiden Hirnhälften asymmetrisch ausgeprägt, so wirkt sich das nach Haffelder auf eine Störung der interhemisphärischen Kommunikation aus, mit negativen Folgen für allgemeine und auch sehr spezifische Lernstörungen (Abbildung 2.5). Nach Haffelder lassen sich oftmals dissonante Rhythmen auf Umwelteinflüsse zurückführen. So fallen in sozialen Brennpunkten, wie zum Beispiel Großstädten weit mehr Kinder mit Lernschwierigkeiten auf, die auf gestörte Hemisphärenaktivitäten zurückzuführen sind, als in anderen Regionen.

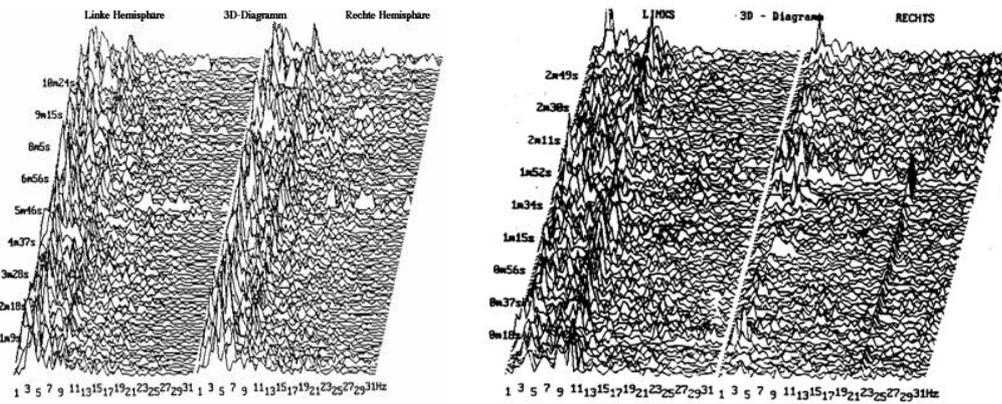


Abbildung 2.5

Darstellung eines symmetrischen (links) und eines asymmetrischen Frequenzmusters (rechts). Die Dissonanzen auf der im rechten Frequenzmuster werden zur Indikation für Lernstörungen genutzt. (aus: Haffelder, 2004)

Auch für Haffelder ist die sequenzielle Verarbeitung eine Schlüsselfunktion der linken Hemisphäre. Aus der Sicht des Rhythmenforschers ist die Schulung komplexer und damit die Kreativität fördernder Funktionen von höchster Bedeutung. So schreibt er auf seiner Homepage: „Durch schulisches Lernen und Studium werden zum größten Teil linkshemisphärische Fähigkeiten trainiert, was mitunter einseitiges Ausrichten auf serielles Erfassen und Abtasten von Wissensinhalten bedeutet.“ (Haffelder, 2004) Und er spricht sich für die systematische individuelle Schulung rechtshemisphärischer Strukturen aus, um eine bessere Interaktion zwischen den Hemisphären auszureizen.

Funktionelle Asymmetrien werden heute auch durch Messungen der Ordnungsschwelle erkennbar (Pöppel, 1997; Warnke, 1995). Eine diesbezügliche Schwäche äußert sich darin, dass die Personen zwei aufeinander folgende Reize nicht bzw. nur schwerfällig differenzieren können. Liegt diese Fähigkeit unter einem bestimmten Zeitrahmen, kann die Sprache, zum Beispiel des Lehrers oder der Eltern, nicht vollständig dekodiert werden, sondern es werden nur Fragmente der sequenziell aufgebauten Sprache aufgenommen (vgl. Pöppel, 1997; Warnke, 1995). Die ‚Lücken‘ füllt das Kind in seinen Handlungen mit eigenen Assoziationen auf (Abbildung 2.6). Hier könnte eine Ursache für das vermehrte

Unterrichtsmaterialien und -methoden die individuellen Verarbeitungsstrategien der Hemisphären unterstützen und die Partizipation der Schüler an der Unterrichtsplanung Stirnhirnfunktionen aktivieren. Demgegenüber erzeugt eine Vermittlung von Lernstoff, die den neurobiologischen Entwicklungsstand vernachlässigt, bei den Lernenden Interferenzen und somit Stress (Vester, 1998). Zu den Folgen dieser Stressinduktion ist in der Arbeitsgruppe Neuroanatomie an der Universität Bielefeld ein Tiermodell etabliert, das die unter 1.6 aufgeführten Prinzipien für die stressinduzierte Stirnhirndysfunktion simuliert.

2.4 Ein Tiermodell zur Simulation von Umwelteinflüssen und Stressfaktoren

Zur Simulation von Umwelteinflüssen und Stressfaktoren werden Mongolische Rennmäuse (*Meriones unguiculatus*) unter zwei verschiedenen Haltungsbedingungen aufgezogen. Die Aufzucht von Käfigtieren erfolgt in Markolonkäfigen des Typs 2 für juvenile Tiere und des Typs 3 mit 825 cm² Bodenfläche für vom Muttertier entwöhnte Tiere. Unter diesen Aufzuchtbedingungen stehen die Tiere unter permanentem Stress, da in den Käfigen natürliche Bewegungs- und Versteckmöglichkeiten fehlen. Dagegen werden Gehegetiere in 1m² großen, quadratischen Gehegen aufgezogen, die viele Bewegungs- und Versteckangebote enthalten, so dass hier von einer seminatürlichen Situation für die Tiere ausgegangen wird. In früheren Studien hat sich an diesem Tiermodell gezeigt, dass schon die Auswirkungen restriktiven Aufzuchtbedingungen ausreichen, um eine geringere Dopamininnervation im rechten PFC heranreifen zu lassen (Kapitel 1.3.3, Neddens et al., 2002 und Winterfeld et al., 1998). Leider wurde in jenen Studien kein Seitenvergleich durchgeführt. Aus anderen Arbeiten weiß man, dass Dopamin im PFC asymmetrisch verteilt reift, die Ausprägung der Asymmetrie ist abhängig von den Stressoren, denen das Tier ausgesetzt wird (rev in Berridge, 2003).

Zusätzlich wurden beiden Aufzuchtgruppen am postnatalen Tag 14 eine einmalige Dosis von Methamphetamin (MA) appliziert. Auch das führt, wie

Studien der Arbeitsgruppe am Gerbils zeigten, zu einer signifikant abgesenkten Reifung der Dopaminfaserdichte im PFC (Dawirs et al., 1993) auf Grund von selektiv toxischen Prozessen, die durch MA ausgelöst wurden. Beide, die restriktive Aufzucht und die einmalige frühe MA-Applikation, simulieren ein traumatisches Ereignis im Kindesalter mit vielen weiteren Beeinträchtigungen der Transmitterreifung im limbo-präfrontalen System von Gerbils (rev. in Teuchert-Noodt, 2000; Lehmann und Teuchert-Noodt, 2004).

Somit konnten diese Parameter in meiner Studie zum Einsatz gebracht werden, um erstmalig nach Lateralisierungseffekten während der Stirnhirnreifung zu fragen. Dabei standen die Transmitter Serotonin und Glutamat im Fokus der Fragestellung.

3 ZIELE DER ARBEIT

Der Aufbau dieser Arbeit gliedert sich in einen experimentellen und einen didaktischen Teil, der die Forschungsergebnisse in konkrete Modelle für den Unterricht umsetzt. Dabei trägt der experimentelle Anteil dieser Arbeit auch entscheidend zum Gelingen der didaktischen Konzeptbildung bei. Die graphischen Darstellungen der callosalen Verbindungen im Tiermodell schaffen beim didaktisch interessierten Leser konkrete, bildliche Assoziationen für die Verschaltung der Kortexhemisphären. Diese bildlichen Vorstellungen soll der Leser auf das *parallel serielle Hemisphärenmodell* übertragen. So wird ein rechtshemisphärisches Verständnis für die interhemisphärischen Interaktionen serieller und paralleler Verschaltungsmuster induziert, welches ansonsten vom Leser ein hohes Abstraktionsvermögen fordern würde. Das *parallel serielle Hemisphärenmodell* bildet dann die Basis für die Lerninhalte und methodischen Überlegungen in den dargestellten Unterrichtseinheiten. So tragen die exemplarischen Einblicke in die Grundlagenforschung der Neurobiologie entscheidend zur Identifikation mit dem entwickelten neurodidaktischen Unterrichtsmodell bei.

3.1 Experimenteller Teil

Im ersten Abschnitt soll experimentell der Frage nach der Lateralisation unter verschiedenen Umwelteinflüssen während der Reifung des PFC am dargestellten Tiermodell nachgegangen werden. Dazu werden die Auswirkungen von isolierter Aufzucht und pharmakologisch induzierter Autotoxizität des reifenden Dopaminsystems im postnatalen Alter (p=14) auf die kontralateralen glutamatergen Verbindungen des PFC mit Hilfe des anterograden Tracers Biocytin untersucht. Zusätzlich wird die lateralisierte Verteilung des Transmitters Serotonin in der PFC-Region FR2 quantifiziert. Dabei stehen folgende Fragestellungen im Vordergrund:

- Inwieweit beeinflussen die beiden nicht-invasiven Interventionen die Reifung der callosalen glutamatergen Verbindungen zur anderen Hemisphäre, speziell im PFC?
- In welchen Entwicklungszeiträumen finden Umstrukturierungen der callosalen Verbindungen statt?
- Wie verändert sich das Verhältnis des Transmitters Serotonin in den durch Biocitin markierten Regionen des kontralateralen PFC?

Zur Analyse der gestellten Fragen wurden die Tiere im erwachsenen Alter untersucht.

3.2 Didaktische Anwendung der Neurobiologie

Ein wesentliches Ziel der Arbeit war es dann, die experimentell erworbenen Erkenntnisse in den Zusammenhang anwendungsbezogener Fragen zur Lateralisierung während der Hirnreifung zu stellen. Dabei wird die Asymmetrie der kognitiven Verarbeitung des Kortex im Vordergrund stehen. Anhand von aktivitätsgesteuerten Reorganisationsprozessen der

interhemisphärischen Verschaltungen soll darauf aufbauend aufgezeigt werden, wie die Neurobiologie durch vereinfachte Modelle das LERNEN im schulischen Bereich unterstützen kann. Dazu werden Beispiele aus Unterrichtsreihen dargestellt, die auf den speziellen Erkenntnissen der neurobiologischen Abteilung der Universität Bielefeld und auf neurobiologischem Grundlagenwissen basieren. Wichtiges Prinzip der vorgestellten Unterrichtseinheiten ist es, dass das Thema ‚LERNEN‘ durch neurobiologische Inhalte gefüllt wird, indem die am Tiermodell gewonnenen Erkenntnisse und das *parallel-serielle Hemisphärenmodell* auch praktisch in den Unterricht einfließen. So erfahren die Schüler die Lerninhalte nicht nur theoretisch, sondern durch das ganzheitliche Erleben im Unterricht (vgl. Kapitel 5).

Folgende Schwerpunkte werden bei der Konzeption des neurodidaktischen Unterrichts verfolgt:

- Durchführung von Planungsphasen zur Förderung von Stirnhirnfunktionen.
- Entwicklung von Arbeitsmaterialien, die Verarbeitungsstrategien beider Hemisphären unterstützen sollen.
- Einsatz von wechselnden Sozialformen (Partnerinterview, Gruppenarbeit etc.), um die Kommunikation unter Schülern und damit auch unter den Subsystemen im Gehirn zu unterstützen.
- Reflexion des Lernfortgangs am *parallel-seriellen Hemisphärenmodell*, an dem Lerntypen und Lernstrategien bewusst gemacht werden sollen.
- Konzeption von Workshops, bei denen auf der Grundlage des *parallel-seriellen Hemisphärenmodells* Lerntipps für andere Schüler entwickelt werden.

4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG ZUR LATERALISIERUNG DES PFC

4.1 Material und Methode

Aufzucht und Behandlung der Versuchstiere

Meriones unguiculatus (Mongolische Rennmaus) ist ein Nagetier und gehört zu der Unterordnung der Hamsterartigen. Die Rennmäuse sind in der östlichen Mongolei, in Nordostchina und in der westlichen Mandschurei beheimatet. Sie zeichnen sich durch ein ausgeprägtes Sozialverhalten aus. Sie bauen in ihrem Territorium weit verzweigte Tunnelsysteme, die sie gegen Eindringlinge vehement verteidigen.

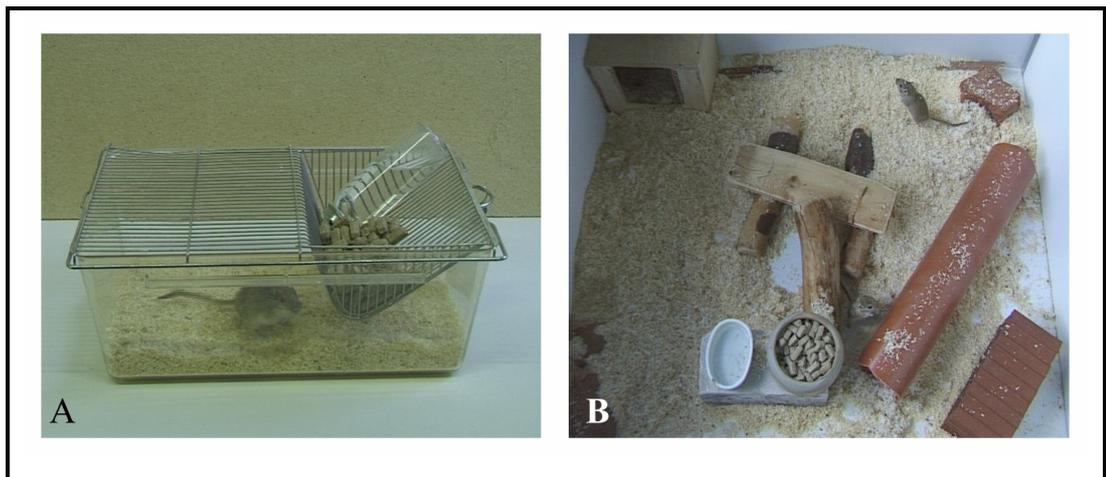


Abbildung 4.1

Haltungsarten bei *Meriones unguiculatus* im Käfig (IR = isolated rearing, Bild A) und im Gehege (ER = enriched rearing, Bild B)

In der Abteilung Neuroanatomie der Universität Bielefeld werden Rennmäuse unter zwei Bedingungen aufgezogen und gehalten. Ein Teil der Versuchstiere wächst unter üblichen Laborbedingungen auf. Sie werden in Makrolonkäfigen von 30 x 40 cm geboren und verbleiben dort im Familienverband bis zur Entwöhnung. Anschließend werden sie in Makrolonkäfigen (20x30 cm) vereinzelt (vgl. Abbildung 4.1, Bild A), wo sie bis zur Untersuchung leben. Im Weiteren werden diese Tiere in Anlehnung an die

Publikationen zu diesem Tiermodell kurz als IR-Tiere (IR = isolated rearing) und die Aufzuchtbedingung als restriktiv bezeichnet. In den Käfigen erhalten die Tiere Wasser und Futter ad libitum. Weitere Ausstattungsmerkmale, wie zum Beispiel Laufräder zur Bewegung der Tiere fehlen in den Käfigen. Die anderen Gruppen von Versuchstieren wachsen in Gehegen von 1 m² Größe auf. Sie sind mit vielfältigen Versteck- und Wühlmöglichkeiten ausgestattet. Ab dem 30. Lebensstag werden die männlichen Tiere zu Gruppen von drei bis vier Individuen zusammengefasst und bis zum adulten Alter von 90 Tagen in Gehegen gehalten. Diese Tiere werden im Folgenden als ER-Tiere (ER= enriched rearing) bezeichnet.

Außerdem werden in beiden Tiergruppen verschiedenen Tieren am 14. postnatalen Tag eine einmalige Injektion von 50 mg/kg Methamphetamin (=MA) intraperitoneal verabreicht. Anschließend wuchsen die Tiere unter IR- bzw. ER-Bedingungen auf. Die zwei unterschiedlichen Aufzuchtbedingungen ergaben somit die IR-Tiere und ER-Tiere. Kombiniert mit der MA-Behandlung ergeben sich zwei weitere Versuchstiergruppen: IR-MA-Tiere und ER-MA-Tiere. Aus diesen vier Gruppen habe ich für meine Biocytinstudien 90 Tiere und für die Serotoninstudie 75 Tiere erhalten. Aus jeder Gruppe standen mir als ca. 10 (\pm 2) Tiere zur Verfügung. Während die ER-Gruppe als reine Kontrollgruppe gewertet werden konnten, waren die anderen drei Gruppen Teil des so genannten Stressmodells. Die präparative Aufarbeitung der Tiere wurde mit Laborunterstützung durch mehrere Mitarbeiter gestaltet. Selbständig hergestellt habe ich die quantitative Bildanalyse der Serotoninstudie und betreut habe ich die quantitative Bildanalyse der Biocytinstudie, die Frau Schroeder durchgeführt hat. Zur qualitativen Bewertung der Versuchsreihen aus den Biocytinstudien habe ich das POLYVAR im Dunkelfeld benutzt.

4.1.1 Tracerstudie der callosalen Verbindungen

Zur Darstellung der callosalen Verbindungen wurde für meine Untersuchung der anterograde Tracer Biocytin gewählt. Zwei Zielvorstellungen wurden verfolgt. Zuerst sollten die grundsätzlichen Verbindungen des Kortex über

das Corpus Callosum rekonstruiert werden. Darauf aufbauend sollten die Veränderungen der kontralateralen Verbindungen am Stressmodell vergleichend erarbeitet werden. Dazu wurden die kontralateralen Verbindungen bei den oben dargestellten vier Tiergruppen zeichnerisch rekonstruiert.

Aufbereitung des Gehirnmaterials

Biocytin ist eine Substanz, die von Nervenzellen aufgenommen und in die Richtung der Reizweiterleitung –anterograd- im Axon transportiert wird. Da Biocytin von Gliazellen nicht aufgenommen wird, ist der anterograde Tracer auch zur Studie von weitläufigen callosalen Verbindungen gut geeignet.

Zur Injektion des Biocytins in den rechten medialen PFC wurde das Tier kurz narkotisiert, ein Loch in die Schädeldecke gebohrt und 30µl Biocytin verabreicht. Zum natürlichen Transport des Tracers in den Neuronen überlebten die Tiere 24 Stunden. Danach wurden die Tiere mit Ether eingeschlafert, mit Phosphatpuffer (pH 7,2) vorgespült und mit phosphatgepufferter 4%-iger Paraformaldehydlösung perfundiert. Das Gehirn wurde dem Schädel entnommen und eine Woche in 4%-iger Paraformaldehydlösung nachfixiert. Die Gehirne wurden in ihre beiden Hemisphären unterteilt. Im Folgenden heißt die rechte Hemisphäre, in die der Tracer injiziert wurde, ‚ipsilateral‘ und die linke Hemisphäre ‚kontralateral‘. Es wurden aus dem Gehirnmaterial 60µm dicke Frontalschnitte angefertigt. Durch die 20-min. Behandlung der Schnitte mit Natriumborhydrid werden freie Peroxidasen abgebunden. In einer Inkubationszeit von 20 Stunden bindet sich der Avidinanteil des ExtrAvidin das Biocytin. Die an ExtrAvidin gebundene Peroxidase zersetzt das H₂O₂ und der freigestetzte Sauerstoff setzt das DAB zu einem festen Farbkomplex um. Nach der Trocknung und Entwässerung der Schnitte wurden die Schnitte aufgezogen und mit Depex eingedeckelt (vgl. King et al., 1989).

Zur Bestimmung der Injektionsposition wurde die ipsilaterale Seite unter dem Mikroskop (Polyvar, Reichert-Jung, Wien) bei 40-facher Vergrößerung untersucht. Durch den deutlichen Riss, der durch die Injektionsnadel hervorgerufen wird, ist die Injektion einwandfrei zu detektieren. Die angefärbten Zellsomata zeigen an, wie tief der Tracer in die Kortexschichten eingedrungen ist,

so dass im weiteren Verlauf Lamina III von Lamina V Injektionen unterschieden werden können. Abbildung 4.2 und Abbildung 4.3 zeigt die Positionen der einzelnen Injektionen bei den verschiedenen Tiergruppen und die Einordnung der Injektionstiefe.

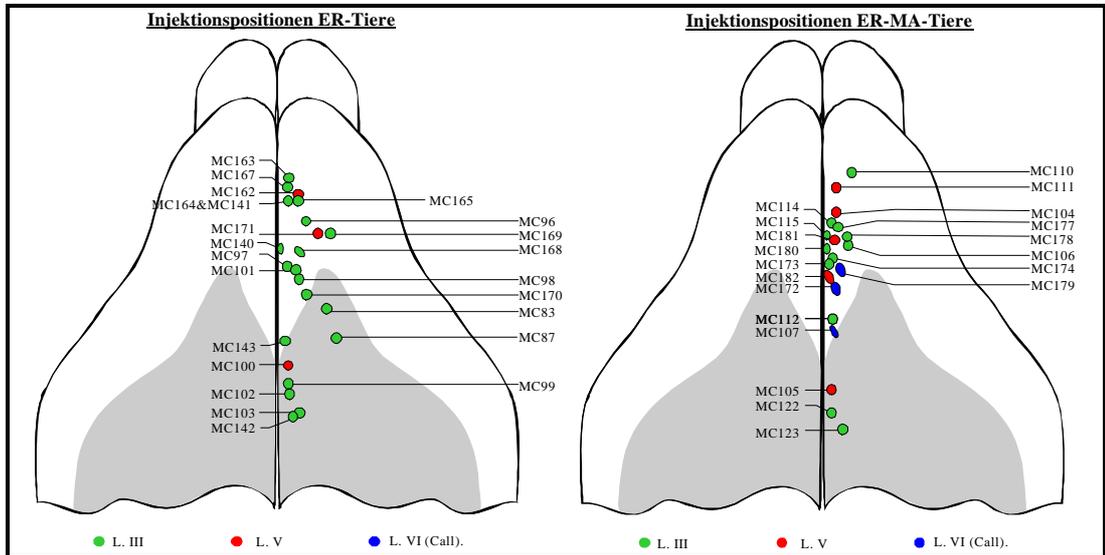


Abbildung 4.2

Injektionspositionen und -tiefe bei den ER-Tieren

grün: flache Injektionen mit vornehmlich Lamina III-Projektionsneuronen

rot: tiefe Injektionen mit vornehmlich Lamina V-Projektionsneuronen

blau: Injektionen in das Callosum

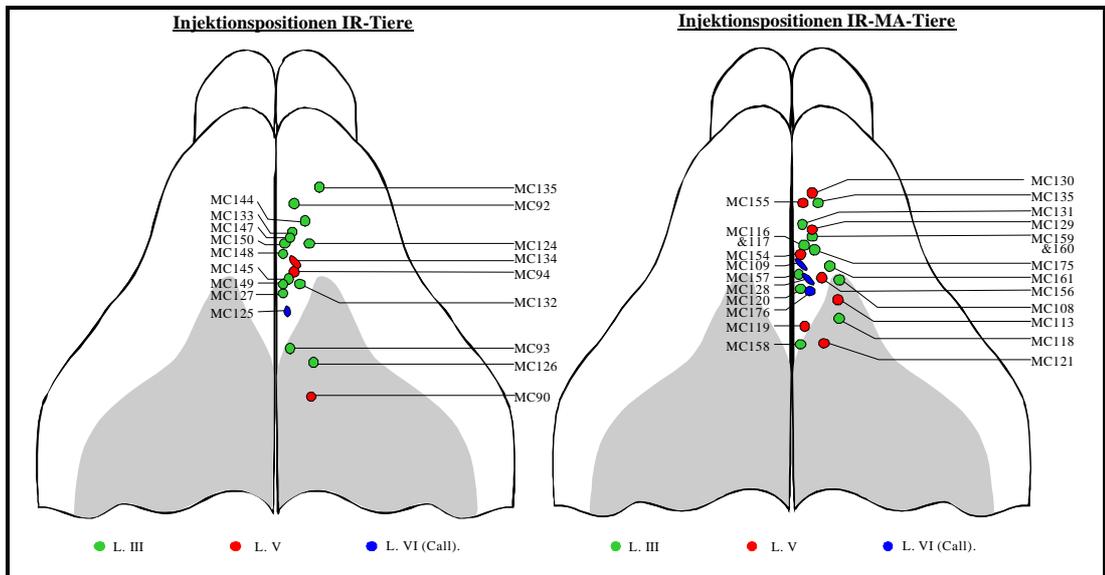


Abbildung 4.3

Injektionspositionen und -tiefe bei den IR-Tieren:

grün: flache Injektionen mit vornehmlich Lamina III-Projektionsneuronen

rot: tiefe Injektionen mit vornehmlich Lamina V-Projektionsneuronen

blau: Injektionen in das Callosum

Lichtmikroskopische Untersuchung der Verbindung im kontralateralen Kortex.

Die durch Biocytin markierten callosalen Verbindungen wurden kontralateral mit dem Lichtmikroskop (Polyvar, Reichert-Jung, Wien) ausgewertet. Ausgehend von der Durchbruchstelle des Callosums konnte der allgemeine Verlauf der Axone durch das Corpus Callosum bis in die Lamina I des Kortex verfolgt werden. Durch tiefe Injektionen (Tier MC 107, MC 109) wurde direkt das Faserbündel des Balkens getroffen. Durch diese Injektionsmethode ist eine große Zahl von Verbindungen in die kontralaterale Hemisphäre markiert worden. So ist eine gute Darstellung der gesamten Projektionen möglich.

Im zweiten Schritt werden die Unterschiede zwischen den vier Tiergruppen mit den verschiedenen Haltungsbedingungen (IR-Tiere / ER-Tiere) und pharmakologischen Behandlungen (IR-Tiere / IR-MA-Tiere) qualitativ ausgewertet. Dazu ist ein Raster mit acht Schnittebenen als Corel-Craw-Vorlage erstellt worden. In dieser Vorlage wurden die lichtmikroskopischen Ergebnisse dokumentiert. Durch die selektive Projektion der Pyramidenzellen in die kontralaterale Hemisphäre ist mit dieser Methode eine genügend differenzierte Auswertung der verschiedenen Fälle möglich.

Durch die Anordnung der einzelnen Schnittebenen in Übersichtsgraphiken soll dem Betrachter das räumliche Verständnis des Faserverlaufes ermöglicht werden. Dabei werden in den Schnittebenen die Fasern mit schwarzen Strichen und die Terminationsfelder mit grau schraffierten Flächen dargestellt, die durch verschiedene Graustufen die Stärke der Terminationen anzeigen (starke Termination = dunkle Färbung, s. z.B. Abbildung 4.12).

Quantitative Auswertung der Biocytinfaserdichte

Für die Biocytinstudie kontralateraler Verbindungen wurde ein Auswertungsschema entwickelt, das die relative Faserdichtedichte in relevanten Gebieten ermittelt, die mit Hilfe der lichtmikroskopischen Studie definiert wurden (vgl. Abbildung 4.4). Die Bildausschnitte wurden in der Tabelle 4.1 dargestellten Laminae zugeordnet.

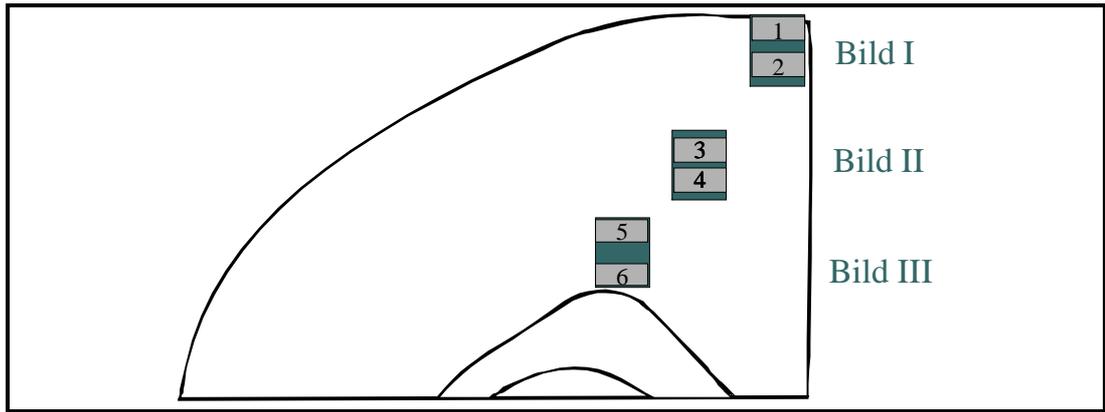


Abbildung 4.4

Position der Bildausschnitte (I-III) und der Auswertungsrahmen (1-6) für die Quantifizierung der Biocytinfaserdichte. Die Auswertungsrahmen wurden anhand von histologischen Strukturen den in Tabelle 4.1 angegebenen Laminae zugeordnet

Auswertungsrahmen	1	2	3	4	5	6
Lamina	I/II	III	V a	V b	VI a	VI b

Tabelle 4.1

Zuordnung der Auswertungsfenster des Auswertungsschema in Abbildung 4.4 zu den Laminae im linken medialen PFC.

Es wurden im FR2-Gebiet pro Schnittebene drei Aufnahmen mit einer Auflösung von 2048 x 1450 und 200-fachen Vergrößerung hergestellt. Die Positionen der Auswertungsrahmen orientieren sich an der lichtmikroskopischen Auswertung der Faserverläufe (vgl. Kapitel 4.2.2 und 4.2.3). Die Daten der Fasererkennung wurden mit dem Programm KS 300 von Carl Zeiss Jena bearbeitet und mit der Varianzanalyse ANOVA nach den Faktoren Handlungsbedingungen und MA-Applikation ausgewertet (vgl. Witte et al., 2006).

4.1.2 Quantitative Auswertung der Serotoninfaserdichte im Gebiet FR2

Aufbereitung des Gehirnmaterials

Die Perfusion wurde ausschließlich von J. Neddens durchgeführt, um methodische Fehler durch abweichende Behandlungsmethoden zu vermeiden. Die Versuchstiere wurden mit Hilfe von 1,7 g/kg Chloralhydratlösung eingeschläfert, mit 0,1 mol Phosphatpuffer (pH-Wert: 7,2) vorgespült und mit Phosphat gepufferter 4%-iger Paraformaldehydlösung perfundiert. Das Gehirn wurde dem Schädel entnommen und 90 Minuten nachfixiert. Danach wurden die Gehirne in ihre beiden Hemisphären unterteilt und der olfaktorische Bulb wurde entfernt. Mit dem Gefriermikrotom (Frigocut 2700, Reichert-Jung, Wien) wurden 20 µm dicke Frontalschnitte des PFC angefertigt, von denen jeder dritte weiter aufgearbeitet wurde. Die Gehirnschnitte wurden dreimalig in 0,1 mol Phosphatpuffer (pH-Wert: 7,2) gewaschen und bei 4°C mit 1% H₂O₂-Lösung behandelt. Es folgte eine 30-minütige Präinkubation bei Raumtemperatur in NGS (normal goat serum, Sigma) mit einer Verdünnung 1:10 in Waschpuffer mit 0,3% Triton X100 (Sigma). Anschließend wurden die Schnitte in das erste Antiserum (polyclonal rabbit-antiserotonin, DiaSorin, Stillwater, USA) überführt und 18 Stunden bei 4°C inkubiert. Der Antikörper bindet sich an das Formaldehyd-konjugierte 5-HT, das während der Perfusion im Gewebe entsteht. In der zweiten Inkubation (30 min bei 20° C) bindet ein biotinmarkierter sekundärer Antikörper (goat-antirabbit, Sigma) an den Komplex. Es folgt eine Inkubation in Avidin-Peroxidase (Sigma). In der folgenden DAB-Färbung setzen die Peroxidasen Sauerstoff aus einer H₂O₂-Lösung frei und oxidieren das von Diaminobenzidin (DAB, Sigma) zu braunschwarzen Farbstoffkomplexen. Dazu wird eine 0,05 % Diaminobenzidin-Lösung in TBS (0,05 mol Trispuffer, 0,9% NaCl, pH 7,6) mit 0,01 H₂O₂ angesetzt. Die mit den Antikörperkomplexen markierten Zellen und deren Neuropil werden so angefärbt. Diese Färbemethode wurde von Neddens weiterentwickelt und in der neuroanatomischen Abteilung der Universität Bielefeld etabliert (vgl. Neddens, 2002).

Auswertung des Materials

Für die Serotoninstudie wurde ein Auswertungsraaster entwickelt, das es ermöglicht, in der in der anderen Studie mit Biocytin markierten FR2-Region die Dichte der Serotoninfasern in beiden Hemisphären quantitativ auszuwerten. Dazu wurden im FR2-Gebiet pro Schnittebene drei Aufnahmen (Bildgröße 1450 x 2000 Pixel; 120 ms Verschlusszeit) bei 250-facher Vergrößerung am Mikroskop (Polyvar, Reichert-Jung, Wien) hergestellt und an einen Rechner übertragen. Die Abfolge der Bilder folgte der typischen medialen Kolumne, die aus der Biocytinstudie bekannt ist. Es wurden drei Schnittebenen ausgewertet (vgl. Abbildung 4.5). In die Bilder wurden Auswertungsrahmen mit der Größe 400 x 1200 Pixel gelegt (=Messfläche), in denen ein Fasererkennungsprogramm zusammenhängende Faserzüge detektierte. Das Makro dafür wurde von J. Neddens entwickelt (vgl. Neddens, 2002).

Der prozentuale Flächenanteil der detektierten Fasern an der definierten Fläche des vorgegebenen Auswertungsrahmens wurde nach folgender Formel ermittelt:

$$\text{Flächenanteil [\%]} = \frac{\text{Faserfläche}}{\text{Messfläche}} \cdot 100$$

Alle drei angegebenen Werte wurden in eine Excel-Datei übertragen. Eine statistische Auswertung der Werte erfolgte mit dem F- und t-Test.

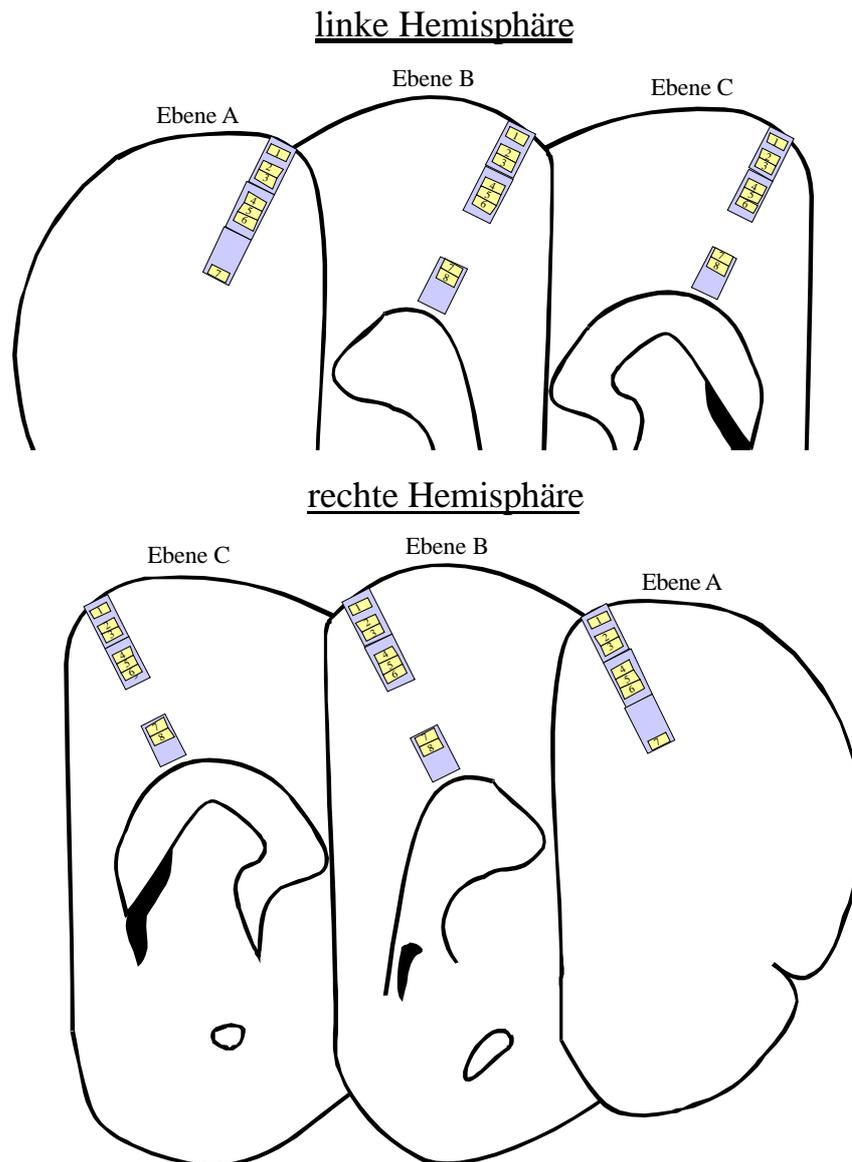


Abbildung 4.5

Quantifizierung für Serotonin:

Positionen der Bildausschnitte (blau) und der Auswertungsrahmen (gelb) im FR2-Gebiet des PFC auf den drei ausgewerteten Schnittebenen.

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Biocytin Tracerstudie

Allgemeiner Verlauf der callosalen Verbindungen

Die Faserverläufe und Terminationsfelder von den biocytinmarkierten Pyramidenzellen zeigen eine homotope Organisation im frontalen kontralateralen Kortex (FR2). Schon frühere Studien in unserer Arbeitsgruppe (Bagorda et al., 2006) zeigten solche Faserzüge auch zum ipsilateralen im frontalen (FC), parietalen (PC) und insulären (IC) Kortex. Während allerdings im ipsilateralen PC kurze direkte Verbindungen zwischen den entsprechenden Hirnarealen der beiden Hemisphären dokumentiert wurden (vgl. Hedin-Pereira et al., 1999), ziehen die Verbindungen zwischen den äquivalenten Rindengebieten des PFC zuerst von der rechtshemisphärischen Injektion in caudale Richtung, um dann in das Callosum einzutreten. Auf der linken Hemisphäre wenden sich die Axone dann wieder nach rostral und terminieren homotop etwa auf der Höhe der Injektionsposition (s. Abbildung 4.21).

Tiefe Injektionen zeigen den grundsätzlichen Faserverlauf im PFC sehr gut. Da diese Injektionen dem Faserbündel vor dem Eintritt in das Callosum nahe kommen, färben sich mehr Fasern zur kontralateralen Hemisphäre, als wenn die Injektion die Pyramidenzellen der Lamina III und oberen V trifft. Die von der ipsilateralen Hemisphäre (Ort der Injektion) stammenden Fasern ziehen in das Knie des Corpus Callosums. Von dort steigen sie zu der Lamina I/II auf. Deutlich sind in der Abbildung 4.8 die grau gekennzeichneten Terminationsfelder über den aufsteigenden Fasern zu beobachten, die auch in die vorderen FR2-Regionen des PFC reichen. Bei dieser tiefen Injektionsart zeigen sich auch deutlich lateral verlaufende Fasern in der Region des agranulären insulären Kortex (AI), die sich bei den flachen Injektionen, nicht so deutlich abzeichnen. Diese Fasern ziehen durch den lateralen Teil des Callosums und terminieren in dem Gebiet des kontralateralen IC auf Höhe des PFC (Schnittebene [a] und [b], Abbildung 4.8).

Durch die verschiedenen Injektionspositionen (vgl. Abbildung 4.2 und Abbildung 4.3) konnte auch die Organisation der Fasern im Corpus Callosum systematisch analysiert werden. Die caudal-rostrale Achse, auf der die Injektionspositionen liegen, bestimmt den Übergangsort der Fasern im Balken. Beim Fall MC 107 liegt die Injektionsposition in das Callosum weiter caudal als bei Fall MC 109. Dementsprechend kreuzen auch die Fasern im Callosum beim Tier MC 107 weiter caudal als beim Tier MC 109 (vgl. Abbildung 4.6).

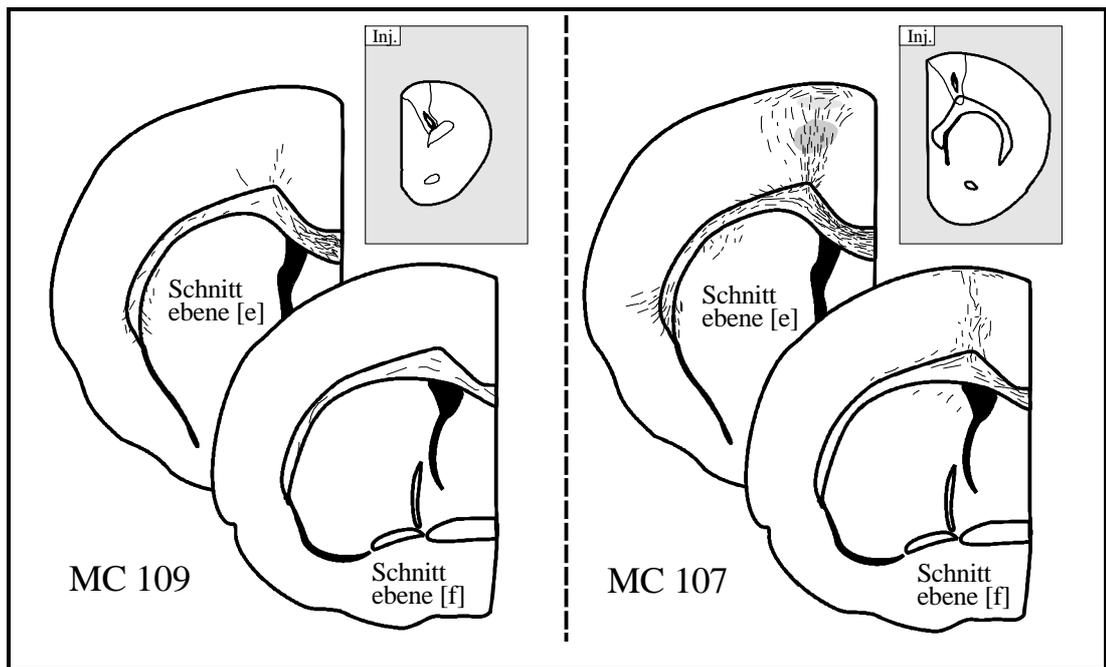


Abbildung 4.6

Vergleich callosaler Fasern auf verschiedenen Ebenen: Tier MC 109 (Injektion in das vordere Callosum) und MC 107 (Injektion in das mittlere Callosum). Bei Tier MC 107 kreuzen die Fasern weiter caudal und steigen schon in der Schnittebene [f] auf.

Bei Tier MC 107 verlagert sich das gesamte Projektionsspektrum der kontralateralen Fasern nach caudal. So treten auch Terminationsgebiete in den Schnittebenen [d] und [e] im Gebiet des frontalen Kortex (FR 1) auf (vgl. Abbildung 4.8). Beim Tier MC 109 finden sich auf dieser hinteren Schnittebene jedoch keine Terminationsgebiete und nur vereinzelte Fasern steigen dort auf (vgl. Abbildung 4.7). Stattdessen liegen Terminationenfelder weiter rostral im agranulären insulären (AI) Kortex (Schnittebenen [a] und [b]). Zusätzlich projizieren Fasern auch zum dorsalen Striatum der linken Gehirnhälfte.

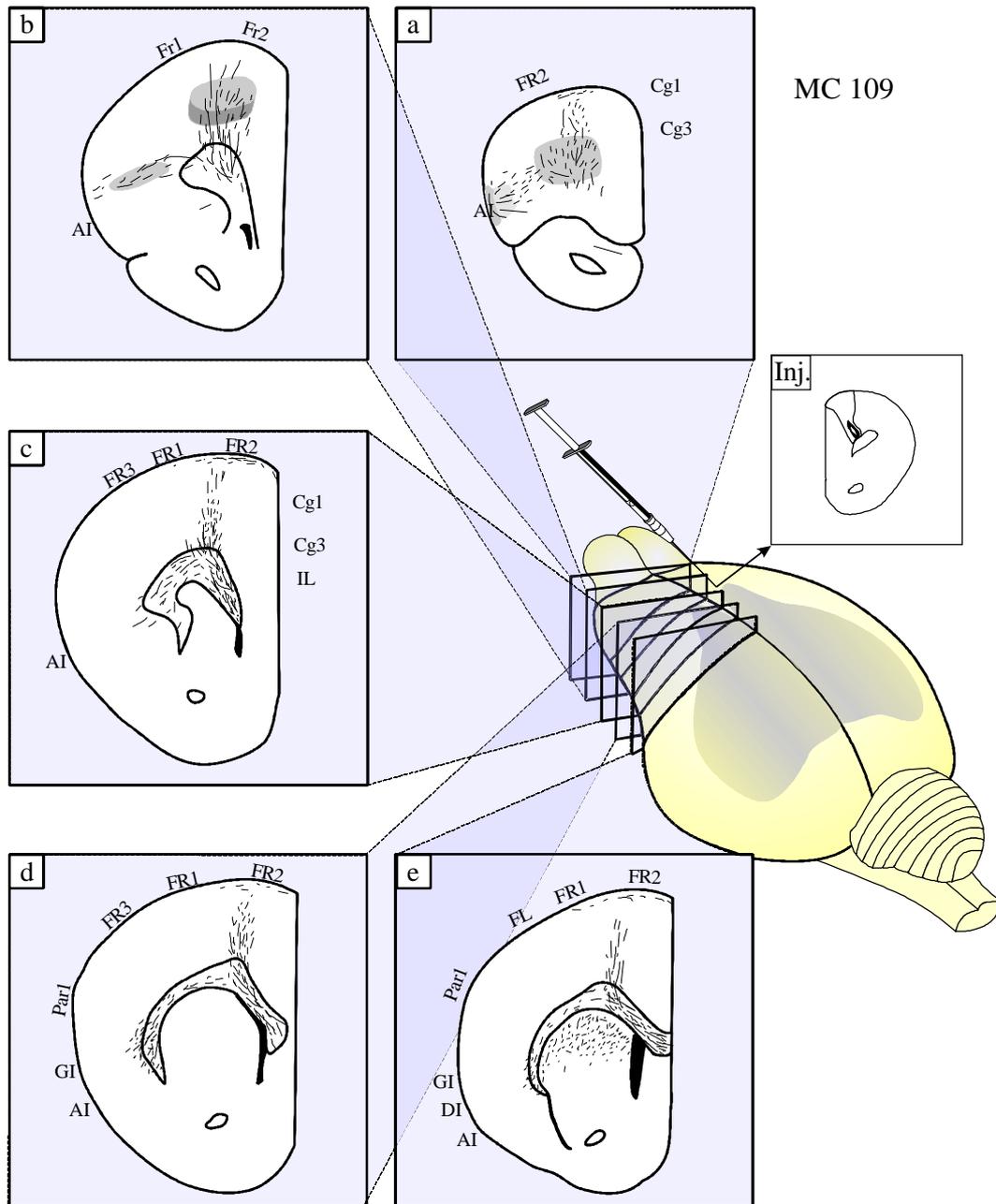


Abbildung 4.7

Übersicht der kontralateralen Faserverläufe nach tiefer Injektion in Höhe des vorderen Corpus Callosum (Fall MC 109). Das Spektrum Terminationsfelder (grau schraffierte Flächen) ist im Vergleich zum Tier MC 107 viel weiter rostral angelegt. Die aufsteigenden Fasern im präfrontalen Kortex befinden sich verstärkt auf den Schnittebenen [b] und [c]. Die Terminalien liegen in den Lamina IV bis V im frontalen Kortex (FR2) und im agranulären insulären Kortex (AI) (s. Schnittebenen [a] und [b]).

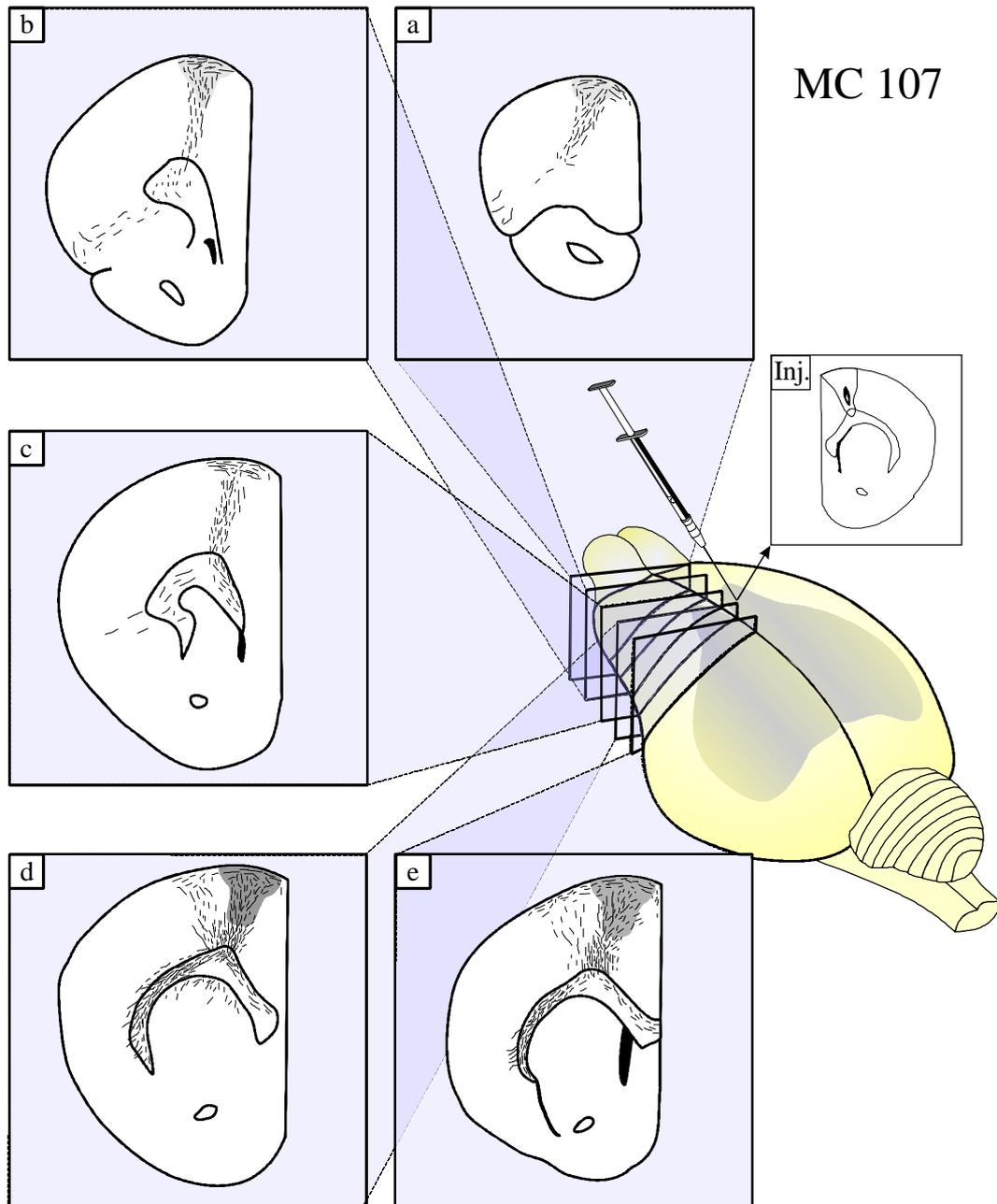


Abbildung 4.8

Übersicht der kontralateralen Faserverläufe nach tiefer Injektion in Höhe des mittleren Corpus Callosum (Fall MC 107). Das Spektrum der Terminationsfelder (grau schraffierte Flächen) ist im Vergleich zum Tier MC 109 viel weiter caudal angelegt. Die aufsteigenden Fasern und Terminalien im frontalen Kortex (FR1 und FR2) befinden sich auf den Schnittebenen [d] und [e].

4.2.2 Darstellung der Faserverläufe bei Gehegetieren

Die ER-Tiere zeigen bei gleicher Innervation der kontralateralen Hemisphäre eine deutlich stärkere Faserdichte als die IR-Tiere. Außerdem sind die Fasern und Terminationsgebiete über mehrere Schnittebenen -also über ein deutlich ausgedehnteres Areal (vgl. Abbildung 4.9)- verteilt. Der in Kapitel 0 grundsätzlich beschriebene Faserverlauf ist gegeben. Allerdings lässt sich bei ER-Fällen mit starker Projektion durch das Corpus Callosum eine zweite Kolumne differenzieren, die sich lateral zu der bereits dokumentierten Kolumne im frontalen Kortex (FR2) ausbreitet. Das Tier MC 96 stellt einen sehr ausgeprägten Gehegefall dar: Es kreuzen vergleichbar viele Axone das Corpus Callosum, wie in den IR-Fällen MC 129 (IR-MA) und MC 150 (IR) (vgl. Abbildung 4.12 und Abbildung 4.15). Bei diesen drei Tieren sind somit die Injektionsposition und die Innervation durch die ipsilaterale Gehirnhälfte vergleichbar, so dass sich an ihnen die Phänomene der stärker ausgebreiteten Terminationen gut dokumentieren lassen. Die Terminationsgebiete erstrecken sich in den oberen Laminaschichten im frontalen Kortex (FR2) von der medialen Kante bis zur Grenze des Gebietes FR1-Region. Auf der rostral-caudalen Achse dehnen sich die Terminalien über die Schnittebenen [a] bis [e] aus. Aus dem Knie des Callosums steigen beim Fall MC 96 Fasern in zwei Kolumnen auf, die zur medialen Kante und zur Grenze von FR1 zu FR2 ziehen. Im orbitalen PFC zieht bei Fall MC 96 sogar ein Faserbündel zum AI, Terminationen zeichnen sich aber nur schwach ab.

Tiere mit einer geringen Markierung der kontralateralen Hemisphäre zeigen insgesamt deutlich weniger gefärbte Biocytinfasern. Beim Tier MC 101 (Gehege, Abbildung 4.10) finden sich vom Knie des Callosums aufsteigende Fasern im frontalen Kortex (FR2) wieder. Im Vergleich bleiben bei IR-Tieren mit vergleichbarer Injektion diese aufsteigenden Axone quasi im Corpus Callosum „stecken“ und geben keine kolumnäre Termination zu erkennen (vgl. Tier MC 136, Abbildung 4.11).

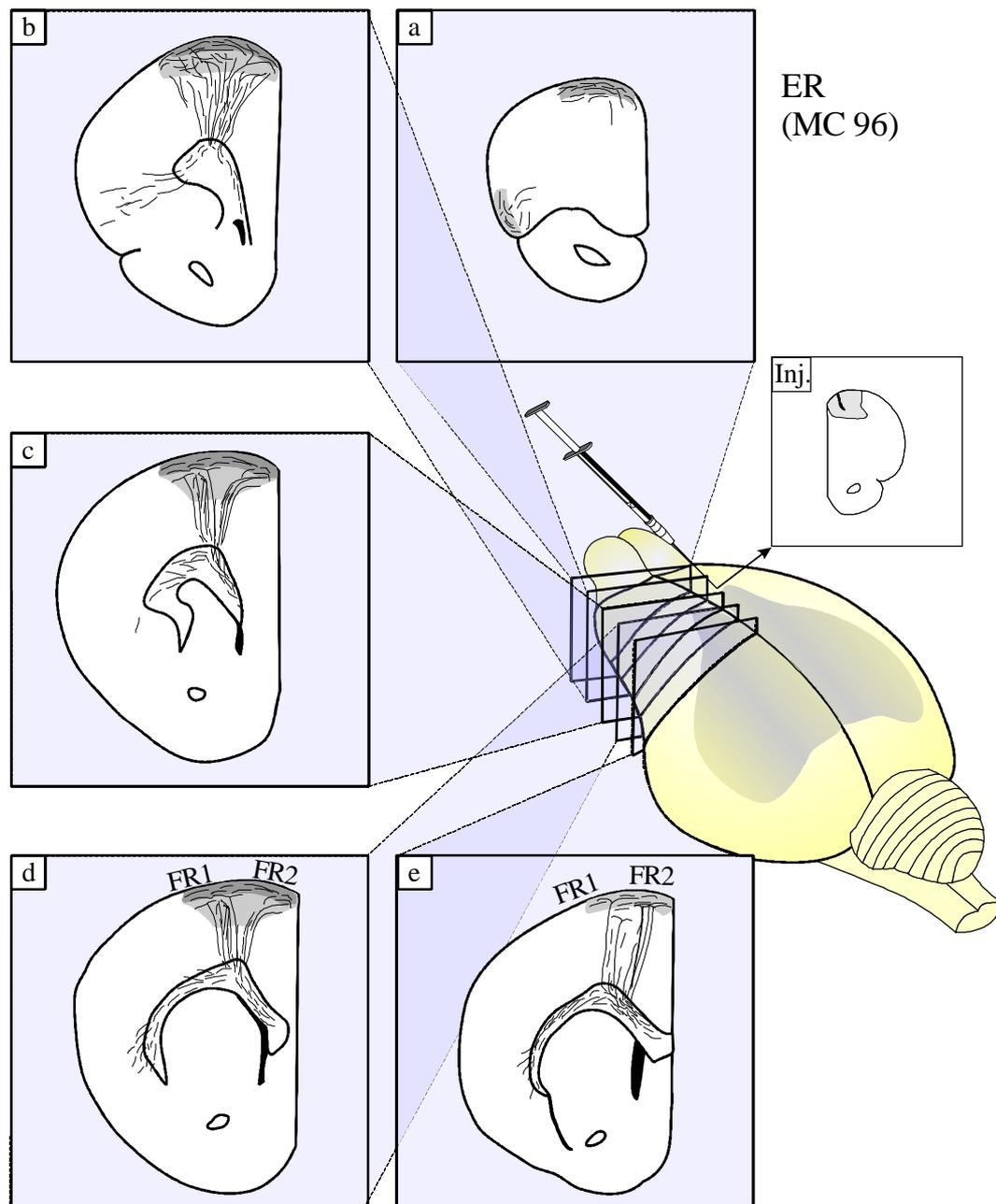


Abbildung 4.9

Übersicht der kontralateralen Faserverläufe bei einem ER-Tier (Fall MC 96). Die Fasern steigen vom Knie des Callosums in die Lamina I/II auf. Dort bilden sie deutlich mehr Terminationen aus als in vergleichbaren IR-Tieren (grau schraffierte Flächen).

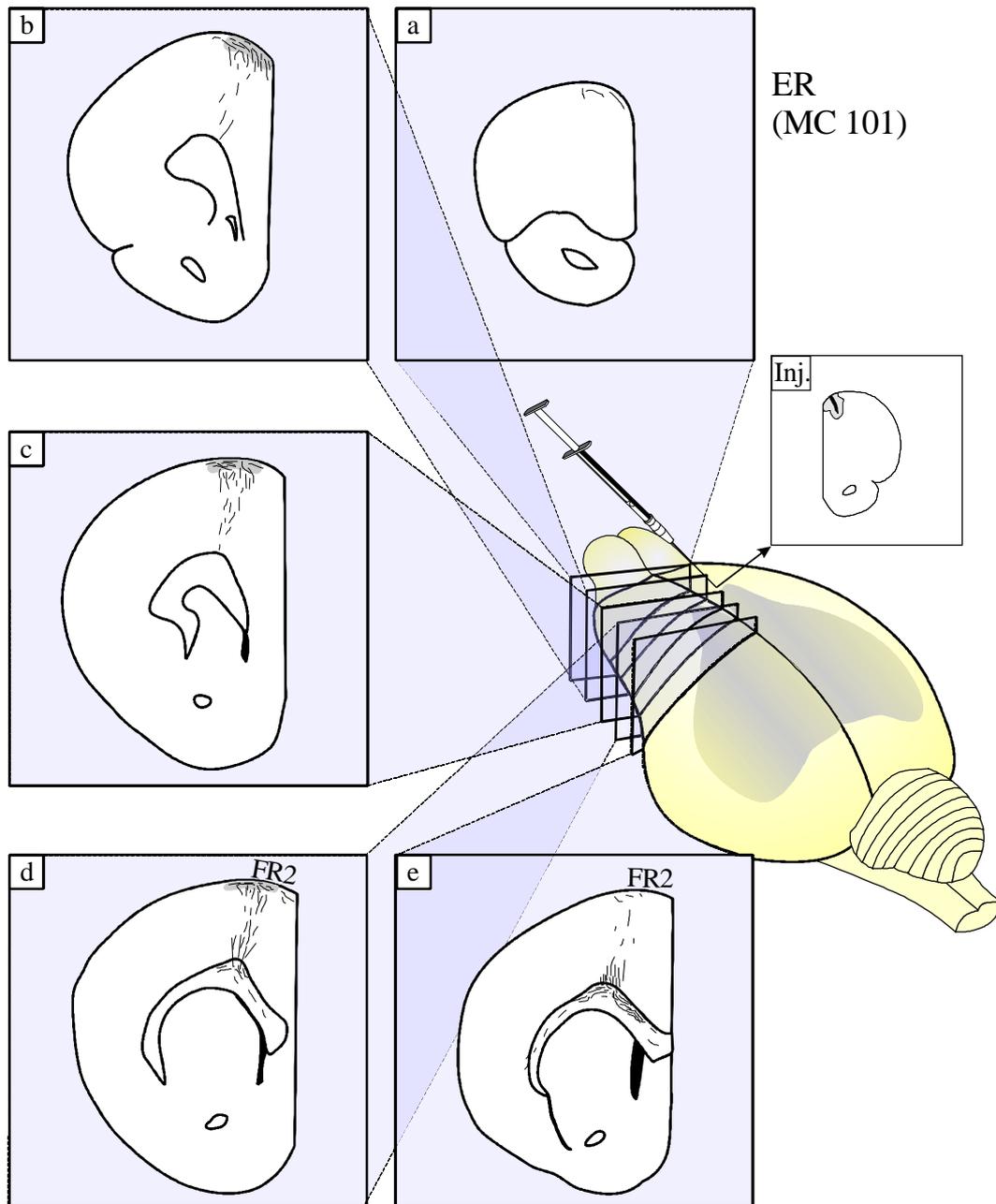


Abbildung 4.10

Übersicht der kontralateralen Faserverläufe bei einem ER-Tier mit einer relativ geringen Projektion durch das Corpus Callosum (Fall MC 101). Die Fasern steigen vereinzelt vom Knie des Corpus Callosums in die Lamina I/II im frontalen Kortex (FR2) auf (Schnittebene [b], [c], [d] und [e]). Dort bilden sie kleine Terminationsgebiete in der Lamina I/II aus (grau schraffierte Flächen).

4.2.3 Darstellung der Faserverläufe bei IR-Tieren und IR-MA-Tieren

Im Folgenden soll der Faserverlauf bei den IR-Tieren mit und ohne pharmakologischer Behandlung dargestellt werden. Der Faserverlauf wird an einem Tier exemplarisch beschrieben. Ähnliche Fälle werden diesem Fall zugeordnet.

Abbildung 4.12 zeigt den Faserverlauf und die Ausbreitung der Terminalien eines IR-Tieres auf der kontralateralen Gehirnhälfte. Auf der Schnittebene [e] treten viele Fasern von ipsilateral in das Corpus Callosum ein (vgl. Abbildung 4.13, Foto A). Diese Fasern steigen kontralateral in der Schnittebene [b] über die Lamina VI auf und erreichen breitflächig die Lamina I/II von FR2 (vgl. Abbildung 4.14, Foto C und Abbildung 4.13, Foto B). Beim Tier MC 136 treten nur wenige Fasern in das Corpus Callosum. Bei solchen IR-Tieren steigen keine oder nur sehr vereinzelt Faser in höhere Laminaschichten auf (s. Abbildung 4.11).

Das IR-MA-Tier MC 129 zeigt eine ähnliche Dichte und Anordnung der Fasern in der kontralateralen Hemisphäre via Corpus Callosum (vgl. Abbildung 4.13 und Abbildung 4.16 jeweils Foto A). Allerdings treten kaum Fasern in die Lamina V des frontalen Kortex (FR2) ein und Terminalien fehlen nahezu in Lamina I/II. Stattdessen dokumentiert dieser Fall ein Phänomen, das sich bei allen MA-Fällen in ähnlicher Weise beobachten lässt: Die relativ dicken Fasern aus dem Knie des Callosum enden in der Lamina VI oder V. Eine distale Verdünnung dieser Fasern und Terminationen in den oberen Laminaschichten bleibt weitestgehend aus (vgl. Abbildung 4.16 Foto B und Abbildung 4.17).

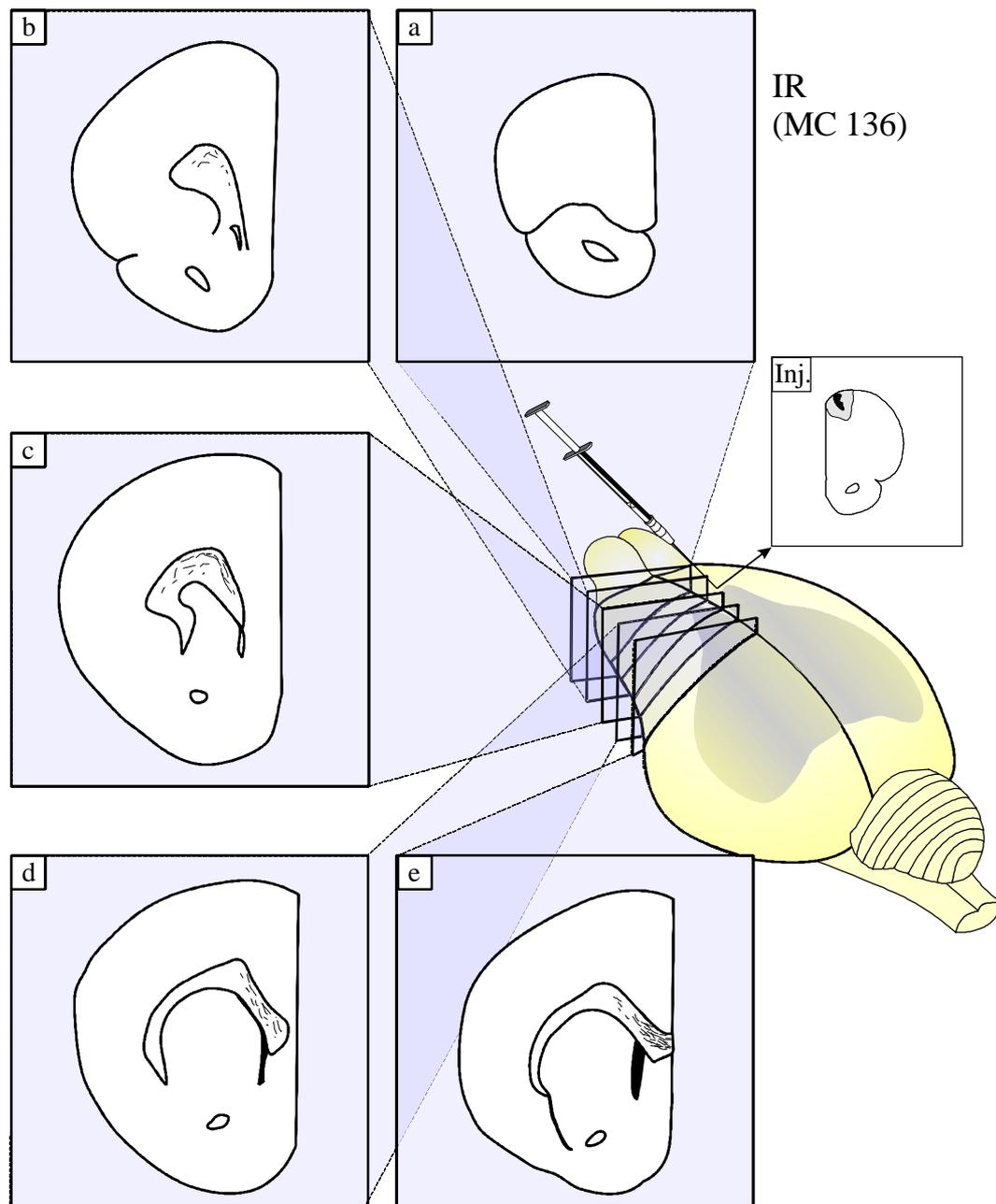


Abbildung 4.11

Übersicht der kontralateralen Faserverläufe bei einem IR-Tier mit einer geringen Markierung des Corpus Callosum (Fall MC 136). Es steigen keine Fasern vom Knie des Callosums in die Lamina I/II auf. Terminationsgebiete sind nicht detektierbar.

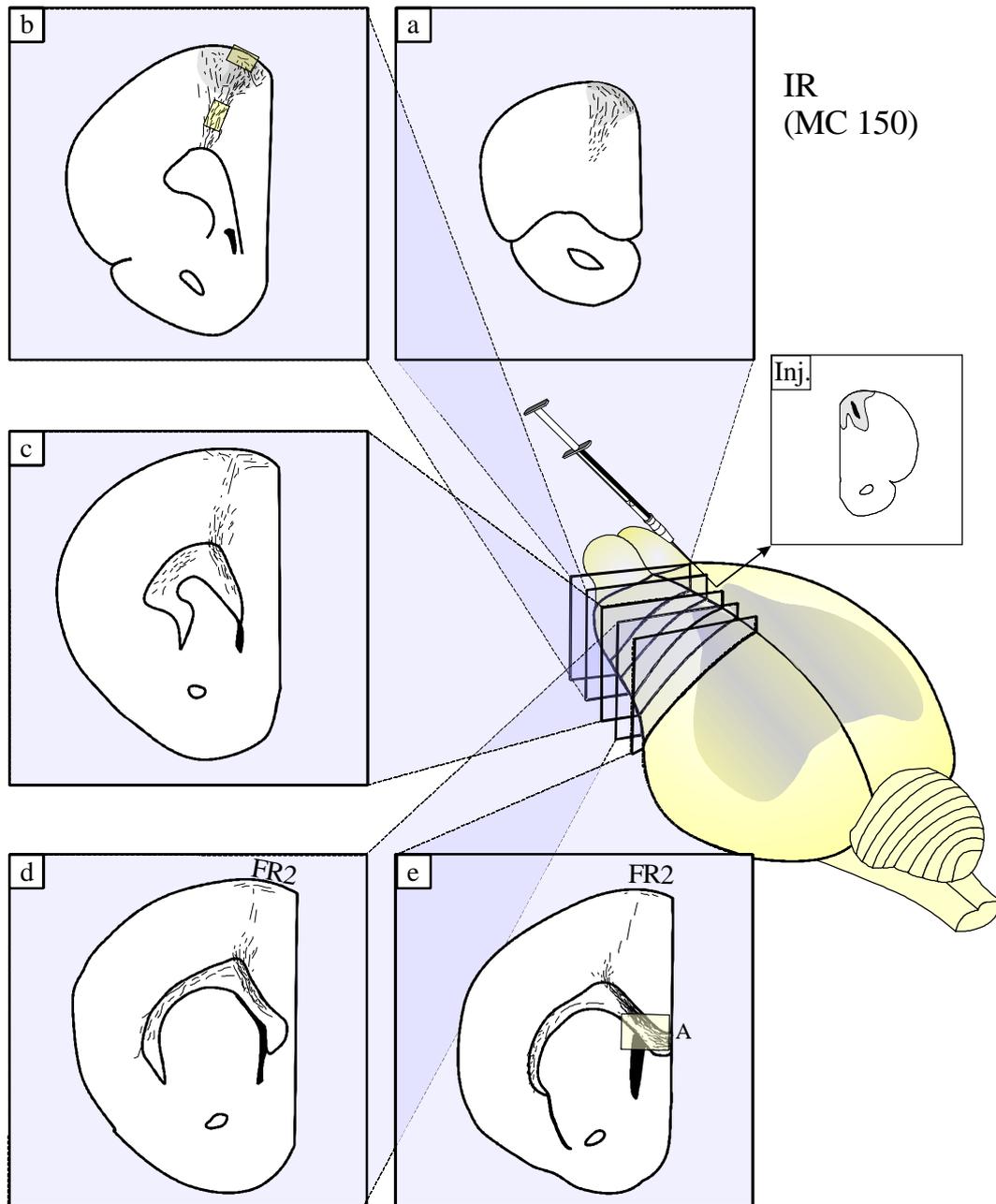


Abbildung 4.12

Übersicht der kontralateralen Faserverläufe bei einem IR-Tier (Fall MC 150). Die Fasern steigen vom Knie des Callosums in die Lamina I/II des frontalen Kortex (FR2) auf. Dort bilden sie wenige Terminationen aus (grau schraffierte Flächen). Die gelben Rechtecke zeigen die Positionen der in Abbildung 4.13 und Abbildung 4.14 folgenden Fotodokumentationen.

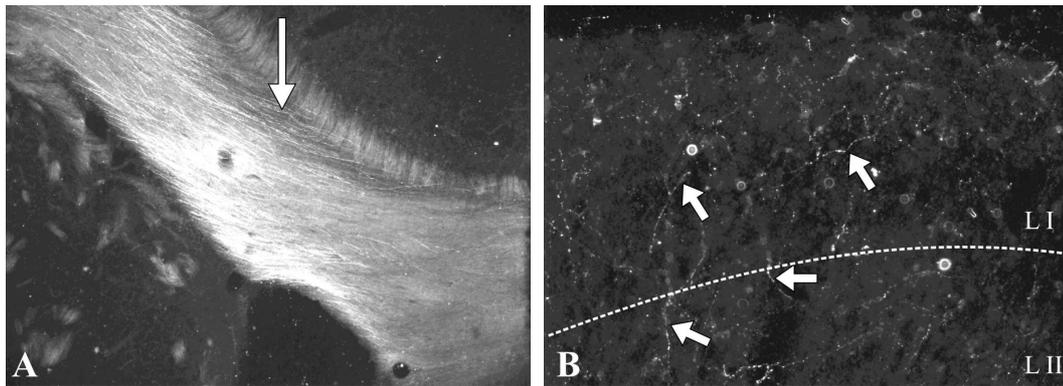


Abbildung 4.13

Fotodokumentation eines IR-Tieres mit vergleichbarer Fasermenge im Corpus Callosum wie in Abbildung 4.16 (Pfeil Foto A). In der Lamina I/II der kontralateralen FR2-Region erkennt man viele Fasern mit vereinzelter Termination (Pfeile Foto B)

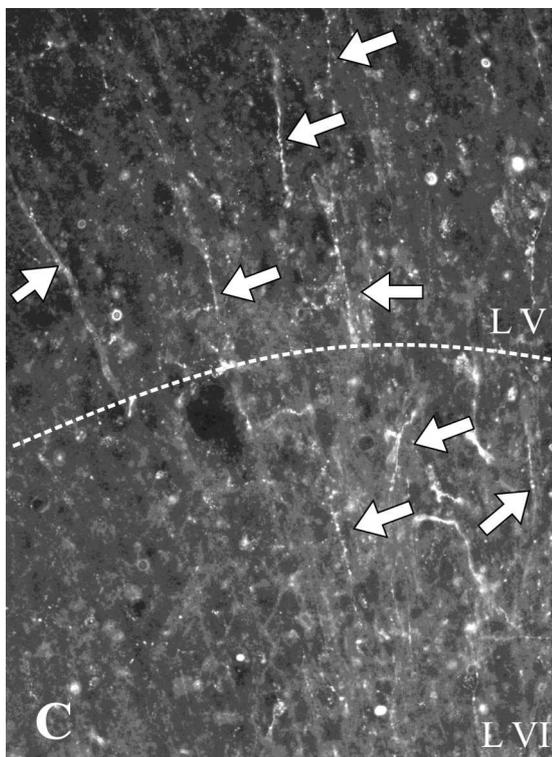


Abbildung 4.14 (links)

Fotodokumentation eines typischen IR-Falles mit aufsteigenden Fasern in Lamina VI/V.

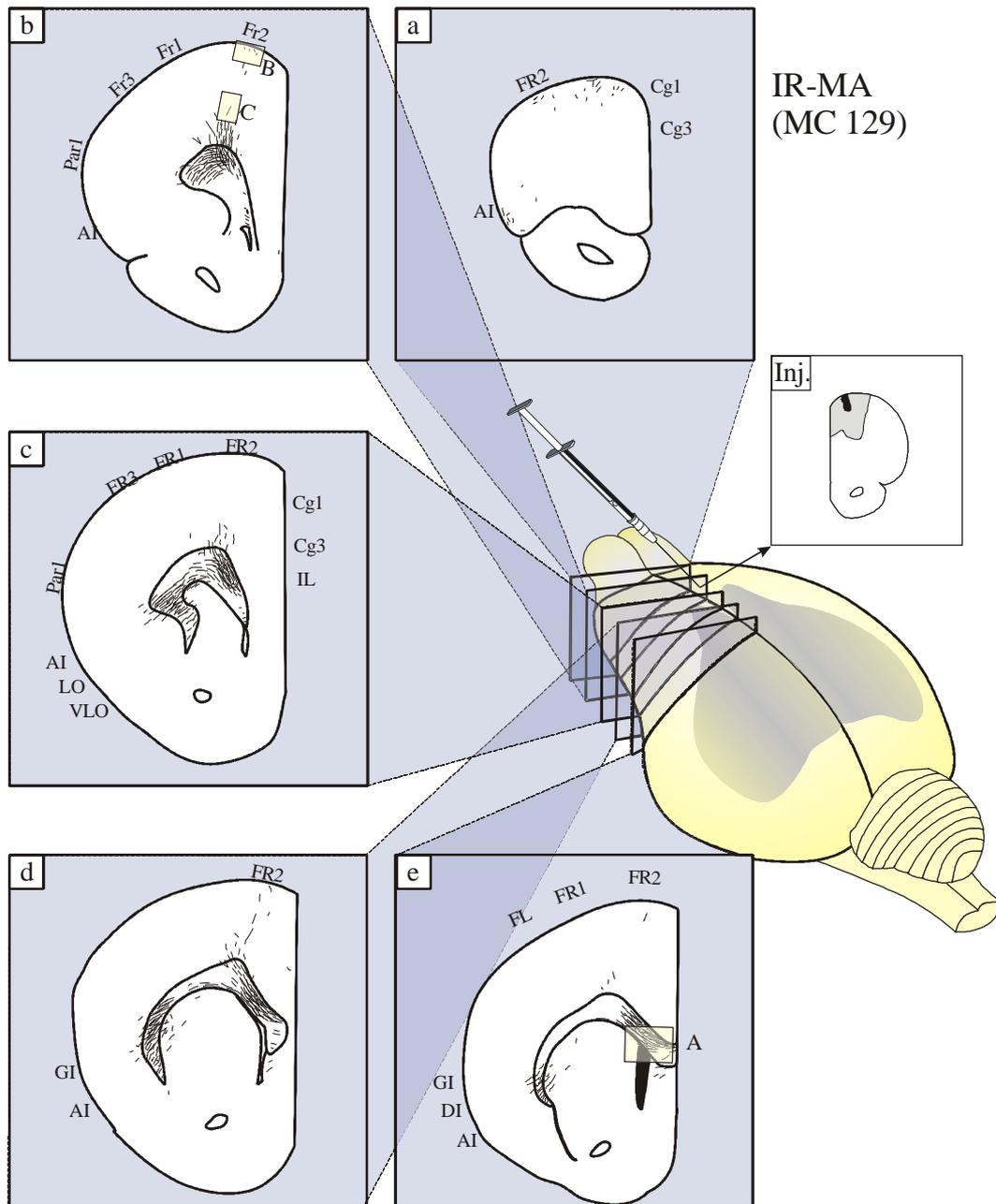


Abbildung 4.15

Übersicht der kontralateralen Faserverläufe bei einem IR-MA-Tier (Fall MC 129). Der Faserverlauf aus dem Knie des Callosums bricht in der Lamina V und VI des frontalen Kortex (FR2) ab. Terminationsgebiete finden sich nicht. Die gelben Rechtecke zeigen die Positionen der folgenden Fotodokumentationen (Abbildung 4.16 und Abbildung 4.17).

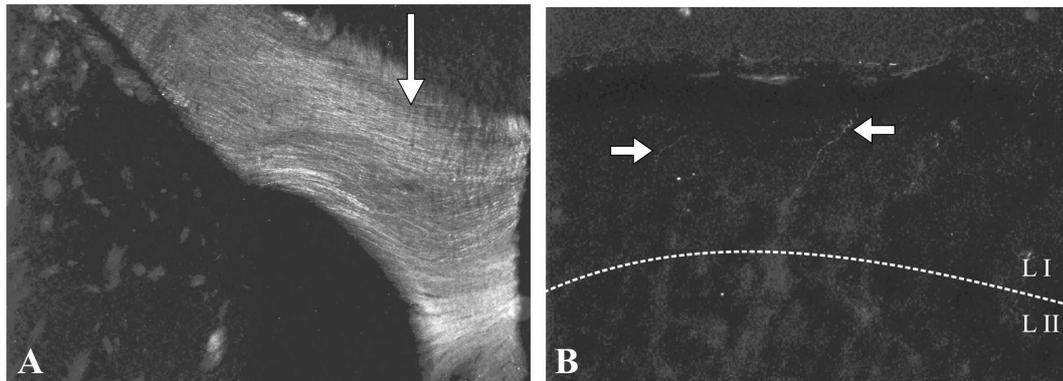


Abbildung 4.16

Fotodokumentationen eines typischen IR-MA-Tieres mit vielen Fasern im Corpus Callosum (Pfeil Foto A) und nur vereinzelten Fasern in der Lamina I/II des frontalen Kortex (FR2) (Pfeile Foto B)

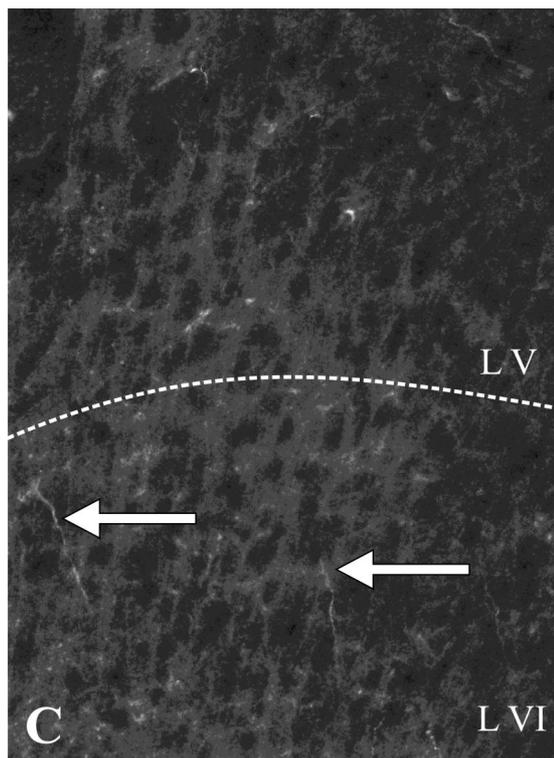


Abbildung 4.17 (links)

Fotodokumentationen eines typischen IR-MA-Tieres im Bereich der aufsteigenden Fasern in FR2. Deutlich sind die abbrechenden Fasern in der Lamina VI zu erkennen. In der Lamina V und darüber befinden sich keine Terminalfelder.

4.2.4 Quantifizierung glutamaterger L-V-Projektionen

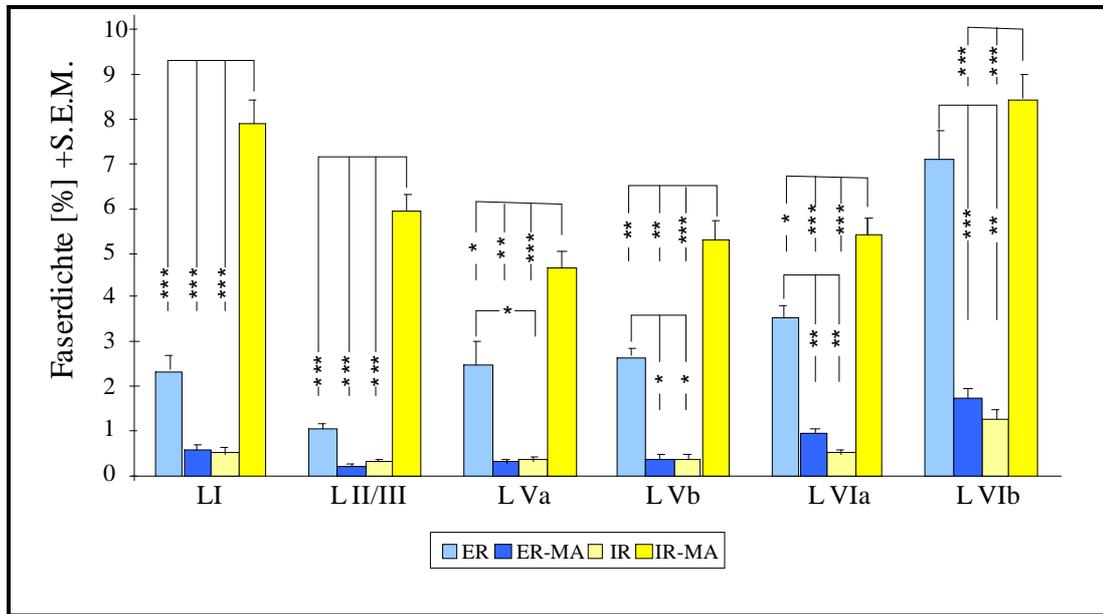


Abbildung 4.18

Faser- und Terminationsdichte im linken, zur Injektion kontralateralen PFC nach der Biocytininjektion in Lamina V (veröffentlicht in Witte et. al, 2006)

Gehegetiere (ER): n=4; Gehegetiere mit MA-Injektion (ER-MA): n=5; Käfigtiere (IR): n=6; Käfigtiere mit MA-Injektion (IR-MA): n=5.

Ergebnisse aus der Varianzanalyse: * $\hat{=}$ $p < 0.05$, ** $\hat{=}$ $p < 0.01$, *** $\hat{=}$ $p < 0.001$

Der anterograde Tracer Biocytin wurde in den rechten medialen PFC injiziert. Die durch Biocytin markierten callosalen Verbindungen und Terminationen wurden durch ein Fasererkennungsprogramm quantitativ erfasst (vgl. Kapitel 4.1.1). In die quantitative Auswertung gingen tiefe Injektionen ein, bei denen vorwiegend Lamina-V-Pyramidenzellen gefärbt waren. Flache Injektionen, bei denen vornehmlich Lamina-III-Pyramidenzellen gefärbt wurden, zeigten sehr große Standardabweichungen und sind nicht quantitativ bewertet worden (vgl. Kapitel 4.2.2 und 4.2.3). Vermutlich bilden der stark gefärbte Hintergrund und die im Vergleich zu tiefen Injektionspositionen schwach ausgeprägten Faserdichten in der kontralateralen Hemisphäre nicht genügenden Kontrast für den Kontrastabgleich bei der Fasererkennung.

Die quantitativen Daten der tiefen Injektionen zeigen, dass bei ER-MA- und IR-Tieren die Faser- und Terminationsdichten eine signifikante bzw. hoch

signifikante Absenkungen gegenüber den ER-Tieren in den Lamina V und VI des kontralateralen linken PFC erfolgen.

IR-MA-Tiere zeigen im linken PFC (kontralateral) in den Laminaschichten I bis III eine höchst signifikante Anhebung der Faser- und Terminationsdichte gegenüber allen anderen Tiergruppen. Eine Erhöhung der Faser- und Terminationsdichte zeigt sich bei IR-MA-Tieren auch in den Laminae V und VI des kontralateralen PFC, allerdings auf geringerem Signifikanzniveau.

Damit zeigt die Auswertung der tiefen Injektionen, bei denen vorwiegend Lamina-V-Pyramidenzellen der ipsilateralen Hemisphäre gefärbt waren, ein reziprokes Bild zu den lichtmikroskopischen Studien der flachen Injektionspositionen. Offenbar findet unter isolierten Aufzuchtbedingungen nach zusätzlicher MA-Applikation eine reduzierte Reifung von L-III-Projektionen zugunsten einer verstärkten Reifung von L-V-Projektionen statt. Das resultierende Dyskonnektionsmodell wird in Kapitel 4.3.1 im Zusammenhang mit anderen Studien (Bagorda et. al, 2006; Lehmann, 2003), die in der Abteilung für Neuroanatomie der Universität Bielefeld durchgeführt wurden, diskutiert.

4.2.5 Quantifizierung der Serotoninfasern im FR2-Gebiet

Die immunhistologische Darstellung serotoninhaltiger Fasern im medialen PFC zeigt eine ausgedehnte Innervation in den Laminae I bis V. Durch die deutlich unterschiedliche Innervationsdichte zwischen den Laminae ist die Laminierung auch makroskopisch erkennbar. Die Kerngebiete der Raphe (Nuclei raphe) dorsalis und medialis im Hirnstamm bilden das Ursprungsgebiete der 5-HTerge Afferenzen zum PFC (Fallon und Loughlin, 1987; Lindvall und Björklund, 1984). Ihre serotoninhaltigen Somata lassen sich im Hirnstamm - entsprechend der Lage bei anderen Nagern- lokalisieren (Neddens, 2002).

Den folgenden Darstellungen liegen die Messergebnisse auf der Schnittebene B (s. Abbildung 4.15) zugrunde. Aufgrund der makroskopisch sichtbaren Zellschichten werden den Messfenstern folgende Laminae zugeordnet: Messfenster 1 → Lamina I; Messfenster 2 und 3 → Lamina II; Messfenster 4, 5 und 6 → Lamina III; Messfenster 7 und 8 → Lamina V.

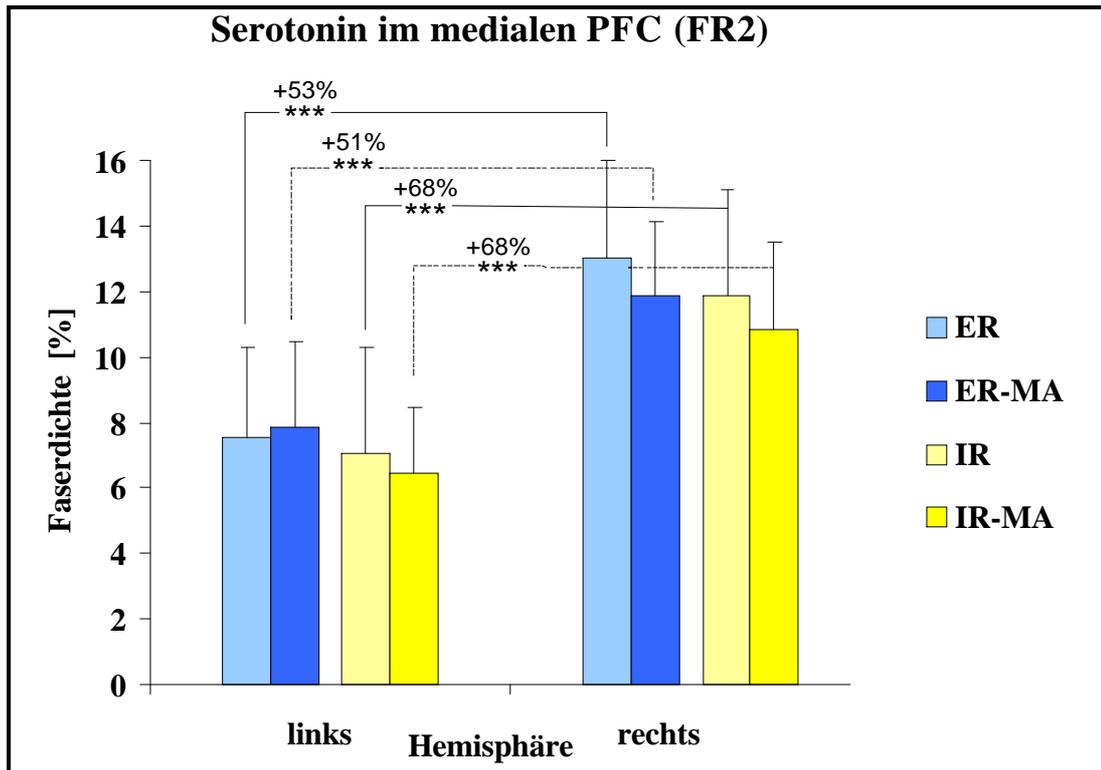


Abbildung 4.19

Die serotonerge Faserdichte im medialen PFC Vergleich der Hemisphären.

Die Grafik zeigt höchst signifikante Unterschiede zwischen der rechten und linken Hemisphäre des medialen PFC. Die Innervationsdichte ist im rechten medialen PFC bis zu 68 % höher als im linken. t-Test: *** $\hat{=}$ $p < 0,001$.

Die serotonerge Faserdichte im medialen PFC zeigt im Vergleich zwischen der linken und rechten medialen PFC-Hemisphäre einen höchst signifikanten Unterschied bei allen untersuchten Tiergruppen (ER, ER-MA; IR und IR-MA). Der rechte mediale PFC zeigt bei IR- und IR-MA-Tieren mit 68% die höchste relative Steigerungsrate der Faserdichte, während die Steigerungsrate bei ER-Tieren bei 53% und bei ER-MA Tieren bei 51% liegt (s. Abbildung 4.19).

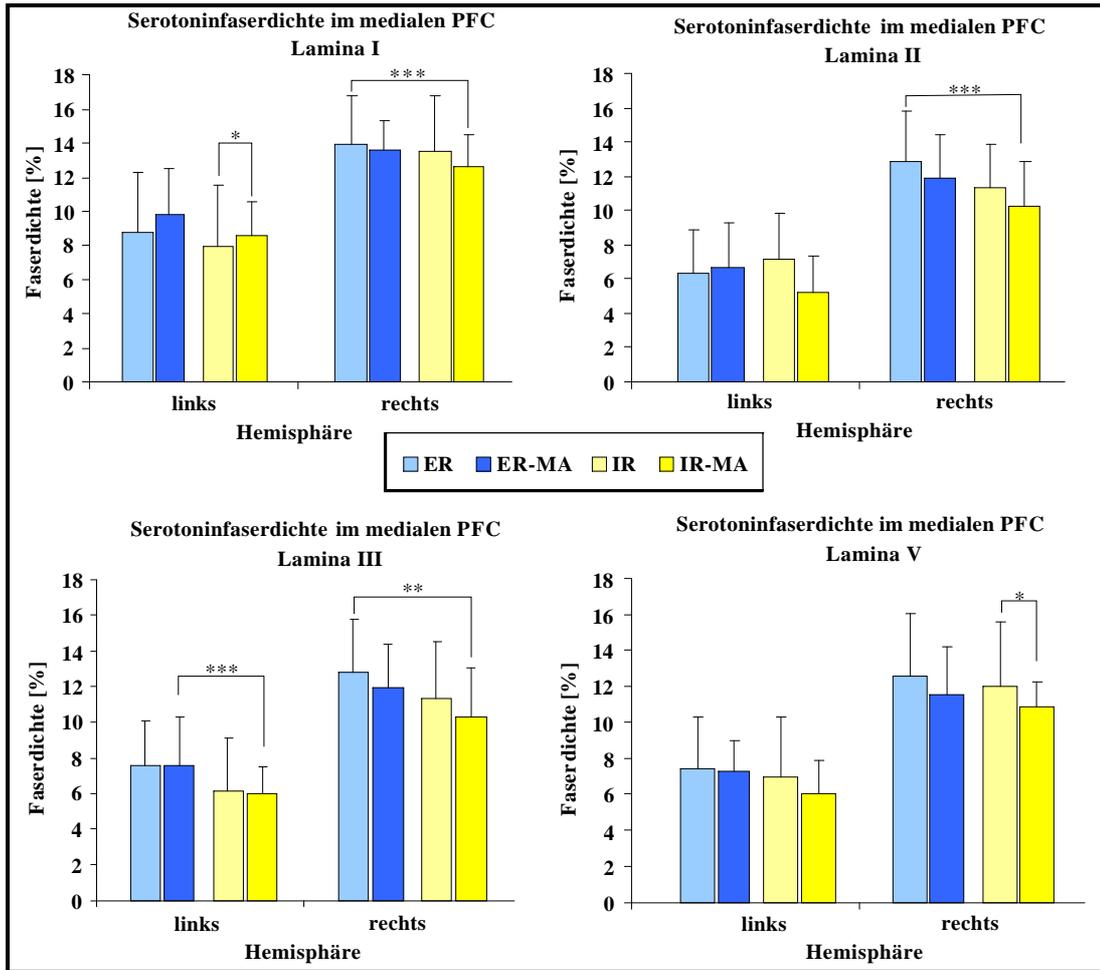


Abbildung 4.20

Die serotoninerge Faserdichte in den Laminae I, II III und V des linken und rechten medialen PFC. Die Grafik zeigt in der rechten Hemispäre eine Absenkung der Faserdichte durch zunehmende Beeinträchtigungen (IR und IR-MA). Mit Ausnahme von Lamina V-Werten wird beim Vergleich von ER- mit IR-MA-Tieren überall die Signifikanzgrenze erreicht.

In der linken Hemispäre zeigen sich im Vergleich der ER-Tiere mit den IR-MA-Tieren keine signifikanten Unterschiede.

t-Test: * $\hat{=}$ $p < 0,05$; ** $\hat{=}$ $p < 0,001$; *** $\hat{=}$ $p < 0,001$.

Werden die Messdaten für jede Lamina einzeln ausgewertet, zeigt sich im rechten PFC eine signifikante Absenkung der Faserdichte bei IR-MA-Tieren gegenüber ER-Tieren in den Laminae I, II und III. Alle Tiergruppen zeigen im rechten PFC ein tendenzielles Absinken der serotoninerger Innervationsdichte bei zunehmenden Stressoren (s. Abbildung 4.20).

In der linken Hemisphäre zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen ER- und IR-MA-Tieren. Im linken medialen PFC beeinflussen die verschiedenen Stressoren die serotoninerge Faserinnervation nicht so einheitlich wie im rechten PFC gezeigt. Ein höchst signifikanter Unterschied findet sich nur im Vergleich ER-MA- und IR-MA Tieren in der Lamina III. Die anderen Vergleiche der Messergebnisse erreichen kein Signifikanzniveau.

4.3 Diskussion

Der tierexperimentelle Ansatz in der vorliegenden Arbeit hat mir in den fünf zurückliegenden Dienstjahren für die Schulpädagogik einen erheblichen Gewinn gebracht. Denn die neurobiologische Lernforschung hat der Pädagogik in vielerlei Hinsicht die Augen für einen modernen und offenen Unterricht geöffnet, der sich das Thema „Selbstorganisation“ zur Methode gemacht hat. Eine grundlegende Erkenntnis ist, dass die Reifung von neuronalen Systemen und LERNEN prinzipiell auf den gleichen Mechanismen beruhen (Teuchert-Noodt und Lehmann, 2000), Somit bietet das Tiermodell die Basis für das Verständnis von **aktivitätsgesteuerter Strukturierung** von Nervennetzen, **plastischen Prozessen** während der Gehirnentwicklung, **kompensatorischen Prozessen** bei der Bildung von Nervennetzen und **lateralisierten Phänomenen** bei der Verarbeiten in beiden Hemisphären. Das alles sind Aspekte, die für Lernprozesse eine ganz wesentliche Rolle spielen. Eine weitere Erkenntnis ist, dass Transmitterstudien heute eine adäquate Methode sind, um eine funktionelle Disposition für kognitive Leistungen am Tiermodell zu erforschen. So werden die Leistungen von Nervenbahnen über ihre Botenstoffe messbar gemacht (Birkmayer und Riederer, 1986).

In den von mir durchgeführten Studien zur Frage der Lateralisierung des Stirnhirns habe ich mich auf die Reifung von **Glutamat** und **Serotonin** konzentriert. Beide Transmitter spielen für den Kortex eine wichtige Rolle, aber mit einem essenziellen Unterschied: **Glutamat** wirkt über die lokalen intrinsischen Schaltkreise von Pyramidenzellen direkt auf Kortexareale ein und bildet somit auch das Hauptkontingent der Verschaltungen zwischen den Hemisphären. **Serotonin** ist stattdessen eine tragende Stütze des aus dem Hirnstamm aufsteigenden retikulären Aktivierungs-Systems (ARAS) mit Produktionsstätte in den Raphekernen (vgl. z.B. Benninghoff, 1996). Damit wirkt Serotonin als Vermittler zwischen sensorischen und limbischen Aktivitäten auf das Stirnhirn und andere Kortexareale indirekt ein. Der Abgleich zwischen den direkten und indirekten Aktivitäten definiert die Funktion des Stirnhirns (siehe Seite 16).

Die Besonderheiten der menschlichen Asymmetrien stellen kein Novum dar, vielmehr reichen ihre Wurzeln weit in die Phylogenie zurück und experimentelle Studien zur Hemisphärenasymmetrie am Tiermodell tragen im erheblichen Maße zum Verständnis der Ursprünge und Entwicklung der Asymmetrie beim Menschen bei (Springer und Deutsch, 1998). Einzelne Studien haben bei Ratten serielle und parallele Verarbeitungsstrukturen gezeigt, die entsprechend der linken und der rechten Hemisphäre zugeordnet werden konnten; doch waren diese Ergebnisse von der sequenziellen oder simultanen Reizpräsentation abhängig (vgl. Bianki, 1984).

Einen Zusammenhang zwischen lateralisierten Funktionen und Reizqualität zeigten erstmals Studien mit nicht menschlichen Primaten. So erwies sich das Erkennen und Erinnern von Gesichtern bei Makaken als ein Phänomen, das auf der rechten parietalen Hemisphäre besser ausgeprägt ist als auf der linken (vgl. Hamilton and Vermeire, 1988). Weitere Studien an Primaten zeigten, dass die Verarbeitung von Wortlauten auf dem Temporallappen der linken Hemisphäre lokalisiert ist und ein Verarbeitungsmuster zu erkennen gibt, das dem des Menschen ähnelt. Allerdings ist die Zuordnung von Schlüsselfunktionen zu den Hemisphären bei Makaken noch nicht so stark festgelegt wie beim Menschen. So war nach Läsionen des linken Temporallappens auch bei älteren Tieren die Wortsilbenproduktion nach entsprechendem Training wieder möglich (rev. in Kolb und Whishaw, 1996). Im Unterschied dazu ist beim Menschen eine Reorganisation von asymmetrischen Funktionen im fortgeschrittenen Alter wesentlich eingeschränkter. Die Chance, dass sich die Sprache nach der Entfernung der linken Hemisphäre (=Hemisphärektomie) wieder erholt, steht im reziproken Verhältnis zum Alter des Patienten (Molfese und Betz, 1988).

Bemerkenswert ist die funktionelle Vernetzung der Asymmetrie mit dem Stirnhirn. Als vor circa sechs Millionen Jahren die ersten Vormenschen auf der Erde entstanden, haben sich beide, die Stirnhirnfunktionen und die seriellen und parallelen Verarbeitungsleistungen des Kortex gemeinsam, sprunghaft entwickelt. Die Entwicklung von Sprache, Strategiebildung bei der Jagd und Erschließung neuer Lebensräume, des Werkzeuggebrauches und des Präzisionsgriffes sind ohne zunehmende Stirnhirnleistungen und zunehmende asymmetrische

Sequenzierungsfähigkeit der linken Hemisphäre gar nicht denkbar. Nur gemeinsam konnten sie den erheblichen strategischen Vorteil für die Hominidengruppe ergeben, indem es zu weiteren Spezialisierungen im Verhalten kam (vgl. Knußmann, 1996). Mit der Lateralisierung speziell des Stirnhirns wuchsen so die Fähigkeiten, Informationen gezielter zu verarbeiten und in einen historischen Kontext zu setzen (s. Seite 20: HERA-Theorie, vgl. Tulving, 1994).

Dieser hier nur knapp gefasste Rückblick in die Phylogenie einer immer eindeutiger werdenden Zuordnung von Schlüsselfunktionen zu den beiden Hemisphären und dem Stirnhirn wirft die Frage auf, wie weitreichend diese Prozesse in der Ontogenese rekapitulierbar werden. Tatsache ist, dass gerade die Asymmetrisierung der Hemisphären sowie die Stirnhirnreifung zwei Prozesse sind, die sehr langsam postnatal reifen, wohingegen andere höhere Funktionen, wie Sinnesleistungen und Bewegung sehr beschleunigt reifen, soweit ihre Reifung überhaupt in die nachgeburtliche Zeit fällt. Hier erhebt sich unausweichlich die Frage, in welchem Ausmaß umweltbezogene Faktoren einen Einfluss auf die Reifung der lateralisierten Funktionen in beiden Hemisphären und speziell im Stirnhirn nehmen. Da das Prinzip der aufgezeigten Reifungsverzögerung auch bei Säugetieren und Primaten gegeben ist, sind Tierversuche hervorragend geeignet, die neuronalen Mechanismen zu ergründen.

4.3.1 Zur Lateralisierung von glutamatergen Fasern im PFC bei Gerbils

Die von mir im Rahmen der experimentellen Arbeiten durchgeführte Biocytinstudie erlaubt folgende Zusammenfassung der callosalen Faserverläufe des PFC (Abbildung 4.21). Die Terminationsfelder sind in diskreten Kolumnen organisiert und die meisten Terminationen und aufsteigenden Fasern liegen homotop zur Injektionsposition. Eine rostale Injektionsposition korreliert mit entsprechenden rostalen Terminationskolumnen. Da die Pyramidenzellen des PFC über ihre Projektionsfasern und deren Kollateralen das callosale System weitgehend bilden, sollte es sich bei sämtlichen Biocytinfärbungen um glutamaterge Fasern handeln.

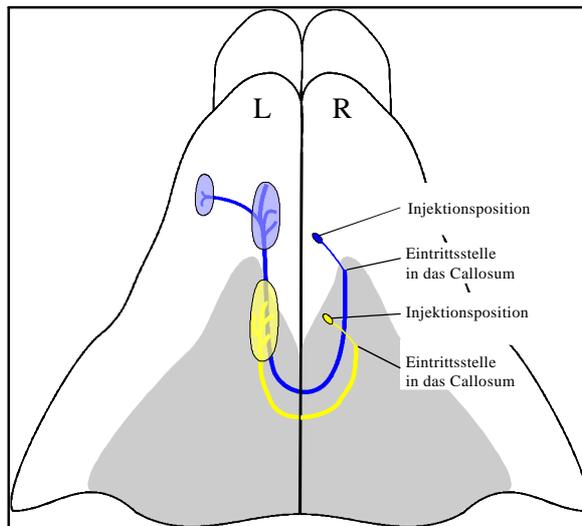


Abbildung 4.21

Grundsätzlicher Verlauf callosaler Axone im PFC. Gezeigt an zwei unterschiedlichen Injektionspositionen (rechte Hemisphäre) mit ihren entsprechenden Terminationsgebieten (linke Hemisphäre)

Die homotope Organisation der callosalen Fasern im frontalen Kortex ist an der Ratte bereits gezeigt (vgl. Isseroff, 1984). Auch in Regionen des parietalen und caudalen Kortex weisen die callosalen Verbindungen eine homotope Verschaltung zur kontralateralen Hemisphäre auf. Für die Ratte wurden homotope Projektionen im visuellen Kortex (vgl. Miller M.W. et al., 1984) und für den Hamster im parietalen Kortex (Hedin-Pereira et al., 1999) mit Hilfe des Tracers Biocytin nachgewiesen. Gemeinsam belegen diese Studien zu den interhemisphärischen Verbindungen für den rostralen, parietalen und caudalen Kortex ein einheitliches Konzept der Verschaltung zwischen rechten und linken Arealen über mehr oder weniger ausgeprägte u-förmige Faserstränge (vgl. Abbildung 4.22, A).

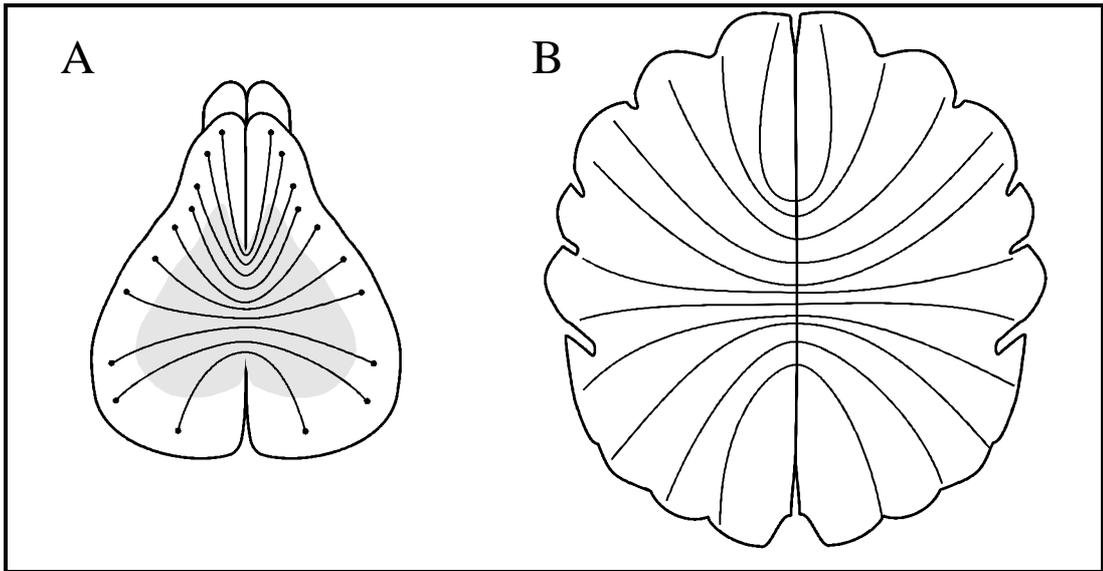


Abbildung 4.22

Modellhafte Darstellung der Kommissurenfasern des Corpus Callosums

A beim Nager (zusammengestellt im PFC aus den eigenen Biocytinstudien, im parietalen Kortex nach Hedin-Pereira et. al., im okzipitalen Kortex nach Miller M.W. et al., 1984)

B beim Menschen (nach Benninghoff, 1994)

Damit gleicht das Verschaltungsmuster des callosalen Systems von Nagetieren vollständig dem des Menschen (vgl. Abbildung 4.22, B und Benninghoff, 1994). Diese grundlegenden strukturellen Übereinstimmungen bilden den Hintergrund einer vergleichenden Diskussion zur Lateralisierung. Außerdem bilden solche Gemeinsamkeiten die Basis, auf der die Erkenntnisse zur Reifung callosaler Verbindungen im Nager-PFC zuerst auf das *parallel-serielle Hemisphärenmodell* zur asymmetrischen Verarbeitung kognitiver Prozesse und später auf die Konzeption von Unterrichtsmethoden und -inhalten angewendet werden.

In den durchgeführten Injektionsstudien zeigte die qualitative Bewertung der glutamatergen Faser- und Terminationsmuster im Vergleich von Tieren aus Gehege- und Käfigaufzuchten individuell eine sehr unterschiedliche Ausprägung der Fasermuster. So konnten die Vorstellungen, dass eine Gehegeaufzucht eine verstärkte Faserbildung und Termination im frontalen Kortex induziert (s. quantitative Befunde) zunächst nicht unbedingt erkannt werden. Vielmehr zeigten viele ER-Tiere bei vergleichbaren Injektionspositionen sogar auf einer definierten

Schnitthöhe eine nur lockere Faser- und Terminationsverteilung. Alles sprach dafür, dass dafür ein methodisches Problem verantwortlich sein sollte: Die vertikale Einteilung von Kortextrindefeldern hat zur Folge, dass die Einzelmodule nicht gezielt mit Biocytin injiziert werden können. Außerdem alternieren die Module, die in den kontralateralen oder ipsilateralen frontalen Kortex projizieren (vgl. Fröstl 2002 und Kapitel 1.3). Damit kann mit einer Injektionsposition nicht sichergestellt werden, dass immer die nach kontralateral projizierenden Module auf gleiche Weise getroffen werden. Deswegen variiert die Faserdichte und Intensität der Terminationsgebiete von Fall zu Fall. Dieses Erkenntnis zeigte, wie notwendig es war eine hinreichend große Tierzahl für die quantitative Bewertung einzubeziehen.

In einem zweiten Auswertungsverfahren wurde die Quantität der Faserausbreitung bzw. Intensität der Terminationsgebiete über drei Schnitte, deren Dicke 60 µm betrug, bestimmt und mit den durch das Corpus Callosum ziehenden Fasern korreliert. Danach ergibt sich ein für die Tiergruppen eindeutigeres Bild: ER-Tiere zeigen prinzipiell im Vergleich zu den IR-Tieren eine stärkere Faserbildung und breitflächigere Ausdehnung der Terminationsgebiete im kontralateralen PFC (vgl. Kapitel 4.2.2).

Mit diesen Ergebnissen wird erstmalig ein Zusammenhang zwischen der Reifung interhemisphärischer Verbindungen im PFC und den Haltungsbedingungen dokumentiert. Eine soziale Einbindung der Tiere und reizreiche Umwelt führen zu einer ausgeprägteren kontralateralen Projektion im PFC als eine soziale Deprivation und reizarme Umwelt. Dem stehen Studien gegenüber, die bei Sinnesdeprivation eine Ausweitung der Terminationsgebiete callosaler Verbindungen zeigen. Wurden die Auswirkungen von Dunkelhaltung bei Hasen auf die callosalen Verbindungen im visuellen Kortex untersucht, zeigte sich, dass es in den Zielgebieten der callosalen Projektionen zu verstärkten Terminationen im visuellen Kortex kommt (vgl. Grigonis und Murphy, 1991). Durch die fehlenden Lichtreize könnten also auch callosale Axone von benachbarten, nicht-visuellen Rindefeldern reaktiviert worden sein und unspezifische Areale funktionell mit einbezogen haben. Eine derartig

unspezifische Reorganisation wird auch für den parietalen sensomotorischen Kortex nach Gliedmaßenamputation beschrieben (vgl. Kandel, 1996).

Die Frage erhebt sich also, warum im assoziativen PFC nach den vorliegenden Befunden die Ausprägung der interhemisphärischen Verbindungen durch soziale Deprivation vermindert wird. Eine Erklärung bietet sich aus den Funktionsbezügen, in die der PFC eingebunden ist. Der PFC ist für die Integration von sämtlichen, in ihm zusammenfließenden Informationen verantwortlich. Wächst ein Tier in einer reizreichen Umwelt auf, sind vermehrt integrative Funktionen gefragt: Raum-Zeit-Verarbeitungen müssen koordiniert und Strategien entwickelt werden, um sie dann in Gedächtnisinhalten zu hinterlegen und zu einem späteren Zeitpunkt abzurufen. So induzieren reizreiche Umweltbedingungen eine stärkere Faserdichte in kontralateralen Arealen des PFC und eine größere Ausbreitung der Terminationsgebiete, was sich natürlich auch auf die Gedächtnisleistung auswirken sollte. In Verhaltenstests bei *Meriones unguiculatus* zeigten IR-Tiere im jungerwachsenen Alter, höchst signifikant geringere Gedächtnisleistungen im „delayed response test“ (= Test zum verzögerten Antwortverhalten) als ER-Tieren (Polascheck, 2004).

Leider gibt es bislang keine Vergleichsstudie an Menschen, die unter sozialer Umweltarmut bzw. mit hoher sozialer Integration aufgewachsen sind. Die wachsende Verfeinerung bildgebender Verfahrenstechniken sollte solche Studien in absehbarer Zeit möglich machen. Gewisse Erkenntnisse zur präfrontalen Asymmetrie hat man bildgebend beim Menschen bereits erkannt: So ist die Korrelation zwischen einer prozessspezifischen Gedächtnisbildung und der asymmetrischen Aktivierung des PFC belegt. Tulving und Mitarbeiter (1994) postulieren auf Grundlage von PET Studien, dass beim Enkodieren und Abrufen episodischer bzw. semantischer Gedächtnisinhalte eine Hemisphärenasymmetrie (HERA-Theorie: Hemispheric Encoding/Retrieval Asymmetry) vorliegt. Beim Abruf semantischer Informationen und beim Enkodieren episodischer Informationen liegt eine Aktivierung des linken PFC, beim Abruf episodischer Informationen eine Aktivierung des rechten PFC vor (vgl. Grasby et al., 1993 und Shallice et al., 1994). Eine Aktivierung des rechten PFC findet vielen Studien zufolge zum Abrufen episodischer Informationen statt (Tulving et al., 1994). Die

linksseitige präfrontale Aktivierung wird von den Autoren nach dem CARA (cortical asymmetry of reflective activity)-Modell (Nolde, Johnson and D'Esposito, 1998) durch die hohe Anforderung beim Abrufen von episodischen Details erklärt. Wenn Gesichtern irgendwelche Namen zugeordnet wurden, dann zeigte sich, dass eine ansteigende Aktivierung im linken PFC mit Abruferfolg zusammenhing (Zeineh et al., 2003 und Sperling et al., 2003).

Den vorliegenden tierexperimentellen Befunden zufolge wäre es dringend angezeigt, solche Daten nunmehr im Vergleich von Jugendlichen zu erheben, die aus entsprechenden familiären Herkünften stammen.

Eine eigene Bewertung verdient die vorliegende Studie, in der die Tiere am postnatalen Tag 14 mit einer einmaligen Dosis von Methamphetamin (MA) behandelt wurden. Prinzipiell kann die MA-Intoxikation als traumatisches Ereignis interpretiert werden (Lehmann und Teuchert-Noodt, 2003). Der Vergleich von ER-MA mit IR-MA-Tieren zeigt aber deutlich, dass weitere Umweltfaktoren die Faserreifung beeinflussen. Bei ER-MA-Tieren ist eine retardierte Reifung der callosalen Axone durch die MA-Behandlung nicht eindeutig nachzuweisen. Es ist zu vermuten, dass die Auswirkungen des einmaligen pharmakologischen Stressors durch die optimierten Aufzuchtbedingungen weitgehend kompensiert werden können. Dafür sprechen eine Reihe weiterer Befunde, welche zu diesem Tiermodell in all den Jahren bereits zusammengetragen wurden (rev. in Teuchert-Noodt, 2000; Busche 2003). Ganz andere Auswirkungen hat die MA-Traumatisierung unter restriktiven Aufzuchtbedingungen. IR-MA-Tiere mit flachen Injektionen, die vornehmlich die Projektionsneurone der Lamina III treffen, zeigen auf der zur Injektion kontralateralen Seite ein Abbrechen des Faserzuges ab dem Knie des Callosums, so dass die oberen Kortexschichten kaum erreicht werden. Es kann also postuliert werden, dass die MA-Behandlung am postnatalen Tag 14 so entscheidend in die Reifung der callosalen Axone des PFC eingreift, weil die Tiere danach aufgrund der Isolationsaufzucht chronisch beeinträchtigt werden. Insgesamt belegen diese Studien, dass die ersten Lebenswochen von Gerbils als *kritische Phase* für die Reifung von kortiko-kortikalen (=glutamatergen) Pyramidenfasern betrachtet werden müssen. Inzwischen zeigen laufende Untersuchungen in unserem Bereich

(Witte, in präp.), dass die kritische Phase für die PFC-Glutamatfaserreifung bei den Gerbils in die Zeit von Tag 21 bis 27 fallen sollte. Damit sind für diese Spezies ähnliche Situationen belegbar wie für andere Neokortexfelder bei der Ratte.

Im parietalen Kortex wurden an Ratten Umbauprozesse innerhalb der dritten postnatalen Lebenswoche gezeigt (Ivy and Killackey, 1981). Prä- und postnatal werden pyramidale Fasern sogar im Überschuss angelegt, die im Hinblick auf interhemisphärische Funktionen vermutlich noch keine funktionelle Bedeutung haben (rev. in Lehmann, 2001). Im Zuge der dann einsetzenden lateralisierten Reifung werden die transient angelegten Axone der Lamina V-Pyramidenzellen in einer *kritischen Phase* teilweise zurückgebildet. Im gleichen Prozess wachsen Lamina III-Pyramidenaxone durch das Callosum in kontralaterale Areale des parietalen Kortex ein, die dann erst eine funktionale Einbindung der beiden Hemisphären gewährleisten (vgl. Ivy and Killackey, 1981).

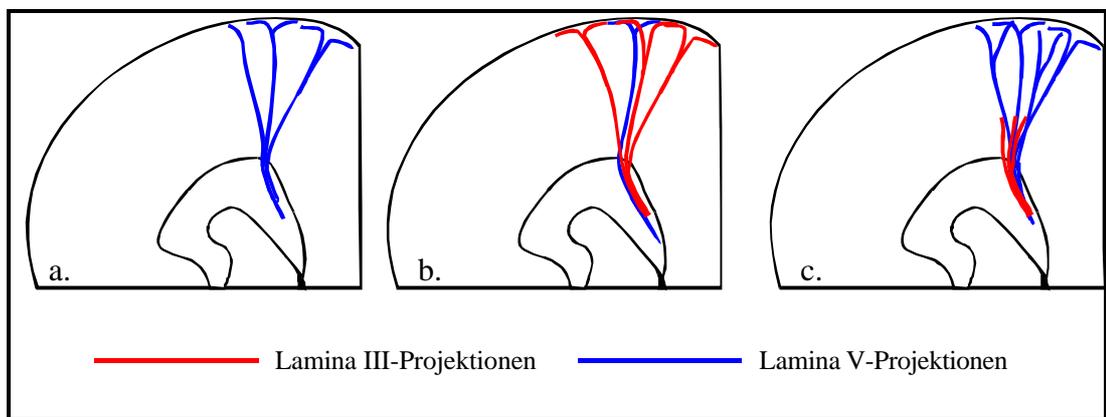


Abbildung 4.23

Schematische Darstellung der Entwicklung von callosalen Projektionen im Nager-PFC.

- Das Auswachsen von Lamina-V-Projektionen (blau) bis zur 3. Lebenswoche (nach Ivy and Killackey, 1981)
- Die Rückbildung transienter Lamina V-Projektionen (blau) und die Reifung von Lamina III-Projektionen in der 3. Lebenswoche bei ER-Tieren. (nach Ivy and Killackey, 1981)
- Rückbildung verstärkte Lamina V-Projektionen (blau) und die gestörte Reifung Lamina III-Projektionen (rot) in der 3. Lebenswoche bei IR-MA-Tieren.

Die vorliegenden Ergebnisse zu den IR-MA-Tieren erlauben somit folgende Interpretation: Durch die Gabe von MA am Tag 14, wird bei Gerbils im PFC die primäre (=transiente) Überreifung von L-V Projektionen nicht umgebaut.

Die früheren Untersuchungen zu diesem Tiermodell zeigten eine damit einhergehende Kaskade weiterer strukturplastischer Veränderungen auf: Die mesopräfrontale Dopaminbahn reift suppressiv (vgl. Dawirs et al., 1994), die GABA-Innervation exzessiv (vgl. Nossel et al., 1997) und ebenso die Spinedichte an den Pyramidendendriten (vgl. Bläsing et al., 2001). Außerdem konnte Bagorda (2005) in seiner ipsilateralen Biocytinstudie zeigen, dass sich durch die MA-Behandlung Lamina V/VI pyramidalen Projektionen exzessiv und die Lamina-III pyramidalen Projektionen suppressiv ausbilden, das heißt die Lamina-III-Pyramiden bei IR-MA-Tieren sich nur minimal kollateralisieren (vgl. Abbildung 4.23). Dieses Resultat bestätigt sich für alle von Bagorda untersuchten Kolumnen, im frontalen, parietalen und cingulären Kortex (Bagorda et al., 2005). Damit wird erstmals eine in der Schizophrenieforschung geforderte funktionelle / strukturelle Dyskonnetion an unserem Tiermodell bestätigt. Bagorda (2006) diskutiert dieses Pathophänomen in seiner kürzlich abgeschlossenen Dissertation ausführlich. Hier bleibt es festzustellen, dass eine dysfunktionale Reorganisation auch die interhemisphärischen Verbindungen betrifft. Wie sich die gefundenen strukturellen Veränderungen im Seitenvergleich funktionell auswirken sollten, kann nur spekuliert werden. So möchte auch bei Nagetieren ein Seitenvergleich auf PFC-Ebene dazu dienen, raum-zeitliche Verrechnungen zu optimieren. Diese Funktion sollte also gestört sein.

Beim **Menschen** haben interhemisphärische PFC-Funktionen eine hohe Relevanz für Lernprozesse. Das menschliche Stirnhirn zeigt zum Beispiel bei der Verarbeitung von Orientierungsaufgaben eine starke Asymmetrie. Korrelationen zwischen der Verarbeitung von Gedächtnisinhalten zu der jeweils aktivierten Stirnhirnseite konnten gezeigt werden (Suchan et al., 2002). Dabei werden sukzessiv präsentierte Rotationsaufgaben im linken ventrolateralen Stirnhirn verarbeitet, während der räumliche Vergleich gleichzeitig gezeigter Rotationskörper das rechte dorsolaterale Stirnhirn aktiviert (vgl. Suchan et al., 2002). Die spannende Frage ist nun, ob die im Tiermodell gezeigten dysfunktionalen Reifungsprozesse der interhemisphärischen Verbindungen des PFC auch im menschlichen Gehirn in ähnlicher Weise nach traumatischen frühkindlichen Erfahrungen auftreten und Lern-Leistungsstörungen erklären unter

denen traumatisierte Kinder leiden. Jedenfalls ist in der Schizophrenieforschung der Zusammenhang zwischen dem pathologischen Krankheitsbild, einer Lern-Leistungs-Störung und Störung der asymmetrischen Verarbeitung neokortikaler Funktionen belegt (rev. in Rahimi, 2001).

4.3.2 Zur Reifung von lateralisierten serotoninergen Fasern im PFC

Anders als in der Biocytinstudie zeigt die vergleichende Serotoninstudie keine wesentlichen quantitativen Unterschiede in der Faserdichte zwischen den vier Gruppen. In allen vier Gruppen tritt ein deutlicher asymmetrischer Effekt zutage. So liegt die 5-HTerge Innervation im rechten medialen PFC-Areal höchst signifikant über der im linken in allen untersuchten Tiergruppen. Andere vergleichende Studien an Gerbils in unserem Forschungsbereich weisen einen entsprechenden Lateralisierungseffekt auch in anderen Kortexarealen nach (Neddens et al., 2004). Demgegenüber treten keine Lateralisierungseffekte der 5-HT-erge Innervation in subkortikale Strukturen auf. (Lesting et al., 2005). Das möchte sich aus der einmalig hohen plastischen Potenz erklären, zu der Serotonin fähig ist.

Da Serotonin im Kortex allgegenwärtig ist und als Teil des so genannten aufsteigenden Aktivierungssystems (ARAS) eine hohe Bedeutung für die allgemeine Wachheit hat, liegt die Vermutung nahe, dass eine asymmetrische Verteilung bei Tieren wie beim Menschen die selektive Aufmerksamkeit etwa bei der Sprachbildung entsprechend asymmetrisch steuert. Im PFC könnte die asymmetrische 5-HT-Präsenz der raum-zeitlichen Verarbeitung spezifischer Teilleistungen dienen. Sicherlich wäre die Schlussfolgerung zu kurz gegriffen, dass diese Funktionen durch eine deprivierte Aufzucht folglich nicht gestört wären. So induziert eine einfache Futterdeprivation eine signifikante Steigerung der DA-Konzentration im linken PFC (rev. in Berridge et al., 2003).

Aus den dargestellten Transmitterstudien kann eine grundsätzliche asymmetrische kognitive Leistung auch bei Tieren gefordert werden. Seit den Untersuchungen zu Split-Brain-Patienten nimmt man an, dass die menschlichen Hemisphären Informationen zur Vermeidung von Interferenzen asymmetrisch

verarbeiten (vgl. Eccles; 1984). Dieses Grundprinzip ist auch für die interhemisphärische Reizverarbeitung im Nagerkortex zu fordern: Jede Funktion des Kortex wird nur von einer Hemisphäre gesteuert, da eine doppelte Aufgabenverteilung zu Interferenzen und somit zu Störungen der neuronalen Verarbeitung führen muss. Auch scheint im Gehirn von Nagern die Lateralisation durch den aktiven Gebrauch strukturiert zu werden. So weisen in Studien zur Pfotenpräferenz von Ratten über die gesamte Population eine Verteilung von 50 zu 50 des bevorzugten Pfotengebrauches auf, die durch einen ersten Gebrauch induziert und im Weiteren konditioniert worden sein könnte (vgl. Springer und Deutsch, 1998).

4.3.3 Konsequenzen für den Schulunterricht

Aus den vorliegenden Transmitterstudien lassen sich im Vergleich zu allerdings noch sehr dürftigen Daten für den Menschen erste Folgerungen für die Pädagogik ableiten. Die unterschiedliche Ausprägung der Transmitterreifung zeigt, dass Transmittersysteme aktivitätsgesteuert reifen. Der Vergleich von ER-Tieren, IR-Tieren und IR-MA-Tieren veranschaulicht die individuelle Entwicklung der callosalen Verschaltung des PFC, die durch unterschiedliche Umweltbedingungen bzw. eine frühkindliche Traumatisierung (MA-Applikation) verschiedene Ausreifungen der Nervenetze im Stirnhirn induziert. Die generelle Kopplung von Struktur und Funktion muss hier nicht ausgeführt werden. Was sich also im Geschehen einer dysfunktionalen Reifung des Stirnhirns darstellen lässt, muss unausweichlich schwerwiegende Folgen für viele Hirnfunktionen haben. Denn aus dem Stirnhirn wird die Kontrolle ausgeübt auf (1) das gesamte Endokrinum, das über den Hypothalamus und die Hypophyse reguliert wird, auf (2) motorische Funktionen, die über den Motorkortex, das Kleinhirn und die Basalganglien gesteuert werden, und auf (3) emotionale und kognitive Funktionen, die über die limbischen und assoziativen Kortexregionen gesteuert werden (Abbildung 4.24). Alle diese Teilfunktionen werden durch Kontrollverlust aus dem Stirnhirn gestört. Das muss sich automatisch auch ganz generell auf Lern-Leistungsstörungen auswirken.

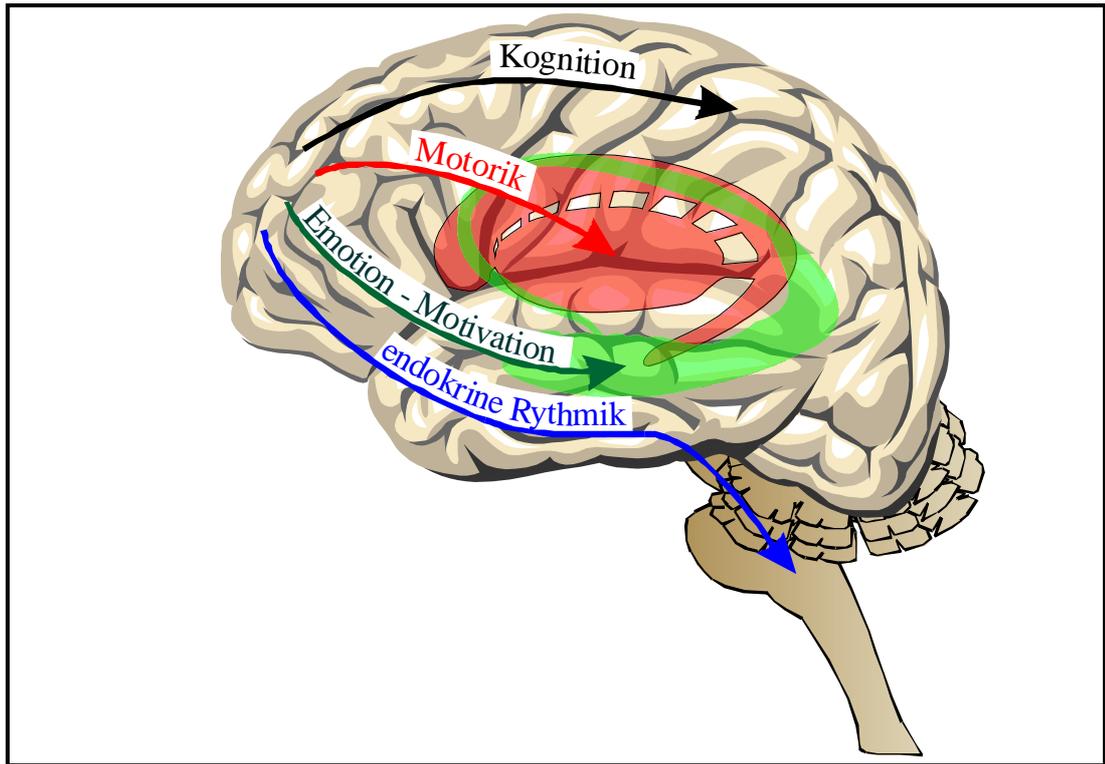


Abbildung 4.24:

Vereinfachte Darstellung der Kontrollfunktionen des Stirnhirns beim Menschen (nach Förstl, 2002)

Somit hat die vorliegende Studie greifbare Konsequenzen für die Verantwortlichen in der schulischen Bildung: Das Bewusstsein, dass eine Traumatisierung zu stärkeren Veränderungen der neuronalen Strukturen des Stirnhirns führten, sollte die Akzeptanz für therapeutische Beratungen in Schulen stärken und Verantwortliche in der Politik zu einer rechtzeitigen Intervention motivieren. Drogenmissbrauch von Schülern, eine Eskalation von Gewalt auf dem Schulhof und schwere Lernstörungen dürfen nicht länger hingenommen werden, vielmehr sind die Wurzeln ihrer Entstehung in frühkindlichen Fehlsteuerungen zu sehen. Meine experimentelle Arbeit hat mir dafür die Augen geöffnet. Seitdem sehe ich es als meine Pflicht an, entsprechende Aufklärungsstunden in den Biologieunterricht einfließen zu lassen. Die Erfahrungen zeigen, dass die Schüler gerade das Tiermodell als den sehr anschaulichen Brückenschlag zum Verständnis dieser Zusammenhänge begreifen.

Aber auch auf den Regelunterricht haben die Ergebnisse der Tierstudien konkrete Auswirkungen. Sie zeigen, dass jedes Gehirn durch die veränderten

Stirnhirnstrukturen individuelle Dispositionen aus den vergangenen Umweltinteraktionen in einen Lernprozess einbringt, die in den Unterrichtsprozess integriert werden müssen. Allerdings bestehen Klassen nicht nur aus drei bis fünf Schülern, die in diesen kleinen Lerngruppen individuell gefördert werden können. Vielmehr sind Klassenstärken von über 30 Schülern realistisch. So scheint es fast unmöglich, den individuellen Dispositionen gerecht zu werden.

Das Gehirn selbst liefert das Vorbild für ein neurodidaktisches Unterrichtsmodell, das eine Vielzahl autark arbeitender Elemente sinnvoll in einem System koordiniert. In den Netzwerken des Gehirns arbeiten die Nervenzellen autonom und streben ein Erregungs-Hemmungsgleichgewicht an. Reize aus der Umwelt oder auch endogene Faktoren (z.B. Hormone) versetzen die Nervennetze immer wieder in labile Zustände, die sie durch strukturelle Umbauprozesse kompensieren müssen (Wolff, 1983). Über diesen Prozess der selbstorganisierenden Adaption an Umweltreize kommt Bedeutung in die Nervennetze. Dieses **Prinzip der Selbstorganisation** kann auch auf eine größere Lerngruppe übertragen werden und in künstlichen Nervennetzen simuliert werden. In Gruppen verhalten sich Individuen mit ihrer spezifischen Lerndisposition wie Neurone in einem Netzwerk (Butz und Teuchert-Noodt, in press). Jeder Lehrer wird bestätigen können, dass Schüler meistens versuchen, den Weg des geringsten Widerstandes zu gehen. Deshalb nehmen sie den Frontalunterricht oftmals gerne an (vgl. Ascherleben, 1999). Den Prinzipien der **Kompensationstheorie** (Wolff, 1983) folgend, müssen Lehrer selbst organisierende Prozesse initiieren und Schüler aus ihrer anerzogenen defensiven Grundhaltung holen. Dazu müssen sie an mehr Verantwortung für eigenständisches LERNEN herangeführt werden. In methodisch kleinen Schritten kann man dann ein selbstorganisiertes Unterrichtsmodell etablieren.

Meine diesbezüglichen Erfahrungen haben gezeigt, dass es in der Regel in einem Schulhalbjahr gelingt, Schülergruppen zu einer Arbeitshaltung zu motivieren, die ein selbstorganisiertes Arbeiten zulässt. Es soll hier aber nicht verschwiegen werden, dass es zu Beginn des Lernprozesses in den Lerngruppen oftmals zu erheblichen Widerständen kommt, wenn die Führungsrolle des Lehrers

immer kleiner wird. Gerade in diesen Situationen hat mir persönlich mein Hintergrundwissen über die neuronalen Prozesse beim LERNEN sehr geholfen, da ich die Parallelen zwischen den Lernprozessen und der Organisationsform meines Unterrichts den Schülern aufzeigen konnte.

Das Konzept *Lernen durch Lehren* (LdL) gewährleistet mit der Umsetzung des Lernstoffs durch die Schüler, dass sich die aktivitätsgesteuerten Prozesse selbsttätig verstärken und gleichzeitig parallele und serielle Schaltkreise ausreifen. So zeigt das *parallel-serielle Hemisphärenmodell*, dass die sequenzielle und komplexe Informationsverarbeitung eine wesentliche Komponente von Kognition ist. Beim Planen von Schülerpräsentationen müssen die Lerninhalte sequenziell vorbereitet und sprachlich umgesetzt werden. In späteren Unterrichtsphasen lernen die Schüler ihre Präsentationen zu visualisieren und serielle und komplexe Verarbeitungsstrategien zu verknüpfen. Die Kommunikation in der Lerngruppe wird zu einem Indikator für Qualität von Unterricht, die an der Eigendynamik und der Fähigkeit zur Selbstorganisation messbar ist.

Im folgenden Kapitel werden am Beispiel von Unterrichtseinheiten, die in einem Leistungskurs Biologie das LERNEN selbst zum Thema machen, die oben kurz skizzierten Ideen für ein neurodidaktisches Unterrichtsmodell an didaktischen und methodischen Überlegungen konkretisiert. Insbesondere wird auf die Darstellung der Unterrichtsmaterialien und der Unterrichtsmethoden Wert gelegt, die eine aktive Kommunikation unter den Schülern systematisch fördern und somit die strukturierende Funktion der Sprache unterstreichen.

5 LERNEN IM BIOLOGIEUNTERRICHT

5.1 Entwicklung eines neurodidaktischen Unterrichtsmodells

Ein neurodidaktisches Unterrichtsmodell muss sich also daran ausrichten, dass individuelle Ausprägungen von asymmetrischen Funktionen durch frühkindliche Erfahrungen entstehen. In der Vorstellung des *parallel-seriellen Hemisphärenmodells* wird der rechten Hemisphäre die komplexe ganzheitliche und der linken die sequenzielle analytische Verarbeitung zugeordnet, wobei individuell graduelle Abstufungen zu bedenken sind. Denn 5 % der Rechtshänder und 15 % der Linkshänder haben eine rechtshemisphärische Sprachverarbeitung; 15 % der Linkshänder zeigen sogar Sprachareale auf beiden Hemisphären (vgl. Kolb und Whishaw, 1996). Diese Personen widersprechen jedoch nicht den Prinzipien *serieller und paralleler* Verarbeitungsstrategien im Gehirn. Sie belegen lediglich, dass beide Schaltprinzipien nicht stringent der linken bzw. rechten Hemisphäre zugeordnet werden können. Insofern kann die vereinfachte Vorstellung des *Hemisphärenmodells* zunächst einmal auch auf sie voll angewandt werden.

Das *Hemisphärenmodell* erfordert eine sehr abstrakte Vorstellungskraft beim didaktisch interessierten Leser. Deswegen sollen auch der experimentelle Teil dieser Arbeit und die bildliche Darstellung zum Verständnis der Hemisphäreninteraktionen der interhemisphärischen Verbindungen entschieden beitragen. Die Verbindungen zwischen kontralateralen Kortexarealen werden mit dem Tracer Biocytin durch die Faserfärbung dargestellt und damit real wahrnehmbar. Auch die umweltbedingten Reorganisationsprozesse (=aktivitätsgesteuerte Synaptogenese) während der Reifung können am Tiermodell unmittelbar verfolgt werden, so dass beim Leser eine Vorstellung von interhemisphärischen Verbindungen und ihrer Umorganisation geweckt wird, die durch einen theoretischen Zugang nur schwer zu vermitteln ist. Der Aufbau dieser Arbeit folgt somit Prinzipien, die auch den Arbeitsmaterialien der Unterrichtseinheiten zugrunde liegen (vgl. Kapitel 5.3.2). Es werden

linkshemisphärische (hier: sprachliche) und rechtshemisphärische (hier: visuelle) Zugänge genutzt, um einen komplexen Sachverhalt zu vermitteln. Des Weiteren wird der theoretische Hintergrund an konkreten Beobachtungen entwickelt, so dass er besser in das assoziative Netzwerk des Gehirns integriert werden kann.

Das *Stirnhirn*, welches von allen Kortexarealen die langsamste Reifung beschreitet, ist ein bevorzugter Themenschwerpunkt in dieser Arbeit. Die hierzu gebrauchten neurobiologischen Erkenntnisse sind jüngsten Datums, weshalb es nicht verwundern kann, dass in der Schulpädagogik darauf bislang keine Rücksicht genommen werden konnte. Stirnhirnfunktionen werden durch das Einüben von Planungs- und Reflexionsstrukturen im Unterricht gefordert. Die Lernenden sollten die Ziele der nächsten Unterrichtseinheiten gemeinsam entwickeln und am Ende das gewählte Vorgehen reflektieren. So können die in der Interaktion mit dem reifenden Stirnhirn realisierten Funktionen, wie zum Beispiel Strategiebildung, Zeitplanung, Antizipation von Problemen etc., in aktivitätsgesteuerten Reorganisationsprozessen strukturell verankert werden, um so auch in anderen Lebenssituationen abrufbar zu sein.

In diesem Zusammenhang wird auch in den Unterrichtseinheiten das inhaltliche und methodische Vorgehen innerhalb der Lerngruppe geplant. Insbesondere die Workshops zum Thema „Wie lernt das Gehirn?“ werden von den Schülern eigenständig strukturiert und reflektiert.

Der neurodidaktische Ansatz liefert somit insbesondere dem naturwissenschaftlich-mathematisch disponierten Lehrer einen Zugang zu modernen pädagogischen Methoden. Durch die Gewohnheit, nur zu glauben was zu beobachten ist, werden nach meiner Erfahrung zukunftsweisende pädagogische Ansätze von naturwissenschaftlichen Kollegen oft als ‚Kinderspielerei‘ abqualifiziert. Auch hier wird die Bedeutung eines konkreten experimentellen Zugangs für die didaktischen Ausführungen deutlich. Denn nur wenn die strukturellen Veränderungen sichtbar werden, ist eine höhere Akzeptanz auch für theoretische Konzepte zu erreichen.

Ein weiterer Vorteil des neurodidaktischen Konzeptes ist es, dass es aufgrund einer wachsenden Akzeptanz neuer Verbindlichkeiten dem Lehrer eine

höhere Planungssicherheit für seinen Unterricht bietet: Wenn die Prinzipien der strukturgebenden Prozesse im Gehirn bekannt sind, fällt eine Auswahl aus der Flut von Konzepten und konkreten Methoden leichter, die der Lernsituation und der Lehrerpersönlichkeit angemessen entsprechen können.

Durch die im Folgenden darzustellenden Unterrichtseinheiten sollen Schüler in die neurobiologischen Grundlagen des LERNENS eingeführt werden, indem sie die neurobiologischen Lerninhalte mit neurodidaktischen Methoden erarbeiten. Dieses Vorgehen wird am Ende der Unterrichtsreihen zur Neurobiologie reflektiert, so dass ein Transfer auf andere Themengebiete und Unterrichtsfächer möglich ist. Die Workshops tragen zur Übertragbarkeit wie zum Beispiel auf die Mathematik bei, einer Disziplin in der konkrete Anwendungen des Gelernten von den Schülern gefordert werden sollen (vgl. Kapitel 5.5).

Den thematischen Zusammenhang zwischen den exemplarisch ausgewählten Elementen aus dem Unterricht bilden die Verarbeitungsstrategien der Hemisphären im menschlichen Gehirn. An komplexen und seriellen Verarbeitungsstrategien soll aufgezeigt werden, wie die am Beispiel des PFC von Gerbils nachgezeichneten Reorganisationsprozesse der interhemisphärischen Verschaltung für den Unterricht nutzbar gemacht werden können. Dazu wird die Zuordnung der Hemisphären zu den Schüleraufgaben bewusst vereinfacht dargestellt was zu Diskussionen Anlass bieten soll. Folgende grundlegende *methodische Aspekte* werden konkretisiert:

- Das **bewusste progressive Üben** von Kommunikationsstrukturen zur Verstärkung interhemisphärischer Rückkopplungsschleifen beim Sprachgebrauch (vgl. Kapitel 5.3.1).
- Die **Gestaltung von Arbeitsmaterialien** zur Unterstützung des Einübens von Kommunikationsstrukturen zwischen beiden Hemisphären (vgl. Kapitel 5.3.2).
- Das **Verwenden von graphischen Elementen** (Abbildungen, Animationen, etc.) zur Aktivierung rechtshemisphärischer Fähigkeiten (vgl. Kapitel 5.3.3)

- Das Einüben des interhemisphärischen Abgleichs durch die **sprachliche Umsetzung visueller Information** (vgl. Kapitel 5.3.4).
- Das **problemlösende Denken** vor dem Hintergrund der Schlüsselfunktionen beider Hemisphären (vgl. Kapitel 5.3.5).

Die Unterrichtseinheiten zur Neurobiologie des LERNENS beinhalten folgende *didaktische Schwerpunkte*:

- Die **Entwicklung eines Lernmodells im Unterricht**, an dem die Schüler ihre individuellen Lernstrategien und Dispositionen für Verarbeitungsstrategien reflektieren können (vgl. Kapitel 5.4).
- Die **Planung von Workshops** vor dem Hintergrund von Stirnhirnfunktionen (z.B. zeitliches Disponieren, Antizipation von Lernschwierigkeiten bei anderen Lerngruppen etc., vgl. Kapitel 5.5).

5.2 Zur Umsetzung der neurodidaktischen Prinzipien

Am Leo-Symphor-Berufskolleg werden Erzieher ausgebildet, die als Zweitqualifikation die allgemeine Hochschulreife erwerben. Für sie bildet der Leistungskurs Biologie einen idealen Rahmen, Konzepte zu evaluieren, die LERNEN unter den Aspekten der lateralisierten Verarbeitungsstrategien und den dynamischen neuroplastischen Prozessen des reifenden Stirnhirns (PFC) beleuchten. Bei der Erforschung von Reifungsprozessen im Rahmen der Lateralisierung des Stirnhirns hat die Biocitinstudie bei Wüstenrennmäusen nach Intervention (Pharmakologie- und Environment-Modell) gezeigt, dass Umweltfaktoren einen entscheidenden Einfluss auf die Reifung von Verschaltungen zwischen beiden Hemisphären und speziell auch im PFC während der frühkindlichen Reifung nehmen.

Die durch die Umwelt aktivierbare Reifung von Verschaltungsprozessen ist prinzipiell so auch für den Menschen gegeben. So existiert im menschlichen Kortex bis zur Pubertät eine **kritische Phase** zur Lateralisierung von Hemisphärenfunktionen, in der eine Öffnung des Gehirns für spezielle Angebote

zur ausgewogenen Entwicklung lateralisierte Funktionen erfolgt (vgl. Springer und Deutsch, 1998). Erzieher sollten ab dem Kindergartenalter in eine sinnvolle Strukturierung der Verarbeitungsstrategien beider Hemisphären eingreifen. Außerdem existiert eine **kritische Phase** für die Stirnhirnreifung, die bei Nagern und dem Menschen bis über die Geschlechtsreife hinaus anhält und beim Menschen erst ab dem Alter von etwa 18 Jahren abgeschlossen ist (rev. in Krasnegor; Lyon und Golman-Rakic, 1997). Diese kritische Phase will für die Strukturierung von Sozialverhalten, historischem Bewusstsein, Ich-Bewusstsein etc. genutzt werden, was sich zusammengefasst auf die gesamte Persönlichkeitsentwicklung auswirkt (s. auch Abbildung 5.11).

Es werden im Folgenden Unterrichtseinheiten vorgestellt, an denen exemplarisch neurodidaktische Prinzipien konkretisiert werden sollen. Es wird aufgezeigt, wie Unterrichtsmaterialien und –methoden die spezifischen Fähigkeiten der Hemisphären und deren Interaktion zum Beispiel durch das bewusste Einüben von Kommunikationsstrukturen unterstützen können. Wichtiges Prinzip der Unterrichtseinheiten ist es, dass das Thema LERNEN durch die neurobiologischen Inhalte *und* die neurodidaktischen Methoden dem Lernenden vermittelt wird. Durch die Partizipation der Schüler an der Planung von Unterrichtsinhalten und Vorgehensweisen werden gezielt Stirnhirnfunktionen angesprochen, die es den Lernenden ermöglichen sollen, Problemstellungen zu antizipieren und Planungen vorzunehmen. Die Teilnehmer des Leistungskurses Biologie sollen auf der sozial-affektiven Kompetenzebene für verschiedene Lerndispositionen sensibilisiert werden, die größtenteils auf individuellen Hemisphärenpräferenzen beruhen. Dabei stehen nicht nur die oben erwähnten beruflichen Bezüge im Vordergrund, sondern auch die Reflexion des eigenen Lernverhaltens. In integrierten Workshops wird das Gelernte anhand konkreter Lerntipps einer anderen Lerngruppe vermittelt.

5.3 Methoden und Materialien in einem neurodidaktischen Unterrichtskonzept

5.3.1 Bewusstes Üben von Kommunikationsstrukturen

Bei der Vorbereitung der Unterrichtseinheiten ist darauf geachtet worden, dass das selbstorganisierende Prinzip des Gehirns auch in der Erarbeitung der Unterrichtsinhalte durch die intensive Kommunikation in der Lerngruppe gewährleistet wird. Hierbei kam das Prinzip „*Lernen durch Lehren* (LDL)“ (vgl. Martin, 2002) möglichst oft zur Anwendung und mündete in vier von den Schülern selber konzipierten Workshops ein. Um das Prinzip LdL vorzubereiten, muss neben der inhaltlichen die methodische Progression parallel ablaufen. Das heißt, die Kommunikationsstruktur in der Lerngruppe soll von der Partnerarbeit bis zur Moderation von Workshops systematisch geübt werden. Bei der Erarbeitung von Inhalten ist es selbstverständlich, dass der einfache Schritt vor dem nächst schwierigeren kommt. Aber auch bei den methodischen Überlegungen setzt sich mehr und mehr die Einsicht durch, dass auch methodische Aspekte strukturierter geübt werden müssen. An dieser Stelle kann der Sinn eines solchen Vorgehens noch einmal mit neurodidaktischen Prinzipien vor dem Hintergrund lateralisierter Kortexfunktionen begründet werden. Denn gerade die asymmetrisch verarbeiteten Gehirnfunktionen steuern die kognitiven Prozesse, die unsere Schule zu aktivieren versucht. Weiterhin sollten die Stirnhirnfunktionen durch reflektiertes Arbeiten angeregt werden. Damit entscheidet sich, ob ein Lerninhalt dauerhaft im Arbeitsgedächtnis erhalten bleibt oder nicht (vgl. Kapitel 1.3.4 und Förstle, 2002).

Bei den methodischen Schritten zum Einüben von Kommunikationsstrukturen werden zwei wichtige Prinzipien der neuronalen Verarbeitung integriert: (1) der hierarchische Aufbau von Hirnfunktionen (vom Nervennetz bis zum Kortex) und (2) die integrierenden Rückkopplungsschleifen (vgl. Abbildung 5.1). So liefern die Gehirnfunktionen selbst die Vorlage für das methodische Vorgehen zum erfolgreichen LERNEN. Das neuronale Prinzip beruht darauf, auf allen Ebenen der Verarbeitung rückkoppelnd zu arbeiten - der Ebene

von Synapsen und Neuronen (=Individuum), der Ebene von Nervennetzen (=kleinen Gruppen) bis hin zu systemischen Ebenen der Hemisphären (=Lehrer und Gruppeninteraktionen). Immer werden aktivitätsbedingte Bezüge adaptiv strukturiert und funktionalisiert.

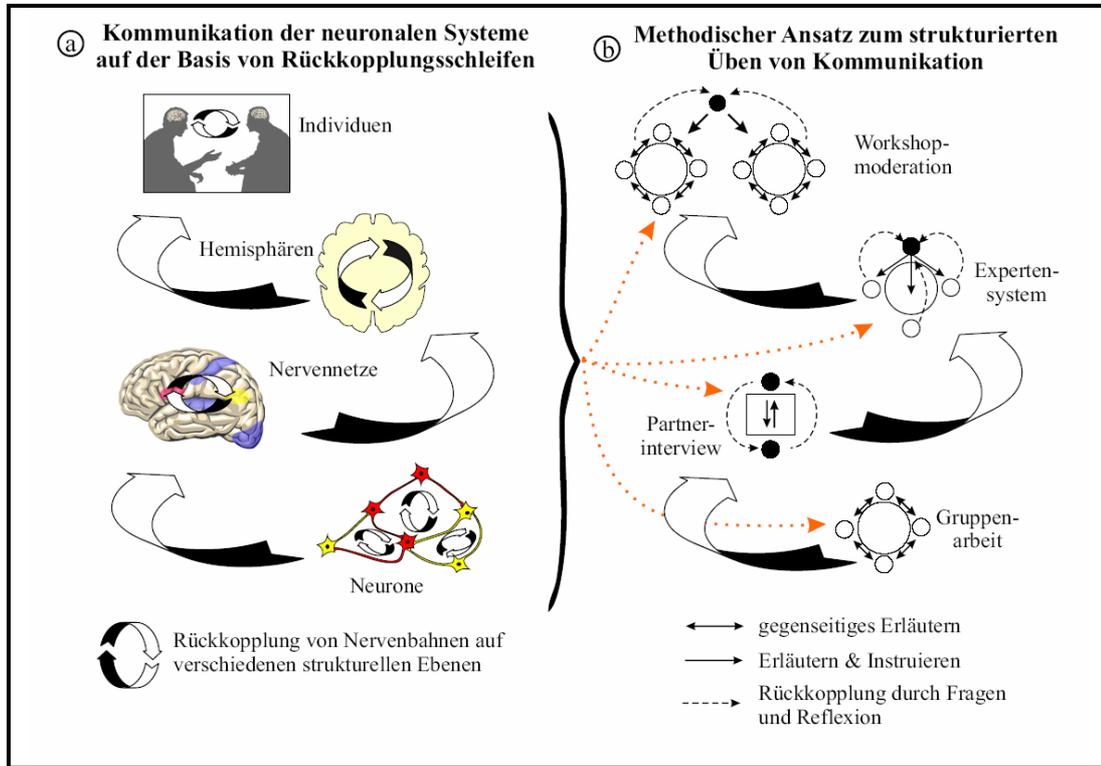


Abbildung 5.1

Hierarchische Organisation von Kommunikationsstrukturen in neuronalen Systemen (a) und in der methodischen Konzeption der Unterrichtsreihen (b) unter besonderer Berücksichtigung des Prinzips der Kommunikation durch Rückkopplung. Die rote Pfeile symbolisieren, dass die links dargestellten Prozesse in jeder der abgebildeten Unterrichtsformen beim Erklären ablaufen.

Die Abbildung 5.1 (b) zeigt die methodische Umsetzung diese neuronalen Prinzips. Dabei bildet die Rückkopplung innerhalb einer Lerngruppe die Grundlage, da die oben beschriebenen Prozesse immer einsetzen, wenn ein Sachverhalt zwischen den Teilnehmern erläutert wird (symbolisiert durch die roten Pfeile). Die Mitglieder einer Gruppe erklären sich gegenseitig den Unterrichtsinhalt. Beim Partnerinterview verfügen beide Partner über eigenständige Informationen, die gegenseitig erläutert werden. Der Erfolg der Erläuterungen wird sofort durch Rückfragen oder reflektierende Zusammenfassungen des Partners gespiegelt. Im Expertensystem ist die

Lernsituation für die erläuternde Person komplexer, so dass er auf verschiedene Rückfragen reagieren muss. Bei der Moderation von Workshops ist noch einmal eine Komplexitätssteigerung beim Erläutern gegeben, da auf die verschiedenen Lernebenen der Mitglieder eingegangen werden muss. Da die Experten und Moderatoren sich abwechseln, ist ein Lernerfolg der gesamten Lerngruppe gewährleistet. Durch die komplexer werdenden Kommunikationsstrukturen erhalten die Schüler schrittweise mehr Sicherheit beim Vortragen und werden so an das Prinzip *Lernen durch Lehren* herangeführt.

5.3.2 Prinzipien für die Arbeitsmaterialgestaltung

Ausgangspunkt der eigenständigen Erarbeitung auf der Basis selbstorganisierender Lernprozesse sind Arbeitsmaterialien, die Verarbeitungsstrategien beider Hemisphären aktivieren und zur Kommunikation anregen sollen. Die verwendeten Arbeitsmaterialien sind deshalb selbst gestaltet und beziehen sich unter anderem auf konkrete Forschungsergebnisse der neurobiologischen Abteilung der Universität Bielefeld. Sie sind nach Prinzipien erstellt, die das neurodidaktische Konzept unterstützen sollen:

- Das Material enthält konkrete Beobachtungsaufgaben. Diese Beobachtungen bilden die Grundlage für die fachgebundene Diskussion in den Kleingruppen.
- Die Gruppenarbeiten sind arbeitsteilig organisiert, so dass dem jeweiligen Partner echte Neuigkeiten berichtet werden und somit keine Redundanzen auftreten.
- Der Anforderungsbereich des problemlösenden Denkens wird immer einbezogen, so dass mindestens ein Lösungsschritt aus den Kombinationen der Schüler erfolgt. Mit diesem Anspruch sollen Denkstrategien eingeübt werden, die auf komplex organisierten -im Modell der Hirnasymmetrie also rechthemisphärischen- Schaltkreisen beruhen.
- In den Materialien werden verschiedene Eingangskanäle und Verarbeitungsstrategien angesprochen. Insbesondere wird auf den interhemisphärischen Abgleich der Informationen via Corpus Callosum

geachtet. So sollen zum Beispiel komplexe Informationen aus Diagrammen in die lineare Verarbeitung der Sprache gebracht werden. Auch umgekehrt sollen textliche Informationen in schematische Skizzen übermittelt werden.

An dieser Stelle werden vielleicht einige Pädagogen sagen, dass diese Prinzipien keine neuen Erkenntnisse darstellen. Deswegen sie kurz darauf hingewiesen, dass hier auch keine neuen pädagogischen Methoden entwickelt werden sollen. Vielmehr wird auf die neurobiologische Wirkung für das LERNEN hingewiesen, was erlaubt, asymmetrische Verarbeitung von Informationen bewusster zu reflektieren. Die neurobiologische Erkenntnis ist, dass es durch das Bewusstwerden zu einer Selbstverstärkung der in den Lernprozess einbezogenen bahnenden Schaltkreise kommt.

5.3.3 Der Einsatz von Graphiken und Animationen

Die Ansprache der rechten Hemisphäre und die Dominanz der assoziativen Sehrindfelder werden im sprachlich orientierten Unterricht oft erheblich vernachlässigt. Deshalb beinhalten die Arbeitsmaterialien einen konsequenten Einsatz von Graphiken und Videosequenzen, die komplexe Verarbeitungsstrategien der rechten Hemisphäre einschließlich der Sehrinde ansprechen sollen. Bei der Erarbeitung von naturwissenschaftlichen Lerninhalten sind insbesondere lineare und räumliche Strukturen gemeinsam gefordert. Hierdurch findet -neurobiologisch ausgedrückt- eine Verstärkung der interhemisphärischen Verschaltungen durch aktivitätsgesteuerte Reorganisationsprozesse statt.

Am Beispiel der Aufnahme, Verarbeitung und Weiterleitung von Reizen in einem neuronalen System soll exemplarisch dargestellt werden, wie dabei der Einsatz von Symbolfarben den Lernerfolg erleichtert. Schon am Anfang der Unterrichtsreihe wird anhand einer Schemazeichnung zur Cytologie einer Nervenzelle die Farbgebung eingeführt. Die Nervenzelle wird in drei funktionelle Einheiten unterteilt. (vgl. Abbildung 5.2) Diese Einheiten und ihre farbliche Kennzeichnung finden sich bei der Erarbeitung von reduzierten

Schaltdiagrammen im Kortex oder bei der Verknüpfung von sensorischen und motorischen Rindenfeldern wieder (vgl. Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4).

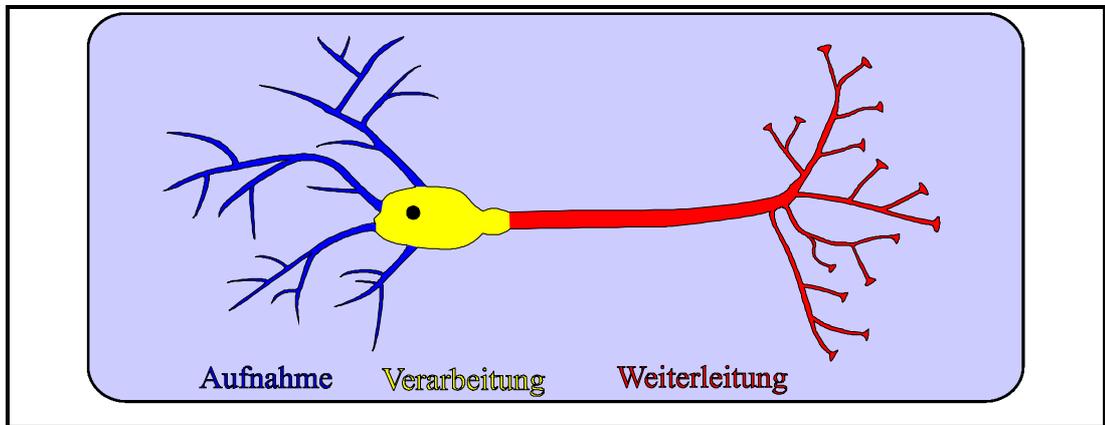


Abbildung 5.2

Schematische Darstellung einer Nervenzelle (stark vereinfacht): Dendrit = Aufnahme von Reizen (blau); Soma = Verarbeitung von Reizen (gelb); Axon = Weiterleitung von Reizen

Mit den anatomischen Zusammenhängen werden auch die Histologie und Einteilung der Kortexareale erarbeitet. Sowohl beim Verschaltungsmodell des Kortex (Abbildung 5.3), als auch bei den sensorischen und motorischen Rindenfeldern (Abbildung 5.4) wird die bei der Cyotologie eingeführte Farbgebung wieder aufgegriffen. Die gleiche Farbgebung erleichtert die Orientierung und stellt gleiche Verarbeitungsstrategien auf systemischer Ebene heraus.

Die Kenntnisse zur Organisation der Kortexrinde sind eine entscheidende Voraussetzung für die Erarbeitung der Hemisphärenfunktionen, da die Projektionsneurone der Lamina III und V den größten Teil der Axone im Callosum stellen. Die Lage der Rindenareale finden sich rechts- und linkshemisphärisch wieder. In ihnen werden allerdings verschiedene Funktionen verarbeitet, wie das Beispiel der Prosodie zeigt. (vgl. Kandel 1996 und Kapitel 5.4). So ist der Lerninhalt für die Vorbereitung auf die Eigenreflexion des Lernverhaltens am Ende der zweiten Unterrichtsreihe unverzichtbar.

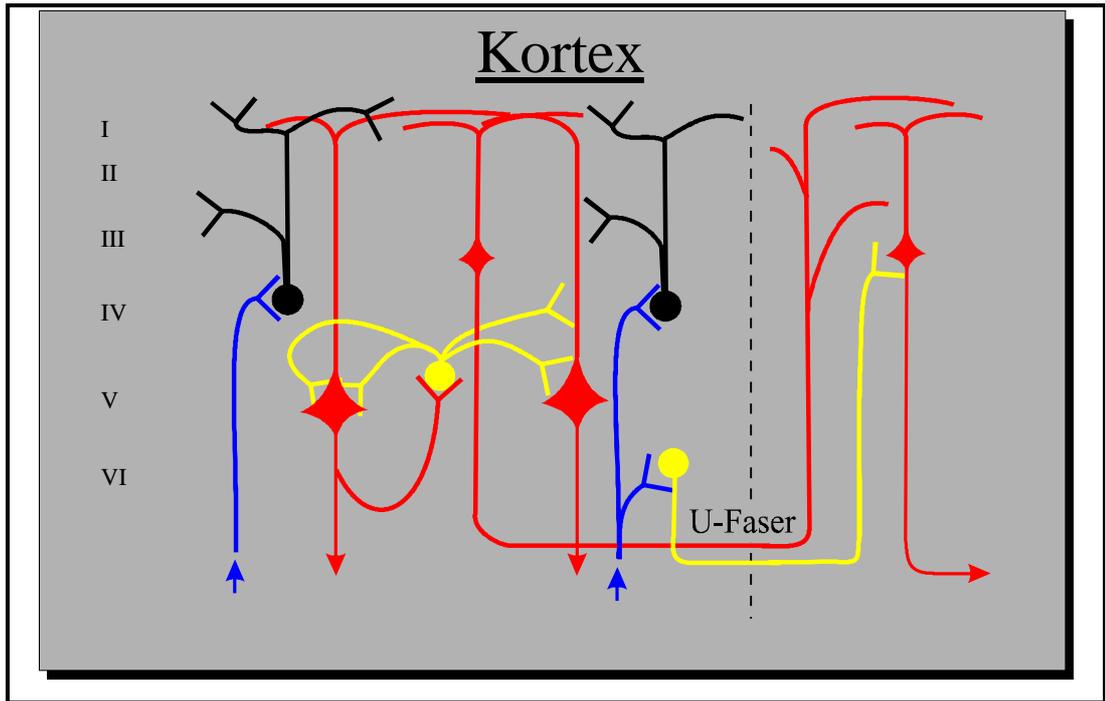


Abbildung 5.3

Schematische Darstellung der Verschaltung der Großhirnrinde (stark vereinfachte):

Blau: thalamische Afferenzen (Eingang der Reize);

Gelb: Inhibitorische Interneuronen für die Verarbeitung der Reize;

Rot: Pyramidenzellen bilden die einzigen Efferenzen (Ausgabe) des Kortex;

Schwarz: Körnerzellen der Lamina IV, an denen thalamische Afferenzen verschaltet werden;

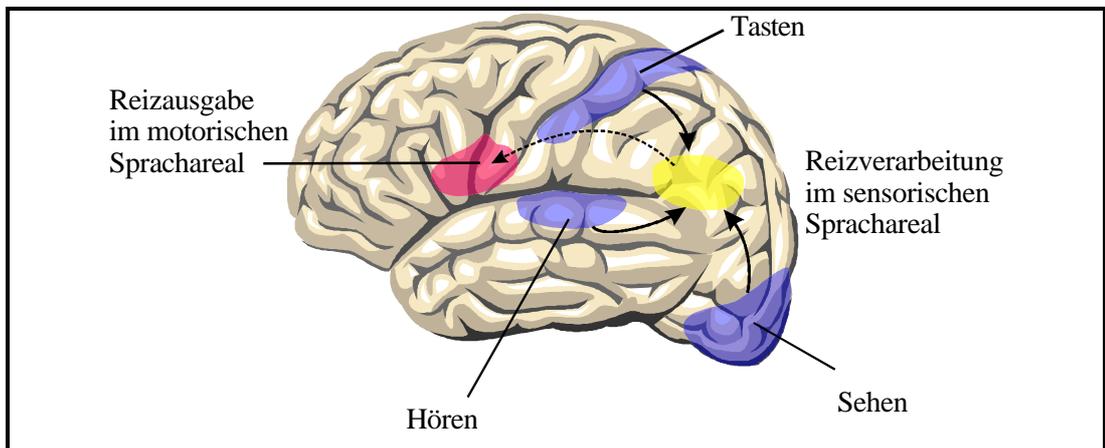


Abbildung 5.4:

Verarbeitung der Sprache auf der linken Hemisphäre: Die sensorischen, blauen Areale nehmen die Reize auf, die von dem sensorischen Sprachareal (Wernicke-Areal gelb) verarbeitet werden und vom motorischen Sprachzentrum Broca-Areal, rot) in Sprache umgesetzt werden.

5.3.4 Sprachliche und visuelle Informationsverarbeitung

Eine entscheidende Rolle für das Verständnis von neuroplastischen Prozessen spielen die Funktionen von hemmenden und erregenden Synapsen. Anhand der exemplarisch ausgewählten Transmitter Acetylcholin und GABA werden die Wirkungssektoren auf die postsynaptische Membran erarbeitet. Dabei wird die Wirkung von GABA auf die Steuerung des Cl⁻-Kanals didaktisch reduziert und die hoch komplexen enzymatischen Prozesse werden vernachlässigt.

Die geforderte Informationsverarbeitung in den Arbeitsblättern zu dieser Unterrichteinheit zeigt beispielhaft, wie sich die Verarbeitungsstrategien der beiden Hemisphären in den Unterrichtsprozess einbinden lassen. Mit den Arbeitsblättern soll das Schematisieren von sprachlichen Informationen beim Erstellen einer Graphik geübt werden. Die Ansprache beider Hemisphären bedingt die Interaktion von sequenziellen und komplexen Verarbeitungsstrategien. Abbildung 5.5 zeigt am Beispiel des Arbeitsblattes zur Acetylcholinsynapse, wie die linear aufgebaute Sprachinformation schematisch veranschaulicht werden soll, so dass die Informationen ‚auf einen Blick‘, das heißt in ihrer Komplexität, erkannt werden können. Den Schüler soll durch das einfach zu strukturierende Schema bewusst werden, welche Inhalte der Infotext aus dem Arbeitsblatt enthält und wie diese Inhalte möglichst detailliert in graphische Elemente umgesetzt werden können. Diese rechtshemisphärisch einzuübenden Fähigkeiten werden später beim Visualisieren komplexerer Sachverhalte und beim Dekodieren von schematisierten Modellvorstellungen genutzt.

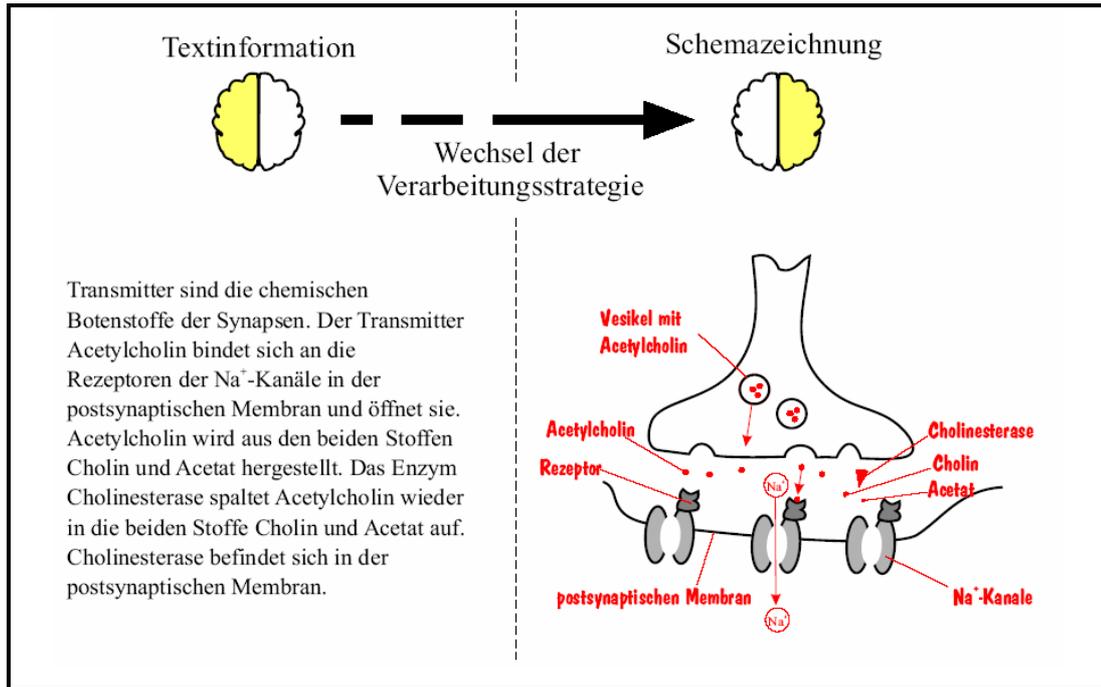


Abbildung 5.5

Umsetzung von Textinformation in ein Schema am Beispiel des Transmitters Acetylcholin mit dem Infotext aus dem Arbeitsblatt (links) und der möglichen schematischen Umsetzung (rechts, schwarz: vorgegebende Strukturen, rot: in der Arbeitsphase zu ergänzende Elemente). Das Arbeitsblatt zur GABA-Synapse ist genauso aufgebaut.

So erstellen zwei Schülergruppen Schemazeichnungen zu der Wirkung von Acetylcholin bzw. GABA. Diese werden zum Einüben der Lern- und Kommunikationsstrukturen im Partnerinterview gegenseitig vorgestellt. Auch hier setzt der Abgleich von informationsverarbeitenden Systemen über das Corpus Callosum ein. Denn die Kursteilnehmer müssen die Inhalte wieder in einen linearen Kontext bringen und dem Partner vorstellen. Eigene Verständnisschwierigkeiten werden dabei durch Rückfragen des Partners aufgedeckt und müssen neu reflektiert werden. Das konsequente Einfordern des Erläuterns von Sachverhalten bewirkt neurobiologisch eine Bahnung serieller Schaltkreise, die dann auch in abstrakteren Kontexten genutzt werden können. So bereitet die Kommunikationsform des Partnerinterviews nicht nur auf das Vortragen vor Kleingruppen oder das Moderieren der Workshops vor, sondern hilft auch, Verarbeitungssysteme der linken Hemisphäre zu etablieren, die zum Beispiel das Verfassen von Texten in Klausuren erleichtern. Auch hier ist ein

sequenzielles Bearbeiten von Informationen notwendig, da im Gehirn vernetzt gespeicherte Assoziationen in eine sprachliche Gliederung gebracht werden müssen. Unter neurodidaktischen Gesichtspunkten ist die eigene Darstellung der erworbenen Information also erforderlich, da durch die motorischen Rückkopplungsschleifen der Sprache die seriellen Schaltkreise immer wieder genutzt werden und so Sinn gebende Verknüpfungen mit den individuellen Vorinformationen entstehen (= Prinzip der aktivitätsgesteuerten Anpassung von neuronalen Schaltkreisen).

5.3.5 ‚Problemlösendes Denken‘ - eine neurophysiologische Leistung beider Hemisphären

Abgeschlossen wird die neurophysiologische Vorbereitung mit dem Thema der Verarbeitung von Reizen an der Reiz perzipierenden Oberfläche des Zellsomas durch die räumliche und zeitliche Summation. Damit bekommen die Lernenden einen ersten Einblick in die Wirkung von hemmenden und erregenden Synapsen und die Ideen der Kompensationstheorie können so vorbereitet werden. Insbesondere bei dem Verständnis der Informationsverarbeitung über das Corpus Callosum sind Einsichten in die Zusammenarbeit von erregenden und hemmenden Synapsen entscheidend, da die callosalen Axone durch Hemmung auf die andere Gehirnhälfte modellierend einwirken (vgl. Colwyn, 1974 and Doty, 1969).

Methodischer Schwerpunkt in dieser Unterrichtseinheit ist es, das ‚problemlösende Denken‘ anzustoßen. Dazu müssen neue Informationen mit gelernten in Verbindung gebracht werden. Die Kombination der Informationen soll zu der Einsicht führen, dass sich die Potenziale verschiedener Synapsen über das Zellsoma summieren und über das Axon zu einer gemeinsamen frequenzcodierten Reizweiterleitung führen.

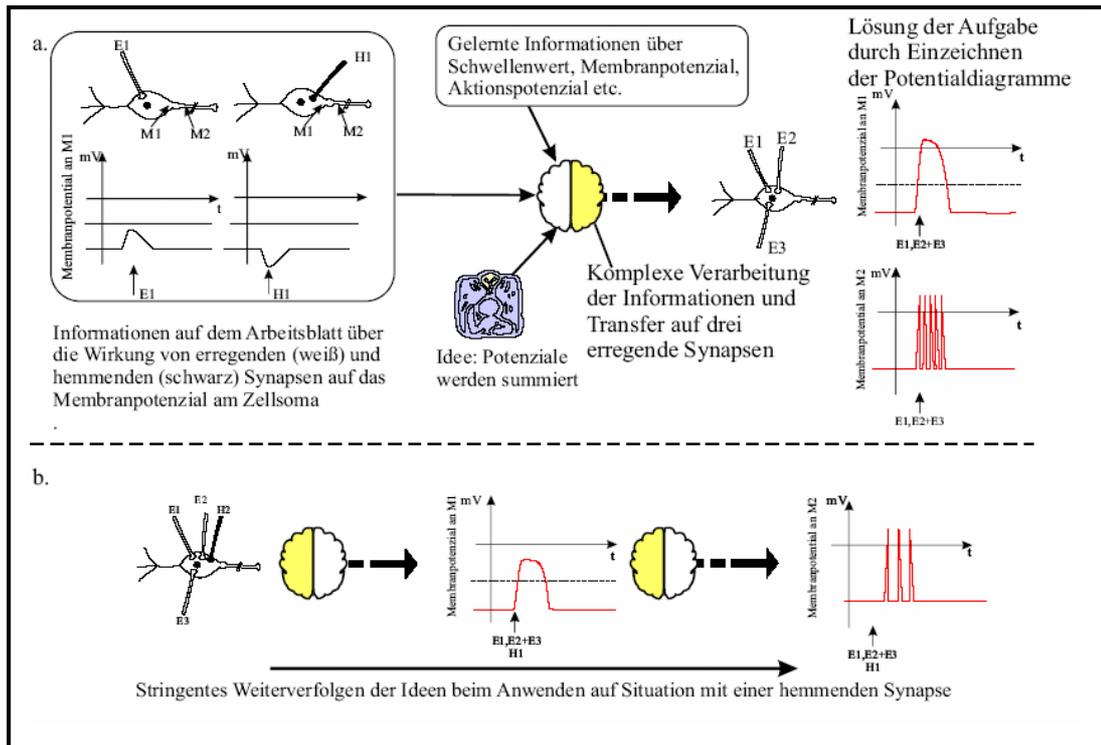


Abbildung 5.6

Modellhafte Darstellung des Lösungsprozesses der Aufgabe zu dieser Unterrichtseinheit bei der Generation der Lösungsideen (rechthemisphärisch, a) und ihrer stringenten Anwendung auf eine neue Situation (linkshemisphärisch, b). Die erwarteten Schülerlösungen sind rot eingezeichnet (Aufgabe entwickelt nach Campbell, 2000).

Die Erarbeitung verläuft in vier Gruppenarbeiten, in denen verschiedene Konstellationen von hemmenden und erregenden Synapsen am Zellsoma simuliert werden. Dabei wird die Transmitterwirkung auf das Membranpotenzial des Zellsoma modellhaft dargestellt. Die Schüler müssen entscheiden, ob und in welcher Frequenz auf dem Axon Aktionspotenziale ausgelöst werden und die entsprechenden Diagramme der Potenzialableitungen einzeichnen (in Abbildung 5.6 rot gekennzeichnet). Die räumliche und zeitliche Anordnung der hemmenden und erregenden Reize unterscheidet sich von Gruppe zu Gruppe. Aus den vorgegebenen Informationen, wie eine Synapse mit GABA bzw. Acetylcholin auf die Membran am Zellsoma wirkt, muss die Aktionspotenzialfrequenz am Axon gefolgert werden (vgl. Abbildung 5.6). Hier wird eine weitere rechthemisphärische Fähigkeit eingefordert. Die Vorinformationen aus dem Arbeitsblatt müssen mit den gelernten Informationen zum Schwellenwert des Auslösens von Aktionspotenzialen kombiniert werden. Dieses entspricht einer

komplexen Aufgabenstellung für die parallelen Schaltkreise der rechten Hemisphäre, da mehrere Informationen zum Lösen herangezogen werden müssen. Allerdings sind auch lineare Prozesse der linken Hemisphäre gefordert, da die entwickelten Lösungsansätze stringent umgesetzt werden müssen. Ein Beispiel für das Weiterführen von Gedankengängen ist die Erkenntnis, dass ein gehemmtes Membranpotenzial an Messpunkt 1 zu einer niedrigeren Frequenz von Aktionspotenzialen am Messpunkt 2 führt (vgl. Abbildung 5.6, unten).

Wie dieses Beispiel zeigt, ist das ‚problemlösende Denken‘ keine singuläre Funktion einer Hemisphäre, sondern erfordert die gute Koordination beider Gehirnhälften. Für die Schulung der rechten Hemisphäre sind Aufgabentypen wichtig, in denen mehrere Faktoren zur Lösung zu berücksichtigen sind. Denn aktivitätsgesteuerte Umbauprozesse von Nervennetzen zeigen, dass auch parallel arbeitende Nervenbahnen durch die direkte Ansprache mit komplexen Aufgabenstellungen ausgebaut werden müssen. Hier offenbaren die neurobiologischen Erkenntnisse, dass es nicht ausreicht, die Ideenproduktion zur Lösung der Aufgabe im gemeinsamen Klassenunterricht zu erarbeiten, um dann den Schülern lineare Übungsprozesse in Gruppen- oder Einzelarbeit zu überlassen. Vielmehr sind hier Angebote zu konzipieren, die für jedes Mitglied der Lerngruppe die Ideenproduktion einfordert. Lernschwierigkeiten in individuellen Sozialformen können durch Binnendifferenzierung und Lernhilfen antizipiert werden. Im konkreten Beispiel der Reizsummation wird die Komplexität der Synapsenkombinationen variiert, so dass die Schüler nach ihrem individuellen Leistungsniveau arbeiten können. Aus unserer Arbeitsgruppe in der Universität Bielefeld ist soeben ein Beitrag erschienen, der neurophysiologische Zusammenhänge zum Thema ‚Lernen durch Lehren‘ (LdL) ausführlich darstellt (Butz und Teuchert-Noodt, 2006).

5.4 Lernen auf der Ebene von Nervennetzen als Unterrichtsinhalt

5.4.1 „Hebb’s Cell assembling“ als vorläufiges Lernmodell

Für die Entwicklung eines Verständnisses für das LERNEN und speziell den Ausbau serieller und paralleler Verschaltungsmuster zur besseren Nutzung beider Hemisphären ist das Bewusstmachen der „aktivitätsgesteuerten Synaptogenese“ als Grundlage für die Verknüpfung von Nervennetzen ein wichtiges Lernziel. Das klingt in den vorangegangenen Ausführungen zwar immer wieder an, soll hier aber neurobiologisch von den Schülern erarbeitet werden.

Da die Ausprägung von Schaltkreisen in den Hemisphären ein sehr abstrakter Vorgang ist, wird die „aktivitätsgesteuerte Synaptogenese“ zunächst anhand der Verknüpfungen in den Rindenfeldern nach Hebb (1949) eingeführt. Ausgehend von den primären sensorischen Sinnesfeldern, in denen die Reize aus den Sinnesorganen zuerst die Gehirnrinde erreichen, werden die assoziativen Rindenfelder thematisiert, in denen das Verknüpfen der Neurone im Rahmen von Reorganisationsprozessen zur Speicherung von Informationen führt. So könnte man sagen, dass alles LERNEN assoziativ ist. Wenn ein Mensch sich einen Apfel vorstellt, erinnert er sich beispielsweise auch gleichzeitig an den Geruch, einen Apfelbaum etc. An Abbildung 5.4 kann bildlich nachvollzogen werden, wie es zu der Verknüpfung verschiedener Sinneskanäle kommt. Im Zentrum dieser Assoziationsfelder liegt der höchste Integrationsbereich, das sensorische Sprachzentrum, in dem die Informationen zur Generierung von Sprache vorbereitet werden.

Parallel zu der Organisation der Rindenfelder wird die neurocytologische Ebene beim Verknüpfen von Nervenzellen thematisiert. So wird in einer anderen Gruppenarbeit die „aktivitätsgesteuerte Synaptogenese“ nach Hebb (1949) erarbeitet. Zwei Aspekte werden dabei herausgehoben. Nach Hebb (1949) werden neue Synapsen zwischen den Neuronen gebildet. Diese Neubildung funktioniert nur bei einer Aktivierung von mehreren Neuronengruppen gleichzeitig.

Exkurs 5.1: Synaptogenese nach Hebb

Donald O. Hebb beschrieb 1948 die Speicherung von Informationen als das Erstellen von Verbindungen zwischen den Neuronen. In seinen Ausführungen zum „cell assembly“ stellt Hebb theoretische Überlegungen an den Anfang seiner Studie. Er beschreibt die Gedächtnisbildung in einem zweistufigen Modell, das auf die Interaktion der Neuronen Wert legt. Die wichtigste Komponente ist die Rückkopplung der assoziativen Nervenzellen. Hebb geht davon aus, dass durch eine lineare Anordnung von Neuronen keine Speicherung von Reizmustern möglich ist. Erst wenn mehrere Reize gleichzeitig auf ein Neuron einwirken, und diese durch eine Schleife rückgekoppelt werden, kann sich ein Reizmuster stabilisieren. In der ersten Stufe sind die Informationen in Form von elektrischen Strömen gespeichert (=Reflexionskreislauf), dieser Kreislauf ist durch physikalische Einflüsse sehr instabil. Durch häufiges Wiederholen der Reize entsteht die zweite Stufe: Die strukturelle Veränderung der Verbindung. Werden Reize nicht verstärkt (z.B. durch Wiederholung und / oder Gleichzeitigkeit des Einwirkens), oder sind sie zu schwach, die erste Stufe zu überwinden, kann eine dauerhafte Speicherung durch strukturelle Veränderung nicht stattfinden.

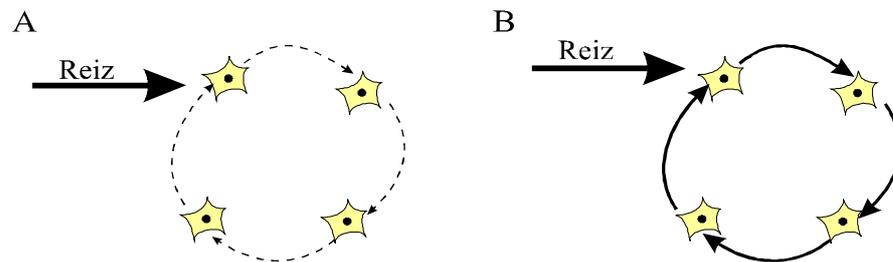


Abbildung 5.7

Schematische Darstellung des Reflexionskreislaufes mit labilen excitatorischen Reizen (A) und der durch Bahnung stabilisierten Bildung von synaptischen Verbindungen (B).

Für den Unterricht in der Schule wurden die Abbildungen zugänglicher gestaltet, so dass sie die Aktivierung der Neuronenkreise durch Farben kennzeichnen können. Organisatorisch werden wieder zwei Gruppen gebildet. Die eine Gruppe beschäftigt sich mit der Verarbeitung und Speicherung von Informationen in primären, sekundären und assoziativen Sinnesfeldern, die andere mit der Verknüpfung der Nervenzellen durch die aktivitätsgesteuerte Synaptogenese. Im Partnerinterview werden die beiden Themenkomplexe wieder zusammengeführt, sodass auch eine thematische Einheit gebildet werden kann.

In der abschließenden Besprechung im Plenum sollten die *modernen Erkenntnisse der Plastizitätsforschung* zum Tragen kommen. Hebb hat zwar die grundlegenden Prinzipien der Verknüpfungen von reifenden Nervennetzen gelegt, aber erst **nach** ihm hat die neurobiologische Plastizitätsforschung darauf aufbauende Prozesse der synaptischen Selbstverstärkung durch Langzeitpotenzierung entdeckt (Kandel, 1996), sowie die Umorganisation von Nervennetzen (=Reorganisation, Wolff et al., 1984) beschrieben, was das LERNEN in Nervennetzen in ein ganz neues Licht versetzt und das ehemalige „Trichter-Prinzip“ endgültig zum Scheitern verurteilt. Vorbereitend sollten die angehenden Erzieher dafür sensibilisiert werden. So gilt es herauszustellen, dass nach herkömmlicher Vorstellung mit dem LERNEN ein Wachsen der Synapsen und Fasersysteme und somit eine Zunahme des Gehirnvolumens einhergehen müsste. Solches trifft aber lediglich im postnatalen Gehirn zu, nicht jedoch für das LERNEN im Jugend- und Erwachsenenalter. Dieser Widerspruch gibt Anlass zu einer Problemstellung, die auf den Umbau von Nervennetzen hinarbeitet. Im Lernenden kann so eine Neugierde für die grenzenlose Lernbegabung des menschlichen Gehirns vermittelt werden. Konkret ist das bei den Schülern wachsende Bewusstsein wichtig, dass nur aus vorherigen Schaltungen neue entstehen, sie also individuell suchen müssen, wie sie ihr vorgegebenes Wissen in neue Zusammenhänge setzen können. Ziel ist es außerdem, dass die Einsicht in aktivitätsgesteuerte Reorganisationsprozesse in einer späteren Phase des Unterrichts auf die Ausprägung *serieller und paralleler* Verschaltungsmuster angewendet werden soll.

5.4.2 Präzision des Lernmodells: Reorganisationsprozesse in kritischen Phasen

Nach der fachwissenschaftlichen Progression müsste im Unterricht jetzt die Erarbeitung der von Wolff (1978) entwickelten Kompensationstheorie folgen, in der die Umbauprozesse von Nervennetzen erstmals postuliert wurden und auf die Optimierung von Membranpotenzialen durch die Kompensation hemmender und erregender Synapsen zurückgeführt wurde. Allerdings ist der Theorieanteil dieser Modellvorstellung sehr hoch (s. Seite 23), sodass zuvor bei dem Lernenden

Assoziationspunkte durch anschauliche Forschungsergebnisse geschaffen werden sollten. Somit werden in der folgenden Unterrichtseinheit anhand von Forschungsergebnissen der Abteilung für Neuroanatomie der Universität Bielefeld reorganisierende Prozesse behandelt, die auf der Verhaltensebene prägnante Lernerfolge zeigen. Das Modell der Prägung gehörte früher zum Standard der Verhaltenslehre, nicht nur an Schulen, sondern auch in Spezialblöcken der Neurobiologie an der Bielefelder Universität. Studierende für das Lehramt - zu denen ich auch gehörte - haben großen Nutzen speziell aus der Verknüpfung von Verhaltensaspekten mit den Erkenntnissen der modernen Hirnforschung gezogen. Letztere ist es, die das Prägungsmodell für den modernen Biologieunterricht wieder aktuell werden lässt. Lässt sich doch an diesem, so gut wie an keinem anderen Beispiel, die Korrelation von Struktur und Funktion beim LERNEN veranschaulichen.

Exkurs 5.2 Reorganisation von Nervennetzen und Neuroplastizität

Teuchert-Noodt (1991) und ihre Mitarbeiter haben am Modell der Ente gezeigt, dass „Sensible Phasen“ bei Vögeln, die aus der Verhaltensforschung seit Konrad Lorenz hinlänglich bekannt sind, auf Prozessen der Reorganisation von zentralen Nervennetzen beruhen. Sie konnten an den sensorischen Systemen von Enten lysosomale *Degenerationsprozesse* synaptischer Verbindungen detektieren, die zeitlich mit der Reifung des jeweiligen Systems zusammenfallen. Sie konnten weiterhin transiente Faserverbindungen in solchen Gebieten detektieren. Daraus ließ sich folgender Vorgang ableiten: Innerhalb einer „kritischen Reifungsphase“ brechen die primär geknüpften, synaptischen Verbindungen präsynaptisch auf und bieten somit postsynaptisch Angebote für neue Verknüpfungen an, die nun durch Reize aus der Umwelt in eine funktionell sinnvolle Verschaltung eingebunden werden können. Das von Teuchert-Noodt untersuchte Vogelmodell ließ sich im Folgenden auf den Säuger übertragen (vgl. Dawirs, 1992). Wenn hier auch die sensiblen Phasen nicht so extrem ausgeprägt sind, dürften sich die gleichen Prinzipien der Degeneration und umweltbezogenen Reorganisation von Synapsen vor allem im limbischen System wieder finden (vgl. Dawirs 1992 und Teuchert-Noodt, et al. 1991, rev. In Teuchert-Noodt, 2000).

Die durch Konrad Lorenz erkannte sensible Phase für die Nachlaufprägung bei Hühner- und Entenküken ist das praktische Beispiel, zu dem eine Hälfte des Kurses Material zur Erarbeitung erhält. Die andere Hälfte der

Lerngruppe bekommt Material zu den cytologischen Zusammenhängen, die zu diesem prägnanten Lernerfolg führen. Dieses Material ist aus einer Arbeit der Forschungsgruppe von Frau Prof. Teuchert-Noodt entnommen.

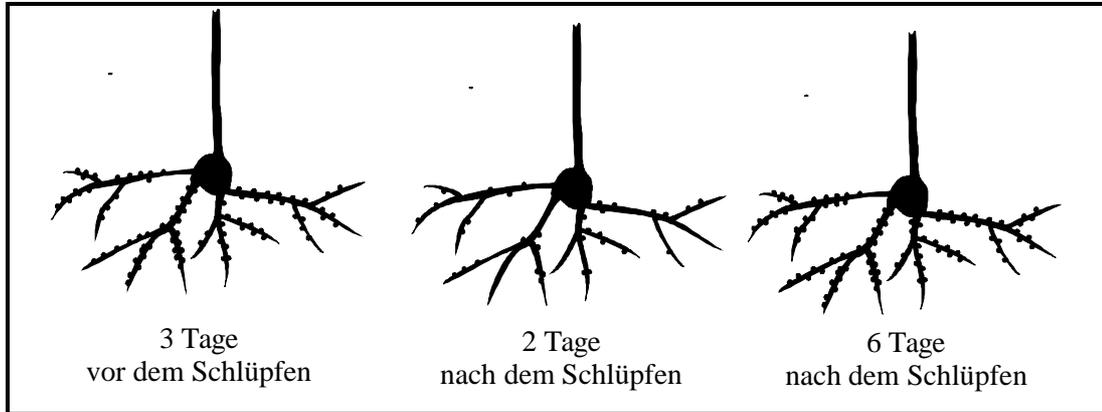


Abbildung 5.8

Darstellung der Spinedichte an Pyramidenzellen (nach Teuchert-Noodt et. al., 1991)

Anhand der Spinedichte in Abbildung 5.8 soll postuliert werden, dass sich an den Dendriten der Pyramidenzellen Synapsen zuerst abbauen und dann wieder aufbauen. In Verbindung mit dem Diagramm aus der Abbildung 5.9 lässt sich eine Reorganisation von Nervenzellverbindungen folgern. Da die andere Teilgruppe die Prägungsphasen bei Küken erarbeitet, sollen die Schüler in der zusammenführenden Phase der beiden Gruppenthemen den Zusammenhang zwischen der sensiblen Phase bei der Prägung und der Neubildung der Synapsen erläutern können. Dabei soll der Vergleich der Zeitachsen der Diagramme aus Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10 die Verbindung zwischen dem Umbauprozess und der Prägung des Kükens auf die Entenmutter, einen Menschen oder einen beliebigen bewegenden Gegenstand zeigen, das war im Bielefelder Institut ein Ball mit eingebauten Lautsprechen (PRÖVE-Apparatur).

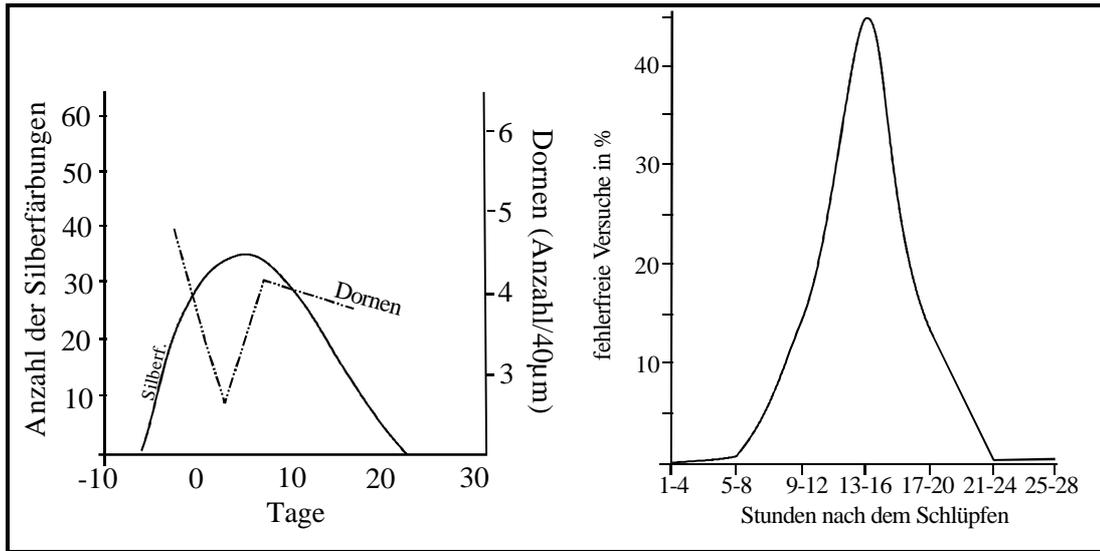


Abbildung 5.9 (links)

Zeitliche Korrelation zum Auf- bzw. Abbau von Synapsen in einem prägungsrelevanten Areal. Quantifizierung der degradativen Synapsen (S) und Spines am Neuron (D). (nach Dawirs 1992 und Teuchert-Noodt, et al. 1991)

Abbildung 5.10 (rechts)

Zeitlicher Verlauf der Prägungsversuche (nach Mentor-Biologie, 1998)

In einer fortführenden Besprechung wird der Begriff der **kritischen Phase** eingeführt, in der sich Nervennetze neu organisieren und so besonders offen für Reize aus der Umwelt sind. Diese Begriffsbildung sollen die bisher erkannten Reifungsphasen des Gehirns von dem fachsprachlich belegten Begriff der „sensiblen Phase“ aus der Verhaltensforschung abgegrenzt werden. Außerdem soll im Weiteren die kritische Phase auch auf die Reifungsphasen im menschlichen Gehirn, insbesondere bei der Ausdifferenzierung der lateralisierten Hemisphärenfunktionen, angewendet werden. So gilt es darzulegen, dass das gleiche Prinzip der Degeneration von Nervenfasern sich auf transiente callosale Verbindungen transferieren lässt, wie sie schon seit den 80iger Jahren gezeigt wurden (vgl. z.B. O’Leary et al., 1985 oder Innocenti et al. 1995). Für das menschliche Gehirn kann postuliert werden, dass strukturell bedingte Nervenbahnen, die postnatal angelegt werden, innerhalb der ersten Lebensjahre abgebaut und im Bezug auf die kognitiven Funktionen durch sinnvolle lateralisierte Schaltkreise ersetzt werden (=Reorganisation). Auf derartige Umbauprozesse weisen auch die

am Environment-Modell gezeigten strukturellen Veränderungen der callosalen Fasern im Nager-PFC hin (vgl. Kapitel 4.2 und 4.2.3).

Weitere kritische Phasen können heute für die Anlegung von **endogenen Rhythmen** (perinatal), für die Struktur-Funktionskopplung von **Bewegungsmustern** (1. bis 6. Lebensjahr), und speziell auch für die Reifung von an das **Stirnhirn** gekoppelten Funktionen (1. – 20. Lebensjahr) beschrieben werden (rev in Teuchert-Noodt und Lehmann, 2000). Die folgende Modellvorlage (vgl. Abbildung 5.11) kann mit den Schülern sukzessive entworfen werden und als Übersicht für die zu behandelnden neuronalen Systeme dienen. Von den Schülern werden die theoretischen Konstrukte mit konkreten Beispielen aus den Themengebieten Reifung von **Reflexen**, Erlernen von **Bewegungsmustern**, Entwicklung **kognitiver Fähigkeiten** und Reifung von **Sozialverhalten** hinterlegt. Das notwendige Hintergrundwissen wird vorab ausgebaut: So wird im Unterricht zunächst auf die vorgeburtliche Reifung der endogenen Rhythmen und des Schlaf-Wach-Rhythmus eingegangen. Hierbei handelt es sich um ganz aktuelle Erkenntnisse der letzten 20 Jahre, die gezeigt haben, dass die Rhythmen zwar anatom organisiert werden, dann aber von den Schwangeren entweder unterstützt oder gestört werden können. Ebenso aktuell sind die Erkenntnisse zur vorgeburtlichen Reifung von Primärreflexen, auf denen die nachgeburtliche Reifung der Grob- und Feinmotorik aufbaut. Beide Funktionskomplexe bilden die Struktur- und Funktionbasis für den Ausbau höherer Hirnfunktionen sowie für LERNEN. Deswegen gilt es an dieser Stelle diese Geschehnisse mit praktischen Bezügen zu hinterlegen, um für die hohe Verantwortung werdender Eltern während der Schwangerschaft zu sensibilisieren. Das Anschauungsmodell in Abbildung 5.11 ist dazu gedacht, die Zusammenhänge klar vor Augen zu führen.

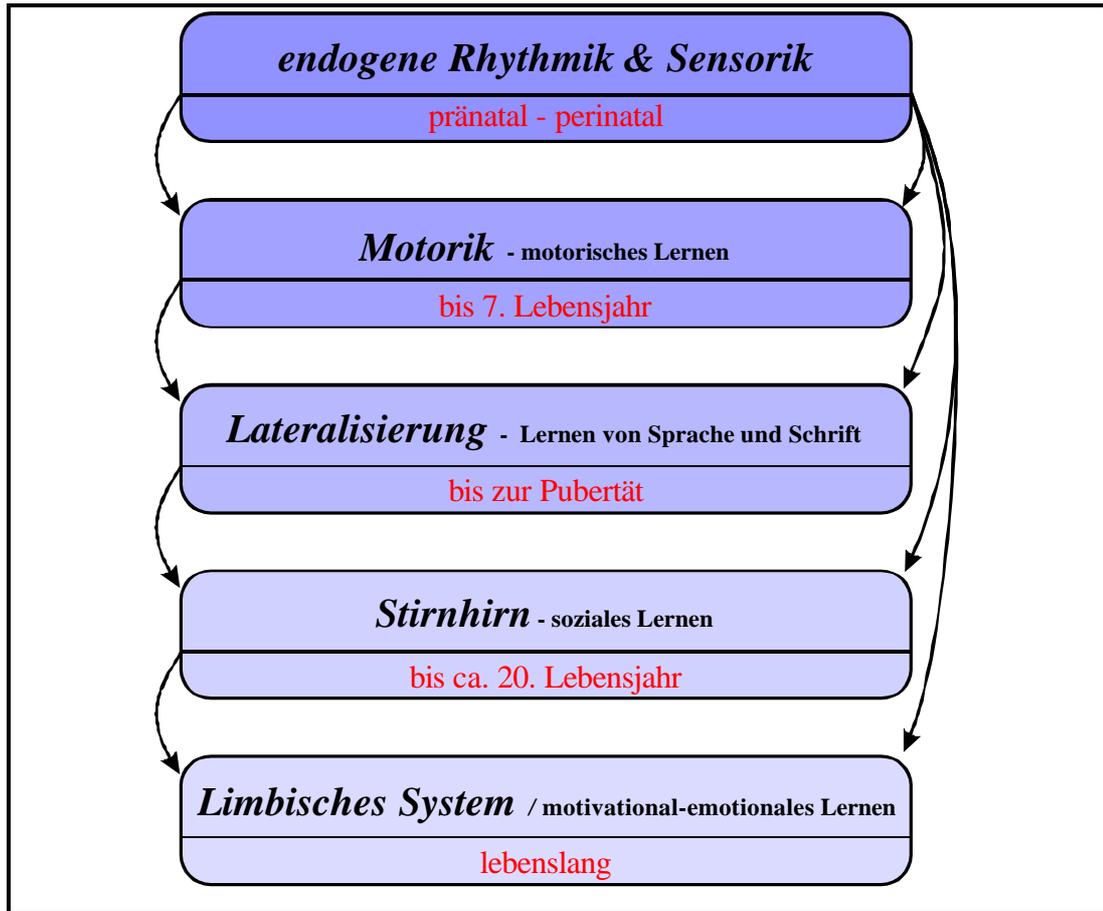


Abbildung 5.11

Übersicht über kritischer Phasen der Entwicklung neuronaler Systeme. Die Pfeile auf der linken Seite zeigen den hierarchischen Ablauf der kritischen Phasen an. Die Pfeile auf der rechten Seite sollen zeigen, dass sich die Entwicklung von jeder frühen Phase in folgenden Phasen widerspiegelt (nach Teuchert-Noodt und Lehmann, 2003)

5.4.3 Lerntypen werden von Hemisphärenpräferenzen dominiert

Über all den mechanistischen Betrachtungsweisen zu dem Thema Entwicklung und LERNEN stehen die individuellen Ausprägungsverläufe, die LERNEN zu einem vom Typus des Schülers abhängigen Thema erheben. Der Begriff des Lerntyps und des Lerntypentests ist im pädagogischen Sprachgebrauch heutzutage weit verbreitet. Allerdings bezieht sich diese Definition meistens nicht auf die verschiedenen Verarbeitungsstrategien der Hemisphären, sondern geht nur auf die Eingangskanäle ein und steht damit in der Tradition von Vester aus den siebziger Jahren (Vester, 1975). Diese tradierte Sichtweise sollen die Schüler zu diesem Zeitpunkt des Unterrichtes kennen lernen, um sie ab jetzt kritisch hinterfragen zu können. Anschließend werden

Verarbeitungsstrategien des Gehirns thematisiert, die auf den verschiedenen Hemisphärenfunktionen beruhen und die Lerndisposition des individuellen Menschen entscheidender beeinflussen.

Zum Einstieg wird ein Lerntypentest durchgeführt, der nach Vester (1998) konzipiert ist. Hier werden die Eingangskanäle Tasten, Hören und Sehen getestet. 10 Begriffe werden in verschiedenen Modalitäten präsentiert. Nach einer Minute sollen die Schüler die Begriffe, die sie gesehen, ertastet oder gehört haben, aufschreiben. Ihre Merkleistung wird in einem Diagramm dokumentiert (vgl. Abbildung 5.12). Natürlich lassen sich aus diesem Test keine weit reichenden Erkenntnisse ziehen, allerdings können Querbezüge zu den individuell etablierten Nervenbahnen zwischen den Sinnes- und Assoziationsfeldern hergestellt werden.

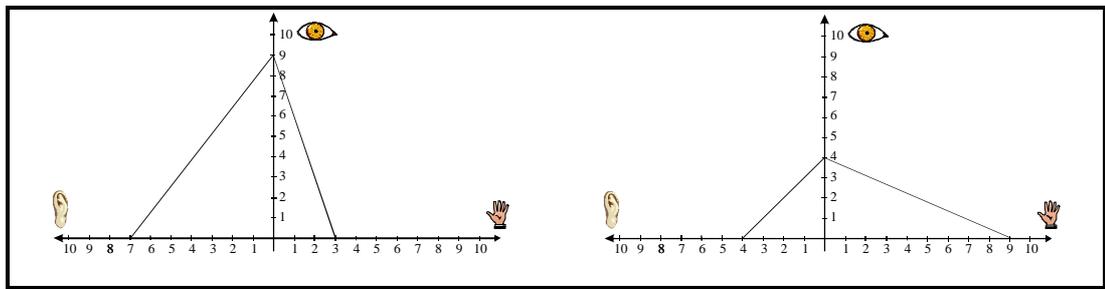


Abbildung 5.12

Zwei mögliche Ergebnisse eines Lerntypentests für einen visuellen (links) und einen taktilen (rechts) Lerntyp (verändert nach Vester, 1998)

Im nächsten Unterrichtsabschnitt soll eine weitaus wichtigere Komponente der Lerndisposition erarbeitet werden. Die Modellvorstellung, dass die beiden Hemisphären mit unterschiedlichen sequenziellen und komplexen Verarbeitungsstrategien arbeiten, soll zunächst in den Köpfen der Schüler verankert werden. Zu einem späteren Zeitpunkt kann dann Modellkritik geübt werden, indem graduelle Phänomene der Lateralität, wie sie zum Beispiel bei der Linkshändigkeit auftreten, diskutiert werden.

Zuerst sollen die Schüler für das Phänomen komplexer und serieller Verarbeitungsstrategien sensibilisiert werden. In einem Selbstversuch soll ein vorgezeichneter Weg, den die Schüler nur durch einen Spiegel sehen, nachgezeichnet werden. Abbildung 5.13 zeigt zwei typische Schülerergebnisse dieses Tests. Die Berichte der Schüler in der anschließenden Besprechung

gleichen sich. Die Schüler, die ohne Abzusetzen den ‚Parcour‘ nachgezeichnet haben (Abbildung 5.13 a), sagen, dass sie ‚nichts‘ gedacht hätten und nur aus ihrer Intuition gehandelt haben. Die Schüler mit dem Ergebnis, wie es in Abbildung 5.13 b dargestellt ist, beschreiben, dass eine logische Analyse keinen Fortschritt beim Zeichnen gegeben hätte. Vielmehr hätte ein weiteres Durchdenken der Bewegungsrichtung des Stiftes zur weiteren Konfusion geführt.

Es kristallisieren sich somit zwei Verarbeitungsstrategien heraus: eine analytische und eine komplexe, die von Schüler meist intuitiv genannt wird. Ziel der anschließenden Gruppenarbeit soll es sein, die Fachbegriffe *komplexe* und *sequenzielle* Verarbeitungsstrategien einzuführen und diese der rechten bzw. linken Hemisphäre zuzuordnen.

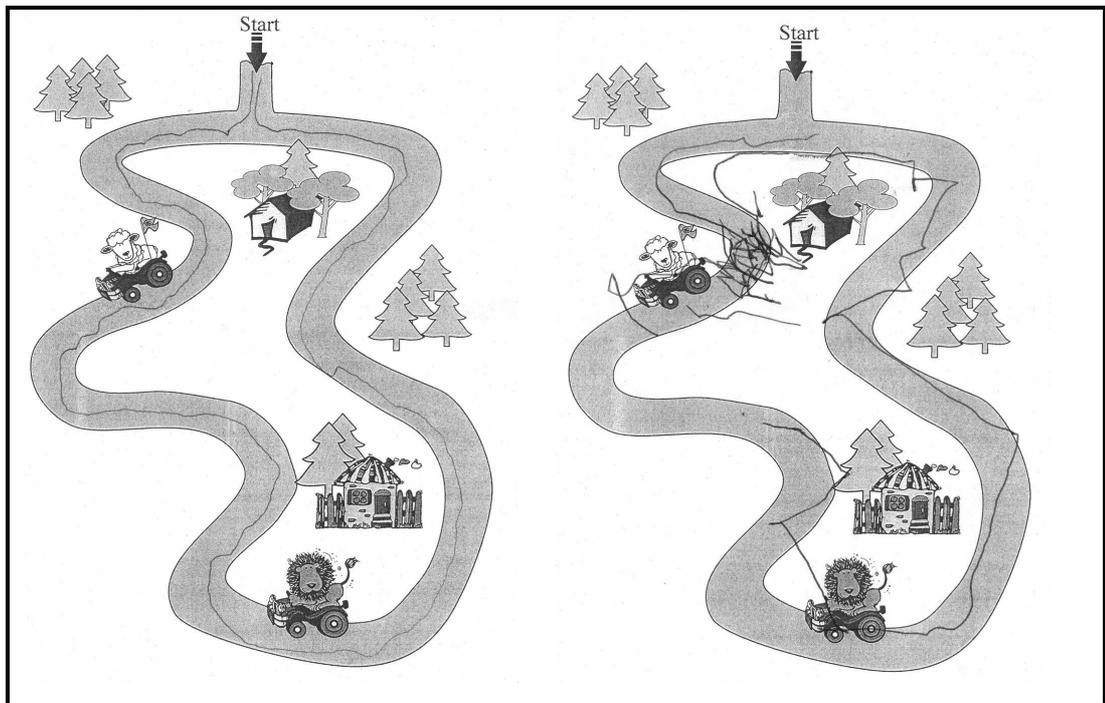


Abbildung 5.13

Zwei Schülerergebnisse vom spiegelverkehrten Zeichnen

a. (links) durchgezogener Linienzug

b. (rechts) abgebrochen Linienzug

Die Schüler sollen an vier Gruppenarbeitsthemen die Aspekte der Verarbeitungsstrategien der beiden Hemisphären erarbeiten. Im *ersten* Themenkomplex erarbeiten sie die sequenziellen Verarbeitungsstrategien der linken Hemisphäre. Im Infotext des Arbeitsblattes finden sie dazu die Informationen zum sequenziellen Aufbau der Sprache (vgl. Kapitel 1.2, Calvin

1994). Anhand dieser Informationen sollen die Lerngruppen die Sequenzierungsfähigkeit als Schlüsselfunktion der linken Hemisphäre herausarbeiten. In der Schemazeichnung zum Hemisphärenmodell (vgl. Abbildung 1.2) soll die lineare Darstellung der Neuronengruppen gedeutet werden.

Die *zweite* Gruppenarbeit thematisiert das Verarbeiten von Bildern auf der rechten Hemisphäre. Hier soll die Schlüsselfunktion der komplexen Verarbeitung von Informationen erarbeitet werden. Anhand des Materials sollen die Lernenden entwickeln, dass die rechtshemisphärischen Fähigkeiten darauf beruhen, den Informationsgehalt möglichst schnell und ganzheitlich zu erfassen. Anhand der Schemazeichnung (vgl. Abbildung 1.2) sollen die dazugehörigen parallelen Schaltkreise erläutert werden. Die in Abbildung 2.3 benannten rechtshemisphärischen Fähigkeiten sollen anhand dieser rechtshemisphärischen Schlüsselfunktion zugeordnet und an ihr erläutert werden.

Die *dritte* Schülergruppe vergleicht die linkshemisphärische Sprachverarbeitung mit der auf der rechten Hemisphäre repräsentierten Prosodie (vgl. Kandel, 1996). Zuerst sollen die Schüler die Verarbeitung der Sprache im sensorischen Wernicke-Areal und im motorischen Broca-Areal darstellen. Dazu hatten sie die Aufgabe, den Weg der Reizweiterleitung beim Vorlesen an einer Abbildung (vgl. Tabelle 5.1) nachzuvollziehen und mit Pfeilen einzuzeichnen. Im Material werden darüber hinaus die Verhaltensweisen von Aphasikern dargestellt, die an einer Wernicke- bzw. Broca-Aphasie leiden. Anhand der Informationen und der Abbildung auf dem Arbeitsblatt sollen die Ursachen für die Verhaltensweisen der beiden Typen von Aphasikern erläutert werden. In der dritten Aufgabe soll die Verarbeitung von Prosodie angesprochen werden. Bei der Prosodie handelt es sich um die emotionalen Komponenten in der Sprache, wie Betonung, Tonhöhe und Sprachrhythmus (vgl. Kapitel 1.2.2.). In der Abbildung 1.3 (b) wird deutlich, dass die Prosodie auf der rechten Hemisphäre verarbeitet wird. Die Schüler sollen diese anhand der komplexen Verarbeitungsstrategie der rechten Hemisphäre erläutern.

Die Untersuchungen von Levy et al. (1974) bilden die Grundlagen für das Material der *vierten* Gruppenarbeit. Die Hirnforscherin Levy projizierte Bilder verschiedener Gegenstände (lateralisierte Reize) in die rechte bzw. linke Hemisphäre von Split-Brain-Patienten. Danach gab sie den Patienten verschiedene andere Gegenstände zur Auswahl (Wahlreize), die den gesehenen Bildern zugeordnet werden sollten. Die Zuordnung ist in der Abbildung 5.14 dargestellt.

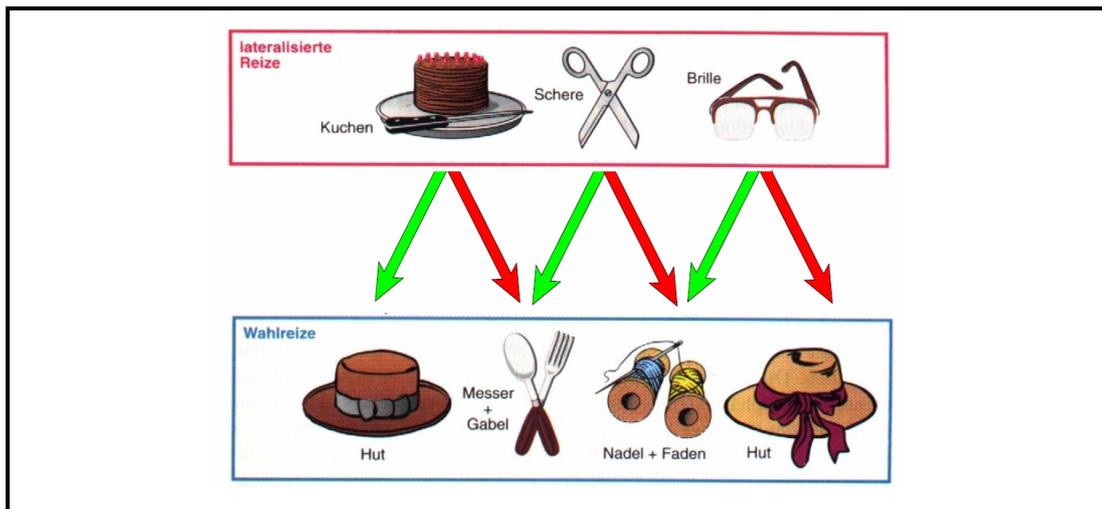


Abbildung 5.14

Untersuchungsergebnisse von Levy et al. (1976). Die roten Pfeile stellen die Zuordnung nach der Projektion in die linke Hemisphäre dar, die grünen die Zuordnung nach der Projektion in die rechte Hemisphäre (aus Schmidt, 1995).

Die Schüler sollen anhand der Abbildung 5.14 erarbeiten, dass die linke Hemisphäre, ihren analytischen Fähigkeiten folgend, lateralisierte Reize nach ihrer Funktion den Wahlreizen zuordnet. Die rechte Hemisphäre verarbeitet die lateralisierten Reize nach ihrem äußeren Erscheinungsbild und ordnet sie dementsprechend zu. Durch die Zusatzinformationen über die Schlüsselfunktionen der Hemisphären sollen auch Querbezüge zu der Frage hergestellt werden, warum die Nervenetze der Hemisphären so vorgehen. So könnte die Gruppe argumentieren, dass die linke Hemisphäre Schritt für Schritt das Gesehene verarbeitet und so dem Kuchen das Besteck zuordnet, da er im nächsten Schritt gegessen werden soll. Die komplexe Verarbeitungsstrategie der

rechten Hemisphäre verarbeitet das gesamte Erscheinungsbild und ordnet zum Beispiel dem Kuchen den ähnlich aussehenden Hut zu.

Die gesamten Ergebnisse werden von den vier Gruppen am Ende der Unterrichtseinheit im Plenum vorgestellt. Dazu haben die Gruppen während der Erarbeitungsphase Folien erstellt. In dieser Sicherungsphase sollen die sequenziellen und die komplexen Verarbeitungsstrategien der beiden Hemisphären herausgestellt werden. Die Tabelle 5.1 zeigt eine Zusammenstellung der vier Gruppenarbeitsthemen in dieser Unterrichtseinheit zu den Hemisphärenfunktionen. In der unteren Zeile ist der Erkenntnisgewinn in der jeweiligen Gruppe dokumentiert.

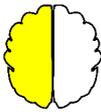
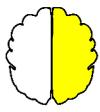
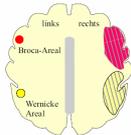
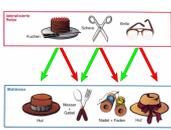
Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III	Gruppe IV
Linke Hemisphäre	Rechte Hemisphäre	Sprache und Prosodie	Funktionen der Hemisphären
			
Sequenzielle Verarbeitung	Komplexe Verarbeitung	Vergleich von Sprache und Prosodie	Erforschung der Hemisphärenfunktionen

Tabelle 5.1

Zusammenstellung der Gruppenarbeitsthemen zu den Hemisphärenfunktionen

Die anschließende Diskussion sollte ergeben, dass es auch verschiedene Dispositionen für die sequenzielle oder komplexe Verarbeitungsstrategie gibt, die den Lerntyp entscheidender beeinflussen als Präferenzen zu den Eingangskanälen. Diese Erkenntnis ist für die Lernangebote in den Workshops von besonderer Bedeutung. Für die Erzieher ist natürlich auch relevant, dass die Ausprägung der Lateralität in einer kritischen Phase verläuft, deren Offenheit mit der Pubertät als beendet gilt. So sind sie in ihrem späteren Beruf im Kindergarten und in der Sonderschulpädagogik besonders aufgefordert, auf die Förderung

interhemisphärischer Kommunikationsstrukturen Wert zu legen. Insbesondere der Workshop „Lernen durch Bewegungen“ soll dazu Anleitung geben.

5.5 Workshops: „Wie lernt das Gehirn?“

Bei der Vorbereitung der Workshops erarbeiteten die Schüler für eine andere Lerngruppe Lerntipps aufgrund der gewonnenen neurobiologischen Informationen. Dabei gehörte es zu der Aufgabenstellung in den Workshops, die Querbezüge zu den Verarbeitungsstrategien der Hemisphären der anderen Lerngruppe aufzuzeigen. Es wurden vom Leistungskurs Biologie vier Themen ausgewählt: „Lernen durch Bewegung“, „Erlernen von Sprache“, „Lernen in der Mathematik“ und „Lerntypentests“. Von diesen vier Workshops werde ich hier exemplarisch die beiden „Mathematik“ und „Lernen durch Bewegung“ vorstellen, da bei diesen Workshops der Bezug zur Lateralität der kognitiven Verarbeitung besonders deutlich wird. Im Folgenden werden die Teilnehmer an den Workshops, die sich aus verschiedenen Klassen des Leo-Symphoniker-Berufskollegs rekrutieren, Probanden oder Workshopteilnehmer genannt. So ist eine einfachere Differenzierung der verschiedenen Schülergruppen möglich. Der didaktisch wertvollste Aspekt der LERNEN Workshops ist die PLANUNG durch die Schüler. Bei dieser Arbeit strukturieren sich wichtige Stirnhirnfunktionen, die in anderen Lern- und Lebenssituationen abrufbar sind. Eine wichtige Stirnhirnfunktion ist die Fähigkeit zur Antizipation von veränderten Umwelteinflüssen. Bei der Planung der Workshops wird von Schülern ein hohes Maß an antizipatorischen Fähigkeiten verlangt. Sie müssen sich mit dem Lernniveau anderer Lerngruppen auseinandersetzen. Das mögliche Schülerklientel am Berufskolleg ist sehr breit gefächert und reicht von Schülern ohne Schulabschluss bis zu solchen, die eine allgemeine Hochschulreife anstreben. Insbesondere der öffentliche Charakter der Workshops führt dazu, dass die Schüler viel Energie in das Gelingen einer solchen Veranstaltung stecken.

Eine weitere Stirnhirnfunktion, die bei der Planung der Workshops einstrukturiert wird, ist das zeitliche Disponieren. Die Vorbereitung eines umfangreichen Projektes benötigt eine Vielzahl von Arbeitsschritten, die zeitlich abgestimmt und

in der Arbeitsgruppe koordiniert werden müssen. Auf diese Weise werden bei den Schülern die Grundlagen für das Denken in historischen Bezügen gelegt. Diese Strukturierung der Nervennetze kann in anderen Kontexten abgerufen werden. Im Sinne der Bildungstheorie (Klafki, 1963) wird also bei der Vorbereitung der Workshops zukunftspropädeutisch gearbeitet, indem die Stirnhirnfunktionen für spätere Aufgaben vorstrukturiert werden. Auch für das Stirnhirn gilt, dass die dafür nötigen Umbauprozesse der Nervennetze nur durch *aktivitätsgesteuerte Synaptogenese* gesteuert werden. Das heißt, dass die Schüler aktiv an der Strukturierung beteiligt werden müssen. Eine vorgefertigte Planung wäre für diesen Lernerfolg kontraproduktiv. Auch die bei der Vorbereitung entstehenden Krisen sind -neurobiologisch betrachtet- wertvoll. Dem Kompensationsprinzip zufolge werden durch Stressoren die konsolidierten Schaltkreise in einen instabilen Zustand versetzt, der eine Neustrukturierung erst möglich macht. Allerdings müssen die Aufgaben für die Schüler zu bewältigen sein, da zuviel Stress die Lernprogression hemmt (Vester, 1998). Das Etablieren von Planungsphasen, die von Schülern organisiert werden, ist deshalb ein wichtiges didaktisch-methodisches Element, das im konventionellen Unterricht aber oft inhaltlichen Schwerpunkten weichen muss. Der neurodidaktische Ansatz zeigt, dass die damit verbundene Berücksichtigung von Stirnhirnfunktionen einen wesentlichen Beitrag zum ganzheitlichen Lernerfolg darstellt.

5.5.1 Workshop „Lernen durch Bewegung“

Grundlage für diesen Workshop ist eine Unterrichtseinheit zur Motorik, die den Ablauf neuronaler Prozesse beim motorischen LERNEN thematisiert. Die einzelnen Schülergruppen haben als Vorgabe verschiedene Altersstufen im Kindesalter, in denen neue Bewegungsmuster erlernt werden (z.B. Krabbeln, Laufen, Balancieren Radfahren lernen etc.). Anhand einer Graphik werden wichtige Prozessschritte beim Erlernen der Bewegungsmuster vorgestellt. Dabei werden den Funktionen die beteiligten Strukturen zugeordnet. Die Schüler sollen in ihren Vorträgen die in Abbildung 5.15 gezeigten Teilprozesse auf die selbst ausgewählte, altersspezifische motorische Handlung anwenden. Die wichtige Erkenntnis für die Schüler ist, dass komplexe Bewegungen auf einfachen

aufbauen und von Kindern selbstständig gelernt werden können. Einfache und komplexe Bewegungen bilden dann auch Grundlage für das LERNEN in theoretischen Kontexten.

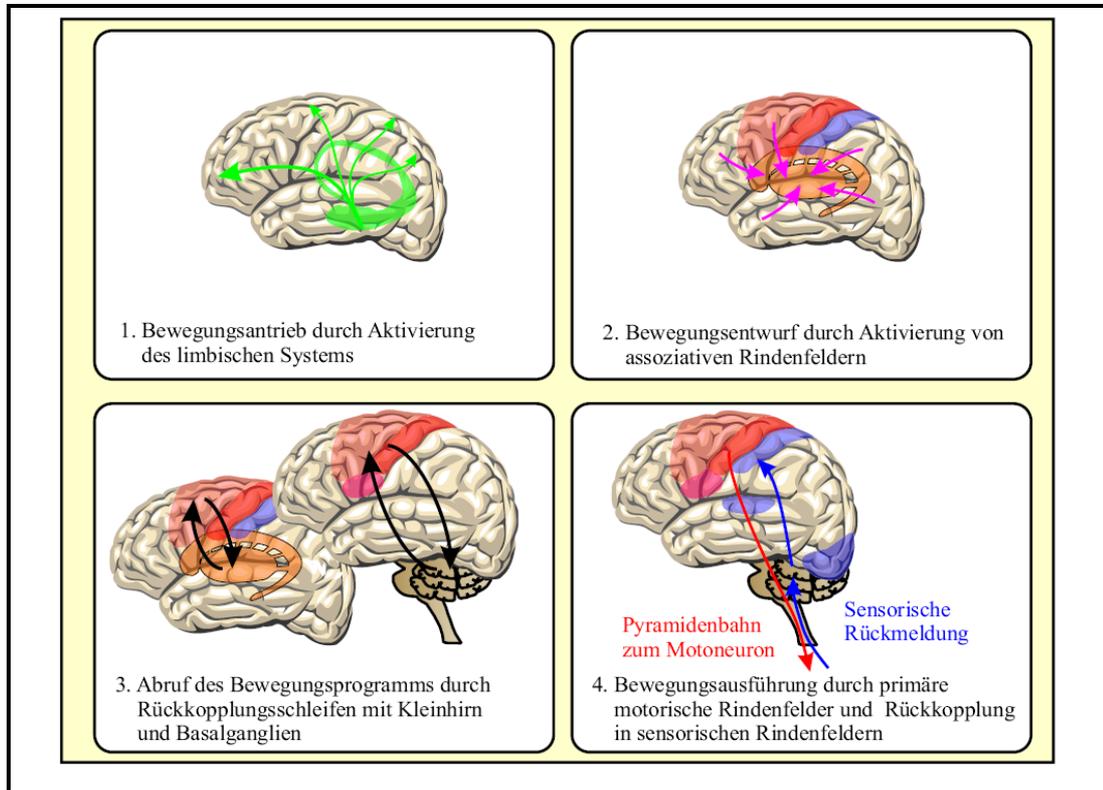


Abbildung 5.15

Vereinfachter Ablauf beim Erlernen einer motorischen Handlung und die beteiligten Strukturen.

1. Motivation / Bewegungsantrieb → limbisches System
2. Vorstrukturierung der Bewegung → prämotorische und assoziative Rindenfelder
3. Koordination von motorischen Mustern und Gleichgewicht → Kleinhirn und Basalganglien
4. Ausführung & Reflexion der Bewegung → primäre motorische und sensorische Rindenfelder

Nach dieser einführenden Unterrichtseinheit können die Schüler im Workshop „Lernen durch Bewegung“ auch solche von H. Mähringer (1996) zusammengestellten ganzheitlichen Bewegungsübungen, die interhemisphärische Rückkopplungsschleifen via Corpus Callosum fördern, den Workshopteilnehmern auf einer fundierten neuronalen Basis präsentieren. Aus dem Angebot von komplexeren, an höhere Funktionen angebotenen Bewegungsübungen wählen die angehenden Erzieher zwei bis drei Beispiele aus. Bei der „liegenden Acht“ sollen die Probanden auf einem Plakat eine liegende Acht nachschreiben. Durch die Aktivierung beider Gesichtsfelder und die Bewegungen über die Körpermitte

hinaus werden beide Hemisphären und deren Interaktion aktiviert. Eine weitere Übung ist das „Simultanzeichnen“. Hier soll mit der rechten und der linken Hand das gleiche Muster gezeichnet werden. Auch hierbei werden über die Pyramidenbahnen die motorischen Zentren beider Hemisphären angesprochen (Mähringer, 1996).

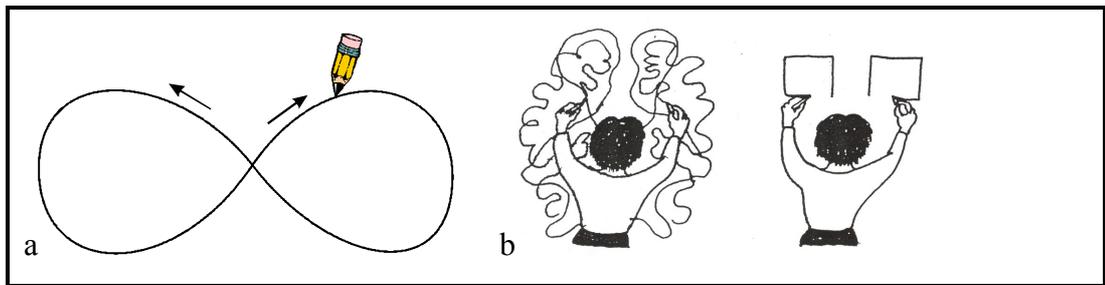


Abbildung 5.16

Übungen zur Stärkung der Hemisphäreninteraktion: „liegende Acht“ (a) und „Simultanzeichnen“ (b) (aus Mähringer, 1996)

Außerdem wurde eine Übung entwickelt, bei der aktivitätsgesteuerte Reorganisationsprozesse beim interhemisphärischen Informationsabgleich sichtbar werden. Die Probanden sollen einen Buchstaben schreiben, den sie nur über einen Spiegel sehen (vgl. Abbildung 5.17). Da die Bewegungen spiegelverkehrt wahrgenommen werden, müssen neue Raum-Zeit-Verrechnungen im Gehirn verarbeitet werden. Diese rechtshemisphärische Fähigkeit muss mit der linkshemisphärisch repräsentierten Funktion des Linienziehens koordiniert werden. Bei dieser Übung werden die interhemisphärischen Reorganisationsprozesse durch den immer besser werdenden motorischen Ablauf der Handlung dem Probanden plastisch vor Augen geführt.

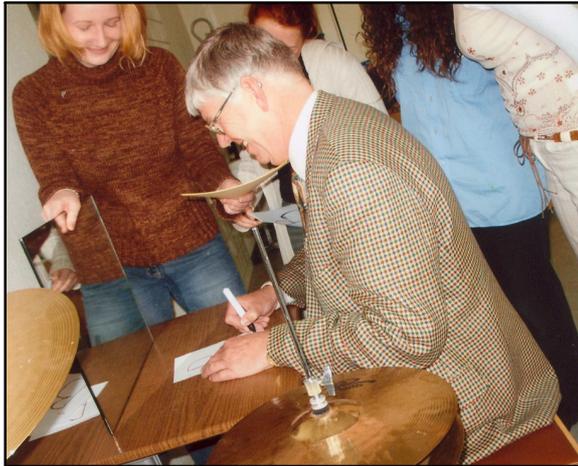


Abbildung 5.17

Schulleiter Kurt Gieselmann beim spiegelverkehrten Schreiben. Der Buchstabe ist in Spiegelschrift auf dem Blatt notiert. Durch die spiegelbildliche Darstellung reagiert das Gehirn falsch auf die visuellen Informationen. Während des Lernprozesses werden die Bewegungen immer glatter, da die Raum-Zeit-Verrechnungen und das Linienziehen über das Corpus Callosum immer besser koordiniert werden.

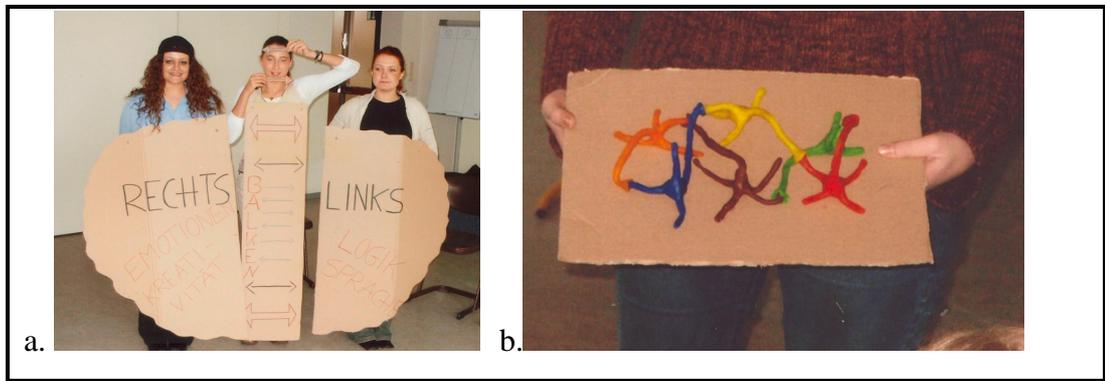


Abbildung 5.18

Fotographien des Schülervortrags des Workshops „Lernen durch Bewegung“: Rollenspiel (a) und plastische Prozesse am Nervennetz aus Knetgummi (b)

Zur Erläuterung der vorgestellten Übungen entwickelten die Schüler ein Rollenspiel. Drei Schüler spielten die rechte und linke Hemisphäre und den Balken. In dem Rollenspiel wurden die Aufgaben beider Gehirnhälften bei den neuen Bewegungsabläufen erläutert. Das Callosum, durch die in der Mitte postierte Schülerin symbolisiert, stellt sich einmal in einseitiger Konnektivität zur linken Seite dar und ein anders Mal in beidseitiger Konnektivität (s. Abbildung 5.18). Außerdem haben die Schüler aus Knetgummi ein symbolisches Nervennetz gebastelt, an dem die aktivitätsgesteuerte Reorganisation der Hemisphärenverschaltung plastisch gezeigt werden konnte (s. Abbildung 5.18 a und b).

5.5.2 Workshop „Mathematik“

In diesem Workshop wurden zum Thema „Lösen linearer Gleichungssysteme“ Aufgaben ausgewählt, um links- und rechtshemisphärische Zugänge zu einem mathematischen Thema aufzuzeigen. Dabei wird auf die aus der Fachdidaktik Mathematik bekannten vier Darstellungsebenen zurückgegriffen (vgl. Zech, 1998). Die Schüler haben Aufgaben entwickelt, die unter verschiedenen methodischen Gesichtspunkten gelöst werden sollten. Schon in der Entwicklungsphase der Aufgaben wurde deutlich, dass durch das Aufbereiten des Materials Querbezüge und Feinheiten des für die Lerngruppe eigentlich trivialen Inhalts erst bewusst wurden.

Zur Erläuterung der neurobiologischen Bezüge wurden das hauptsächlich beteiligte sensorische System und die angesprochene Hemisphäre farblich in einer Graphik zusammengestellt (vgl. Abbildung 5.19). Dabei sollte auch die Frage geklärt werden, ob Mathematik eine links- oder rechtshemisphärische Leistung ist. Die enaktive Handlungsebene wird zum Beispiel als taktile, rechtshemisphärische Leistung eingeordnet. Die Lösung erfolgt durch Verschieben der Bauklötze und wird somit haptisch und komplex verarbeitet. Genauso werden auf der visuellen Darstellungsebene die Abbildungen komplex vom Auge erfasst. Die Lösung fällt einem rechtshemisphärisch Disponierten dadurch leichter. In der symbolischen Handlungsebene werden lineare Verarbeitungsstrukturen benötigt. Insbesondere beim Lösen von linearen Gleichungssystemen müssen die einzelnen Gleichungen Schritt für Schritt bearbeitet werden. Deshalb wird diese Darstellungsart als linkshemisphärisch eingestuft. Ebenso wird auch das Formulieren von Regeln der linken Gehirnhälfte zugeordnet, da die Sprache eine linkshemisphärisch repräsentierte Funktion ist.

Die Abbildung 5.19 zeigt, dass Mathematik eine Leistung des ganzen Gehirns ist. Eine Reduktion auf sprachlich orientierten Unterricht beansprucht nur die linke Hemisphäre. Die Nutzung möglichst vieler Darstellungsebenen baut sowohl serielle als auch parallele Verschaltungsmuster aus. Diese können dann auch in anderen mathematischen Kontexten genutzt werden. Bei dem von Zech (1998) beschriebenen Wechsel der Darstellungsebenen, den er mit den

Fachausdrücken Verbalisieren, Ikonisieren, Enaktivieren und Visualisieren differenzierter zuordnet, bewirkt beim Lernenden einen interhemisphärischen Abgleich der Informationen. Die Zuordnung zwischen den Darstellungsebenen und den Verarbeitungsstrategien der beiden Hemisphären ist ein gutes Beispiel dafür, dass eine Methode, die von Mathematikkollegen oft als ‚Spielerei‘ abgetan wird, eine entscheidende neuronale Bedeutung besitzt. So haben jüngste Studien gezeigt, dass gerade das Enaktivieren einen entscheidenden Einfluss auf die asymmetrische Verarbeitung von Rechenoperationen hat (Zhang et al., 2005): So waren bei Linkshändern die prämotorischen Areale des rechten PFC deutlich mehr an komplexen Rechenoperationen beteiligt als bei Rechtshändern. Zhang et al. (2005) führen die gesteigerte Integration der motorischen Areale des rechten PFC auf den frühen linken Handgebrauch zurück.

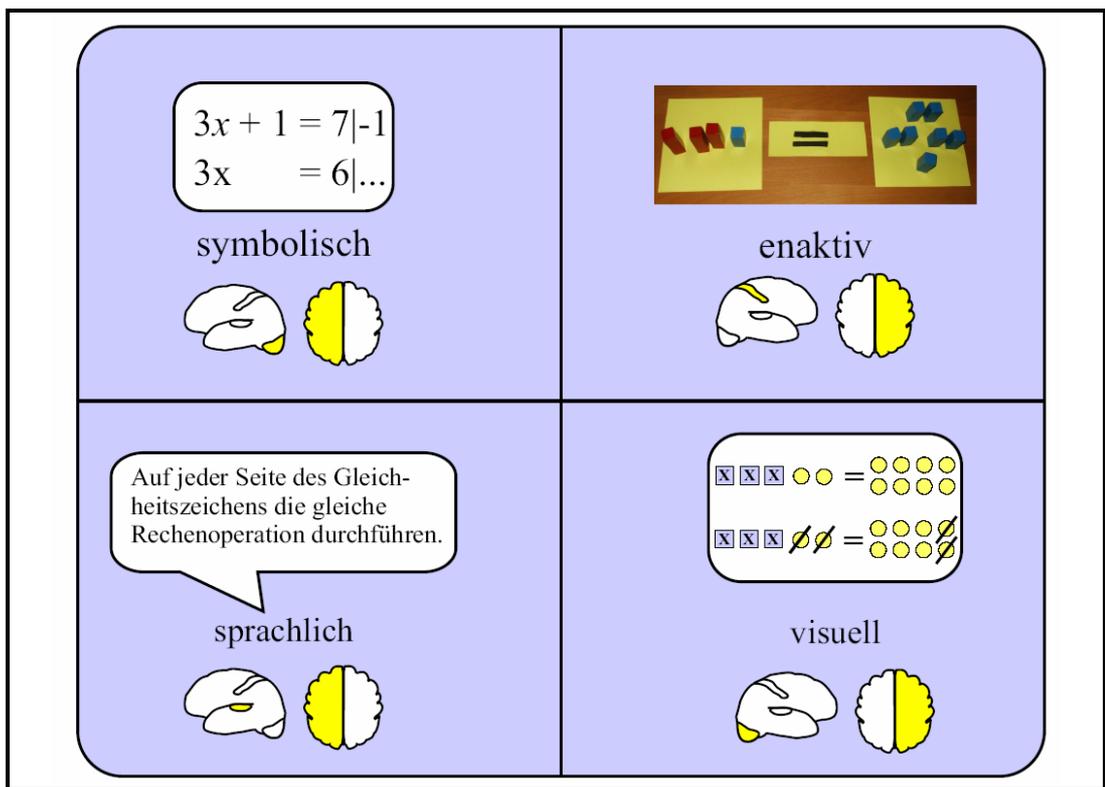


Abbildung 5.19

Die vier Darstellungsebenen nach Bruner (vgl. Zech, 1998) am Beispiel eines einfachen linearen Gleichungssystems mit den von den Schülern zugeordneten beteiligten neuronalen Systemen.

Die von den Schülern aus den Unterrichtsinhalten abgeleitete grundsätzliche asymmetrische Verarbeitung von mathematischen Aufgabenstellungen (s. Abbildung 5.19) ist wissenschaftlich nicht erst seit den

Studien von Zhang et al. (2005) hinterlegt. Dehaene und Cohen haben 1997 ein anatomisch-funktionelles Zahlenmodell entwickelt, das auf der asymmetrischen Verarbeitung von Rechenoperationen in den beiden Hemisphären beruht. Wie in der von den Schülern erarbeiteten Vorstellung unterscheiden auch Dehaene und Cohen (1997) linkshemisphärische mathematische Leistungen, die sich an die Sprachfunktion (= lineare Verarbeitung) assoziieren, und rechtshemisphärische Leistungen, die auf visuellen Reizmustern (= komplexe Verarbeitung) beruhen. An diesem Beispiel zeigt sich, wie das *parallel-serielle Hemisphärenmodell* dazu beiträgt, kognitive Funktionen auf der Ebene von Schülerwissen zu strukturieren und so Grundvorstellungen der Neurobiologie des LERNENS zu etablieren, die wissenschaftlichen Standards genügen.

5.5.3 Reflexion der Unterrichtseinheiten

Beim Abschluss der Unterrichtseinheiten zum Thema LERNEN unter Berücksichtigung des parallel-seriellen Hemisphärenmodells habe ich mich *gegen* einen Fragebogen und *für* persönliche Statements im Unterrichtsgespräch entschieden, da wir die individuellen Eindrücke erfassen und gemeinsam zur Diskussion stellen wollten. Beim Reflexionsgespräch war sich die gesamte Lerngruppe einig, dass die Unterrichtsreihe zu einem bewussten Umgang mit dem Prozess des LERNENS geführt hat. Insbesondere für das Berufsbild der Erzieher wurde die Entwicklung der neuronalen Systeme in kritischen Reifungsphasen als sinnvolle Ergänzung zum Unterricht der Erziehungswissenschaften empfunden, in dem die Entwicklungsphasen nach Freud und Piaget erarbeitet wurden und erst durch die Neurobiologie zu einer ganzheitlichen Sichtweise zusammengefügt werden.

Fünf von 16 Schülern haben spontan über sich gesagt, dass sie auf Grund der Informationen über lineare und komplexe Verarbeitungsstrategien ihren Lerntyp besser einschätzen konnten und ihr Lernverhalten nachhaltig geändert haben. Dieses Bild zeigte sich auch in einer mündlichen Abiturprüfung, die die

Verarbeitungsstrategien der beiden Hemisphären zum Thema hatte. Die Kandidatin sagte, dass gerade dieses Thema sehr essentiell gewesen sei, da sie sich als überdurchschnittlich rechtshemisphärisch einschätzte. Die Orientierung an seriellen Prozessen habe ihr bei der Klausur- und Prüfungsvorbereitung sehr geholfen. Speziell während der mündlichen Prüfung war ihr mehr als vorher bewusst geworden, dass sie nicht so linear disponiert sei, wie ihre Mitschüler und besonders auf die sequenzielle Anordnung der Informationen in ihrem Prüfungsvortrag achten sollte. Diese Äußerungen zeigen, dass die Behandlung von seriellen und parallelen Schaltkreisen im Unterricht zu einem reflektierten Schülerverhalten führen kann.

Den Ablauf der Workshops haben auch Außenstehende, zum Beispiel die Schulleitung, als sehr positiv empfunden. Die Schüler haben autonom die Workshops geplant, durchgeführt und mit der anderen Lerngruppe reflektiert. Dabei haben sie auf eine starke Vernetzung der Lerntipps mit den Funktionen des Gehirns geachtet. Bei der Reflexion der Workshops durch die Probanden wurde als besonders positiv herausgestellt, dass die Lerntipps an den Funktionsweisen des Gehirns erläutert wurden und dass die Workshops von Schüler und nicht vom Lehrer geleitet wurden.

Insgesamt hatte die Unterrichtsreihe auch bei der Schulleitung einen so positiven Eindruck hinterlassen, dass der Leistungskurs Biologie die Workshops und die zugrunde liegenden neurologischen Grundlagen auf repräsentativen Veranstaltungen vorgestellt hat. So scheint es sinnvoll, die Konzeption auch für andere Schulformen zu übernehmen. In allgemein bildenden Schulen mit der Sekundarstufe II können die Leistungskurse und Grundkurse Biologie in ein Methodentraining für jüngere Schüler eingebunden werden. Beim Unterrichten wird mit den neuronalen Grundlagen des LERNENS von den älteren Schülern reflektierter umgegangen und es erhöht sich ihre Reflexionsfähigkeit beim eigenen Lernverhalten. Bei den jüngeren Schülern etabliert sich zu einem sehr frühen Zeitpunkt eine naturwissenschaftlich fundierte Vorstellung von Lernprozessen. In Schulen, in denen nur die Sekundarstufe I unterrichtet wird,

kann die Leitung der Workshops an die Teilnehmer der Wahlpflichtkurse in den Klassen neun und zehn delegiert werden. Dazu sollten die Lerninhalte der Unterrichtsreihe zum Thema LERNEN natürlich noch einmal didaktisch reduziert werden. Der Vorteil, dass das Thema der Gehirnfunktionen Schüler fasziniert, kann somit an allen weiterführenden Schulen zu einer höheren Sensibilität des eigenen Lernverhaltens führen.

6 ZUR REFLEXION NEURODIDAKTISCHER IDEEN

Die Beispiele aus dem Biologieunterricht haben gezeigt, dass der Frontalunterricht heutzutage nicht mehr im Mittelpunkt des naturwissenschaftlichen Unterrichtsgeschehens stehen sollte. Besonders die einseitig sprachliche Vermittlung der Unterrichtsinhalte steht im Focus der Kritik der Neurobiologie. Eine vom Lehrer vorformulierte Vorgehensweise im Unterricht spricht bei den Zuhörern überwiegend nur die auditiven Systeme der linken Gehirnhälfte an, während die Strukturierung des Unterrichts beim Lehrer beide Hemisphären und ihre Subsysteme beansprucht. Das muss dazu führen, dass der Lehrer in seinem Unterricht am meisten lernt. Die linearen Sprachinformationen erreichen das Schülergehirn wie durch ein Nadelöhr und müssen dort wieder in einem Nervennetz gespeichert werden. Die beim Zuhörer ausgelösten Assoziationen bestimmen dabei, wie vernetzt die Informationen dann eingebunden werden. Die Abbildung 6.1 zeigt symbolisch die Wirkung der linearen Kommunikation. Die gut vernetzten Informationen mit vielen Assoziationen im Lehrergehirn sollen durch die linear organisierte Sprache in ein weiteres vernetztes System übertragen werden. Im Schülergehirn werden vielleicht aber nur wenige Assoziationspunkte angesprochen. Die von Vester (1998) beschriebenen Interferenzen bei der verbalen Kommunikation sind vorprogrammiert, da Verständnisschwierigkeiten durch immer neue Botschaften des Lehrers kompensiert werden sollen. Diese führen bei einem anders disponierten Lernenden zu Verwirrungen, da sie nicht über die Lernerfahrungen des Lehrers verfügen.

Im neurobiologisch orientierten Unterricht hat die Sprache allerdings mehr eine strukturierende als eine informierende Funktion, da durch Sprache serielle Verarbeitungsmuster in die Nervennetze eingebunden und stabilisiert werden. Wenn der Lernende im Unterricht selbst möglichst oft verbal kommunizieren kann, muss er die Informationen immer wieder gliedern und in den einen passenden Kontext bringen. So werden serielle Verschaltungsmuster in den Nervennetzen etabliert, die später genutzt werden können. Die eigenen sprachlichen Aktivitäten der Schüler gewährleisten eine breitere neuronale

Verarbeitung der Informationen, die eine höhere Präsenz bei der Verfügbarkeit haben.

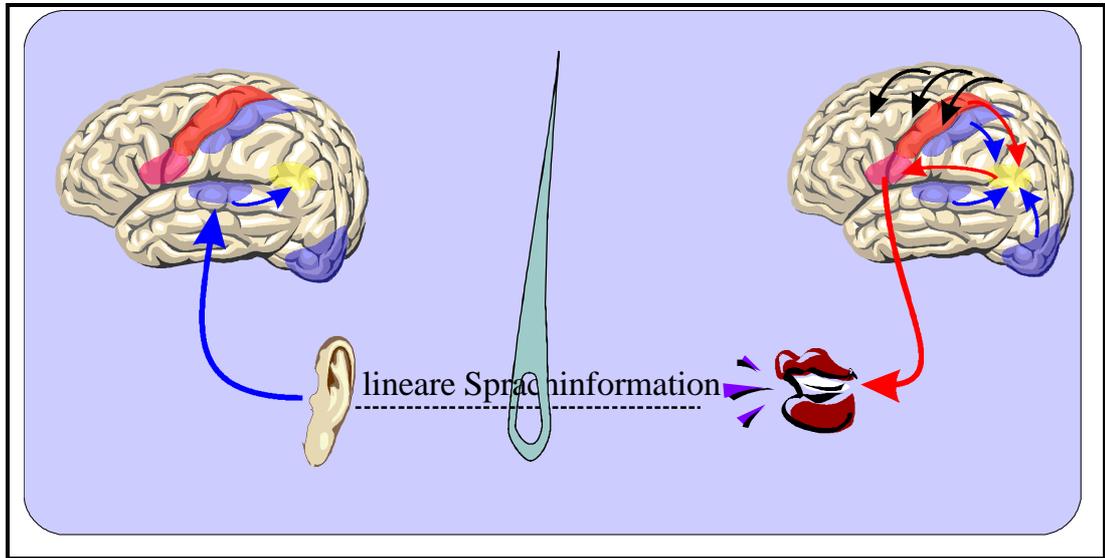


Abbildung 6.1

Symbolische Darstellung der sprachlichen Kommunikation zwischen Schülergehirn (links) und Lehrergehirn (rechts) im Frontalunterricht.

Die Ausbildung solcher serieller Verarbeitungsprozesse wird schon in der Primarstufe zum Beispiel durch Schreibübungen vorstrukturiert. Die Studie von aktivitätsgesteuerten Reorganisationsprozessen lässt vermuten, dass durch diese motorischen Übungen der rechten Hand die linke Hemisphäre für weitere kognitive Funktionen vorstrukturiert wird, die auf linearen Verarbeitungsmustern beruhen. Die so vorstrukturierten Nervennetze sollten die Grundlage für einen strukturierten Sprachgebrauch und eine stringente Gedankenführung bilden. So sind bei einer frühen Einführung des Computers und der damit einhergehenden Benutzung der Tastatur auch negative Konsequenzen zu erwarten. Vielmehr sollte gerade in der Primarstufe auf eine konsequente Nutzung von Sprache und Schrift in der für die Ausprägung der Lateralität *kritischen Entwicklungsphase* geachtet werden. Insbesondere gilt es feinmotorische Fähigkeiten in diesem frühen Entwicklungszeitraum zu schulen. Denn gerade die prämotorischen Felder des PFC reifen in diesem Zeitraum. Zhang et al. (2005) weisen in ihren Studien zur asymmetrischen Verarbeitung von Rechenoperationen darauf hin, dass gerade der frühe Handgebrauch die prämotorischen Felder vorstrukturiert und sich später mit

ihnen höhere kognitive Funktionen (bei Zhang et al.: komplexe Rechenoperationen) in diesen Arealen integrieren.

Die Auswirkungen von Multimediaanwendungen auf das LERNEN ist seit etwa zehn Jahren ein Schwerpunkt in der pädagogischen Diskussion. Anhand des Hemisphärenmodells können strukturbedingte Veränderungen von Verarbeitungsmustern postuliert werden. Wie oben erwähnt, kann sich zum Beispiel ein früher Gebrauch von Computertastaturen negativ auf das Strukturieren von seriellen Verarbeitungsmustern auswirken. Trotzdem bieten die neuen Medien -betrachtet vor dem Hintergrund des *parallel-seriellen Hemisphärenmodells*- viele Chancen für ein gehirngerechtes LERNEN, wenn die Eigenaktivität der Schüler auch sprachlich umgesetzt wird.

Aufenanger (2004) beschreibt bei Kindern und Jugendlichen neue kognitive Kompetenzen beim Bewegen in dreidimensionalen virtuellen Räumen, bei der Aufnahme von simultan einfließenden Informationen und beim gleichzeitigen Ausführen mehrerer Prozesse, die er auf den frühzeitigen Gebrauch von Multimediaanwendungen zurückführt. Die frühe Konfrontation von Kindern mit den elektronischen Medien fällt aus neurobiologischer Sichtweise in eine kritische Phase der Ausprägung asymmetrischer Funktionen. Es kann postuliert werden, dass in dieser Entwicklungsphase verstärkt Schaltkreise reifen, die den Jugendlichen einen einfacheren Umgang mit elektronischen Medien ermöglichen. Auch beim Schreiben und Lesen von Hypertexten³ haben Kinder und Jugendliche einen klaren Vorteil gegenüber den Erwachsenen; das elektronische Medium stellt somit eine neue Kulturtechnik insbesondere der jungen Generationen dar (vgl. Auenfanger, 2002).

Hypertexte in multimedialen Medien sind im Gegensatz zu traditionellen Texten nicht linear aufgebaut, sondern bilden durch die Links⁴ eine vernetzte

³ Hypertexte: Texte auf elektronischen Medien, die durch ihre Verknüpfungen schnelle Verbindungen zu andern Seiten, Graphiken, etc. ermöglichen.

⁴ Links: Vernetzungsknoten in einem elektronischen Text zu einer anderen Seite, Graphik, etc.

Struktur (vgl. Kuhlen, 1991). Gerdes (1997) fordert, „die Auswirkungen des Hypertextes auf den Prozeß der Wissensaufnahme hinsichtlich der mentalen Strukturbildung ins Zentrum der Analyse“ zu stellen. Dabei ist die Vorstellung, dass sich die vernetzten Strukturen des Hypertextes direkt in die Vernetzung des Nervennetzes überträgt, längst überholt (vgl. Kuhlen, 1991) und aus neurobiologischer Sichtweise nicht mehr haltbar. Vielmehr konstruiert sich das Gehirn die Erinnerungen aus den präsentierten Informationen.

Das *parallel-serielle Hemisphärenmodell* bietet einen guten Ansatz zur dezidierten Analyse der ablaufenden mentalen Prozesse, wie sie Gerdes (1997) einfordert. Denn durch die komplexen Darstellungsweisen von Multimediaanwendungen werden die parallelen Verschaltungsstrukturen der rechten Gehirnhälfte angesprochen. Allerdings sind beim Erfassen der einzelnen Texte und beim Strukturieren der Informationen lineare Verarbeitungsstrategien gefordert. Eine aus den Studien von Auenfanger (2004) abgeleitete rechtshemisphärische Disposition der jugendlichen Mediennutzer vorausgesetzt, ergeben sich konkrete Konsequenzen für den Einsatz von multimedialen Medien im Unterricht. Die früh erworbenen Kompetenzen der Schüler komplexe Informationen zu erfassen, sollte im Unterricht genutzt werden. Die mittlerweile gute Ausstattung mit Computern und anderen Multimediageräten ermöglicht diesen Zugang. Hierdurch können die Schüler ihre eigenen Dispositionen in den Unterricht einbringen. Der alt hergebrachte pädagogische Leitspruch „den Schüler dort abzuholen, wo er steht“ verliert im Kontext komplexer Verarbeitungsstrategien immer mehr an Bedeutung und sollte durch „den Schüler sich selbst entwickeln lassen“ ersetzt werden. Moderne Medien helfen den Schülern dabei, sich von den Lehrern zu emanzipieren und so sich im Sinne von aktivitätsgesteuerten Reorganisationsprozessen vom individuellen strukturellen Zustand der Nervennetze zu entwickeln.

Das Einfordern von sequenziellen Verarbeitungsmustern sollte auch im multimedialen Unterricht nicht vernachlässigt werden. Dieses ist meist mit einfachen Mitteln zu erreichen. Die Schülerleistungen ‚Erstellen einer Gliederung‘, ‚Bilden einer Reihenfolge‘, ‚Konzipieren eines stringenten Vortrages‘ oder ‚Verfassen eines Resümees‘ etablieren auf verschiedenen

Anforderungsniveaus linkshemisphärische Strukturen. Doch aus eigener Erfahrung weiß ich, dass eine konsequente Umsetzung oft schwierig ist, da sich die Schüler mit den schnell erworbenen und oberflächlichen Informationen zufrieden geben. Gerade in der hektischen Situation des rechnergestützten Unterrichts zeigen sich die Vorteile der einfachen Modellvorstellung ‚beide Hemisphären zu trainieren‘: Das Einfordern linearer Prozesse kann dem Lernenden plausibel erläutert und schnell in eine methodische Reflexion eingebunden werden.

Im modernen Mathematikunterricht gehört die Computerunterstützung heute zu den wichtigsten methodischen Werkzeugen. Computeralgebra-Systeme (CAS) und Dynamische Geometriesysteme (DGS) helfen komplexe mathematische Ausdrücke zu berechnen und Funktionen zu visualisieren. Durch dieses Hilfsmittel ist es möglich, auch in der Mathematik der Sekundarstufe II dem Lernenden mehrere Darstellungsebenen zu bieten und seine Vorstellungskraft für den jeweiligen Themenkomplex auszubilden. Computeralgebra-Systeme bieten dafür ein Algebra- und Graphikfenster an, die verschiedene Verarbeitungsstrategien ansprechen (vgl. Abbildung 6.2).

Außerdem sind Computeralgebra-Systeme ein gutes Beispiel dafür, wie der computergestützte Unterricht zur Emanzipation der Schüler vom Lehrer beitragen kann (vgl. Horstmann, 2000). Fehler können direkt am Computer ohne die Hilfe des Lehrers erkannt werden. So müssen die Schüler die für sie jetzt offensichtlichen Probleme durch neue Lösungsstrategien antizipieren. So werden bei den Lernenden wichtige Kontrollfunktionen des Stirnhirns aktiviert, und es setzen strukturbildende Prozesse in den Nervenetzen des Stirnhirns ein.

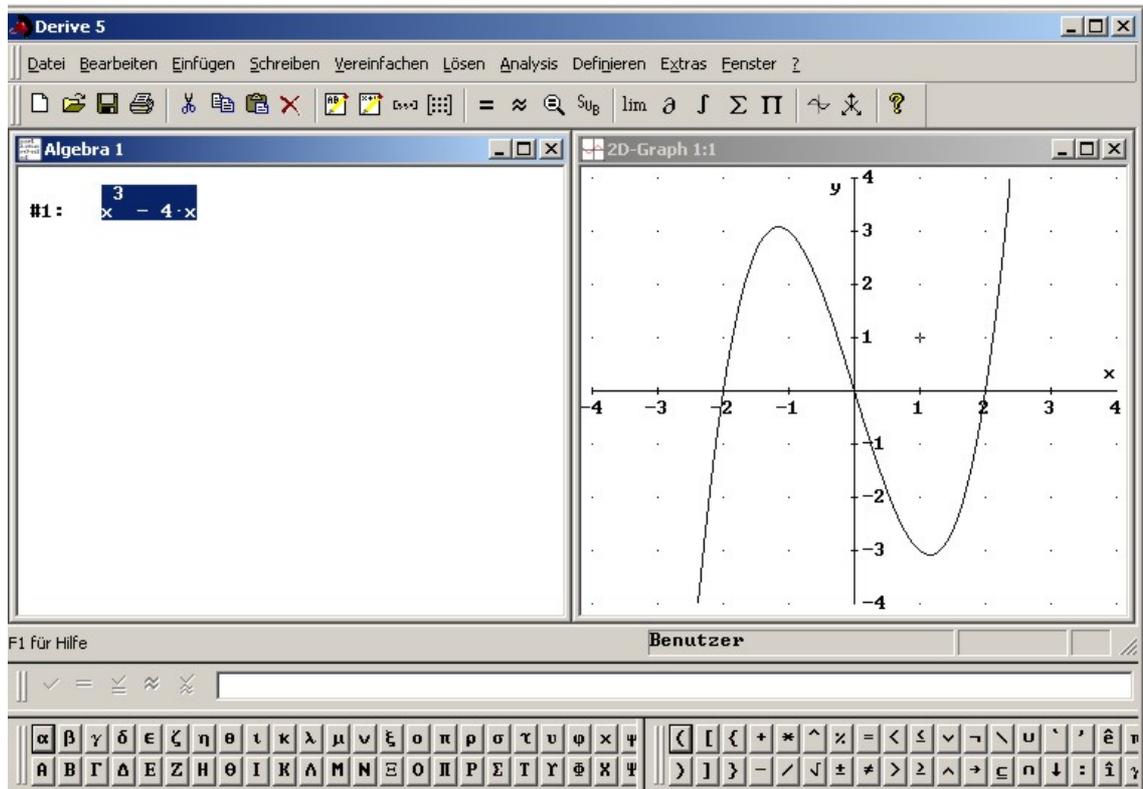


Abbildung 6.2

Bildschirmdarstellung des CAS DERIVE mit symbolischem und visuellem Darstellungsfenster

Nicht nur aufgrund der Erkenntnisse von Studien zum Bildungsstand unserer Schüler hat sich eine Vielzahl von Bewegungen gegründet, die auf eine neue Aufgabenkultur in den Naturwissenschaften und der Mathematik hinarbeiten (vgl. Istrongruppe, 1992). Gerade in der mathematischen Fachdidaktik werden Schwerpunkte bei offenen Aufgabenstellungen gesetzt (vgl. Weigand, 1997). Stupide Übungsaufgaben, in denen bestimmte Lösungsverfahren immer wieder geübt werden, führen nur zum Ausbau von linearen Verarbeitungsstrukturen im Gehirn (vgl. Haffelder, 1998). Offene Aufgaben, in denen eine ganzheitliche Problemstellung Ideenproduktion und Informationskoordination verlangt, sprechen komplexere und damit rechtshemisphärische Verarbeitungsstrategien an. In Kapitel 5.3.5 ist der Einfluss von rechtshemisphärischen Lösungsstrategien auf das problemlösende Denken am Beispiel einer biologischen Aufgabe dokumentiert worden. Hier bietet der computergestützte Unterricht adäquate

Hilfsmittel an, die den Lernenden ein aktives Erarbeiten von komplexen Aufgabenstellungen ermöglichen.

Die Reifung von seriellen und parallelen Verarbeitungsmustern verläuft in kritischen Phasen, dessen plastische Umbauprozesse nach der Pubertät als stark eingeschränkt gelten (vgl. Kapitel 2.3). Dieser theoretische Hintergrund hat im Schulunterricht konkrete Auswirkungen. Am Beispiel des Satzes des Pythagoras, der in der 9. Klasse der Sekundarstufe I Unterrichtsgegenstand ist, werden die Zusammenhänge zwischen dem Fehlen früher Lernerfahrungen und späterer Defizite deutlich. Im Mathematikunterricht wird der Satz des Pythagoras an einfachen, zweidimensionalen Dreiecken eingeführt und geübt. Meist beherrscht eine Klasse die Berechnung von Seitenlängen im rechtwinkligen Dreieck auch nach wenigen Unterrichtsstunden. Wenn allerdings die eingeübte Regel auf dreidimensionale Objekte, wie zum Beispiel Pyramiden oder Quader, angewendet werden soll, kommt es oft zum Verständnisbruch. Doch liegt es nicht an der Anwendung des Satzes des Pythagoras, sondern an der rechtshemisphärischen Vorstellungskraft für die Raumwinkel.

Vor dem Hintergrund des *parallel-seriellen Hemisphärenmodells* betrachtet, können Defizite der rechtshemisphärischen Raumverrechnung durch Konfrontation mit dreidimensionalen Strukturen aufgearbeitet werden. In den Klassen 5 bis 7 bietet sich dazu das Basteln von geometrischen Körpern an. Im Gymnasium Raabeschule in Braunschweig wurden in der siebten Klasse Platonische Körper gebastelt (vgl. Abbildung 6.3 und Abbildung 6.4).

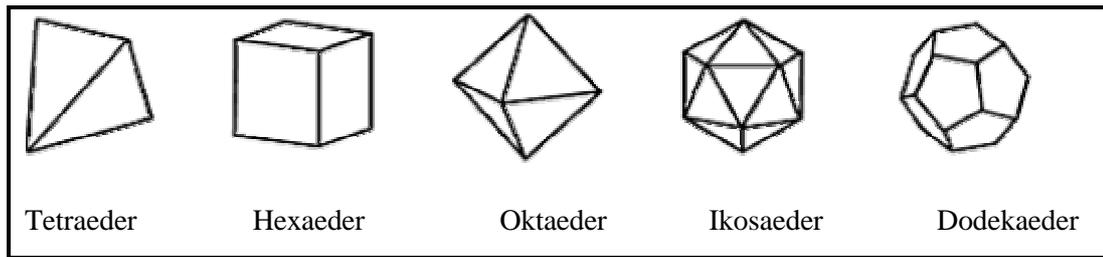


Abbildung 6.3
Die fünf Platonischen Körper

Im Unterricht wird die Erfahrung der dritten Dimension durch das Erarbeiten auf der enaktiven Darstellungsebene in den Focus gestellt. Durch das Ertasten und räumliche Erleben der geometrischen Strukturen werden räumliche Verarbeitungsprozesse in Gang gesetzt. Lehrer, die eine solche Vorübung nur als Zeitverschwendung und Spielerei empfinden, können durch einen neurodidaktischen Ansatz auf einer naturwissenschaftlichen Argumentationsebene zum Nachdenken angeregt werden.

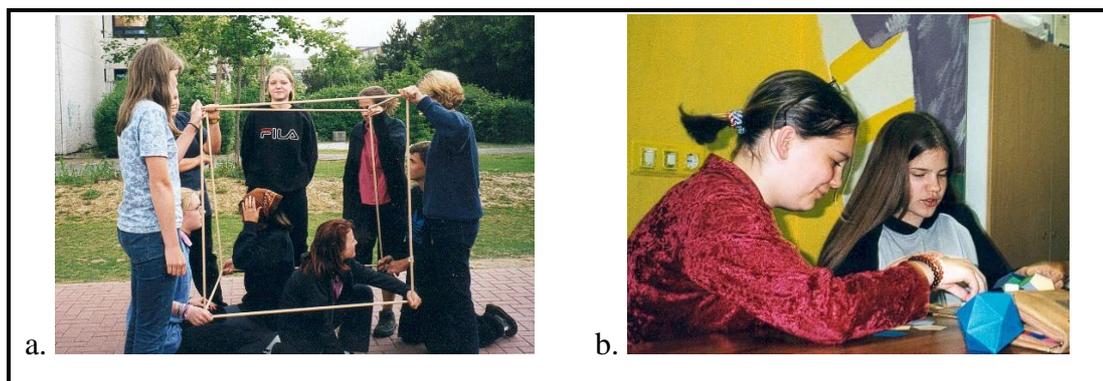


Abbildung 6.4
Konstruktion (a) und Basteln (b) von Platonischen Körpern in einer Klasse 7 des Gymnasiums Raabeschule in Braunschweig; aus: <http://raabe.bs.ni.schule.de>; am 23.11.2005

Gerade in der Mathematik gibt es weitere Beispiele dafür, dass sich Schüler rechtzeitig ein schlüssiges Bild von mathematischen Strukturen konstruieren müssen. Der Umgang mit Bruchzahlen ist ein weiterer Themenkomplex, in dem ein früher, enaktiver Zugang zu einem besseren Verständnis führt. Zum Beispiel eröffnen das Ausschneiden von ‚Tortenstücken‘ und das aktive Rechnen mit haptisch erfassbaren mathematischen Strukturen vor

allen bei leistungsschwachen Schülern die Möglichkeit, eine sinnvolle Vorstellung vom Teilen zu konstruieren.

Aus neurodidaktischer Sicht ist offensichtlich nicht immer eine Beliebigkeit des zeitlichen Einsatzes von Unterrichtsinhalten und -methoden gegeben. Zwar unterscheiden sich die kritischen Phasen in ihrer individuellen Ausprägung bei jedem Menschen, doch bleiben grundlegende Gesetzmäßigkeiten der Gehirnentwicklung erhalten. Die Entfaltung der Gehirnasymmetrie beim Menschen macht exemplarisch deutlich, dass die aktivitätsgesteuerten Reorganisationsprozesse für räumliche Verarbeitungsstrategien ‚just in time‘ etabliert werden sollten, um sie dann bei weiterführenden kognitiven Prozessen nutzen zu können. Die Orientierung an den Lernprozessen im Gehirn zeigt weiterhin, dass sich jedes Schülergehirn die Informationen selbst bilden muss. Eine bloße Kopie der Informationen von der Tafel, die dem Gedankengang des Lehrers folgen, ist nicht möglich. Beim Transfer auf abstraktere symbolische und sprachliche Darstellungen sollten deshalb die früheren enaktiven Lernerfahrungen genutzt und die Verbindungen zu diesen Schülervorstellungen gezielt ausgebaut werden. Durch methodische Reflexionsphasen, die das Lernverhalten mit vereinfachten Modellvorstellungen neurobiologischer Prozesse motivieren, kann eine höhere Akzeptanz bei den Schülern für das Nutzen möglichst vieler Darstellungsebenen bewirken.

In didaktischen Seminaren werden die Teilnehmer heutzutage mit wohlklingenden Namen konfrontiert. „EVA“ (Eigenverantwortliches Lernen, vgl. Klippert, 1994) oder das berühmt berüchtigte „LL“ (Lernen lernen) sind nur zwei Beispiele dafür. Dahinter verbergen sich gut ausgearbeitete methodische Konzepte, die besonders in Lehrerfortbildungen und Lehramtsanwärterseminaren immer öfter besprochen werden. Allerdings scheinen auch diese Methoden nur weitere Schlagwörter im pädagogischen Dschungel der Konzepte zu werden. Die Einblicke in die Prinzipien des neuronalen LERNENS bieten erstmalig die Bewertungsmöglichkeiten anhand der Verarbeitungsstrategien des Gehirns. So fällt auf, dass sowohl das ‚Eigenverantwortliche Lernen‘ als auch das ‚Lernen durch Lehren‘ die Schüleraktivität in den Vordergrund stellt. Diese Konzepte werden hier durch die Beschreibung der aktivitätsgesteuerten Umbauprozesse von

Nervennetzen neurobiologisch hinterlegt. Es fällt jedoch nicht immer leicht zu differenzieren, ob die Schüleraktivität zu einer sinnvollen Vernetzung führt, oder ob es sich um eine Scheinaktivität handelt, bei der die Schüler die Ideen des Lehrers nur stupide abarbeiten oder zum wilden Malen von Plakaten verleitet werden. Die Verarbeitungsmuster des Gehirns bieten hier eine gute Möglichkeit das eigene pädagogische Handeln zu reflektieren und zu evaluieren. Die Aufteilung in lineare und komplexe Verarbeitungsstrategien ermöglicht dabei eine Orientierungshilfe. Das Modell der Hemisphärenfunktionen ist in dieser Hinsicht eine Visualisierung der Verarbeitungsstrukturen und hilft die beiden unterschiedlichen Verarbeitungssysteme zu differenzieren. Die Beispiele aus den konkreten Unterrichtsreihen haben gezeigt, wie anhand dieses Modells kognitive Prozesse während der Arbeitsphasen besser strukturiert werden können.

Die Modellvorstellung von der Ausbildung serieller und paralleler Schaltkreise durch die gezielte Ansprache der entsprechenden Hemisphäre geht dabei über die Entwicklung singulärer Schülerkompetenzen hinaus. Die Erforschung der Ordnungsschwelle und anderer linearer Phänomene hat längst gezeigt, dass durch gezielte sequenzielle Handlungen allgemeine linkshemisphärische Fähigkeiten geschult werden können. (vgl. Calvin, 1994).

Auch die komplexen Verarbeitungsstrategien der rechten Gehirnhälfte können durch das Einfordern kreativer Lösungsideen in offenen Aufgabenstellungen etabliert werden (vgl. Blakeslee, 1992). Hier finden sich wesentliche Elemente der von Klafki (1963) beschriebenen Bildungstheorie wieder. So fordert Klafki bei der Auswahl der Unterrichtsinhalte und -methoden eine Zukunftsbedeutung ein. Allerdings leitet Klafki seine theoretischen Ausführungen historisch unter anderem aus den Wurzeln von Humboldt ab (vgl. Klafki, 1996). Dadurch wirken seine Ausführungen eher abstrakt. Demgegenüber konkretisiert die neurobiologische Modellvorstellung des Ausbaus serieller und paralleler Verschaltungsmuster Klafkis Ideen aus naturwissenschaftlicher Sichtweise: Indem die rechte oder linke Hemisphäre gezielt angesprochen werden, etablieren sich strukturelle Grundlagen, die einerseits das stringente Abarbeiten andererseits die kreative Ideenproduktion ermöglichen. Durch das Ausbilden eines solchen Grundgerüsts der Informationsverarbeitung erhalten die Schüler

Kompetenzen, die sie in die Lage versetzen, Problemstellungen der Zukunft zu lösen, deren Existenz wir heute noch nicht einmal erahnen können. In diesem Kontext sind durch gezielte Aktivitäten angestoßene Umbauprozesse der seriellen und parallelen Schaltkreise ein aktueller Beitrag zu den bildungstheoretischen Überlegungen von Klafki und Heinemann aus den 60er und 70er Jahren (vgl. Meyer, 1994).

Der Vorteil des *parallel-seriellen Hemisphärenmodells* liegt in der plastischen Vorstellungskraft für die kognitiven Funktionen, die auch durch die Visualisierung der Verschaltungsmuster (vgl. Abbildung 1.2) gewährleistet wird. Bei der Evaluation der Unterrichtsinhalte und -methoden kann der Lehrende sich an den Schlüsselfunktionen der beiden Hemisphären orientieren und so beide Systeme fördern.

Die Orientierung an den Stirnhirnfunktionen sollte Lehrer anspornen Planungsprozesse ihres Unterrichts in die Hände von Schülern zu legen. Der Transfer der aktivitätsgesteuerten Reorganisationsprozesse auf die Nervenetze des Stirnhirns zeigt, dass auch die speziellen Fähigkeiten des Stirnhirns von den Schülern selbst geübt werden müssen. Durch Planungsphasen im Unterricht, indem zum Beispiel Lerninhalte und -methoden vorstrukturiert werden, übt sich der Lernende in wissenschaftspropädeutischen Bezügen zu denken. Dabei ist die zeitliche Abfolge entscheidend. Durch diese Planungselemente üben sich Schüler in historisches Denken ein.

Die Antizipationsfähigkeit ist eine weitere herausragende Stirnhirnfunktion. Die Chance eigene Fehler machen zu dürfen, motiviert Schüler auch zu eigenen Lösungsstrategien, die oft nicht in das Muster eines linear organisierten Unterrichts passen. Die Antizipation von Lernschwierigkeiten führt beim Lernenden genau wie die selbsttätige Planung zu mehr Transparenz im Lernprozess, da die eigene Entwicklungsebene des individuell geformten neuronalen Netzwerkes genutzt werden. Außerdem müssen auch hoch komplexen Stirnfunktionen dynamisch in die neuronale Struktur integriert werden. So kann die erworbene Antizipationsfähigkeit auch in anderen Lern- und Lebenssituationen genutzt werden, da die Nervenetze entsprechend

vorstrukturiert sind. Auch hier ist das Verständnis plastischer Reorganisationsprozesse in neuronalen Systemen unverzichtbar, denn eine breite Masse meiner Kollegen halten solche Methoden noch für Spielereien, die allenfalls in der Referendariatsausbildung ihre Berechtigung haben. Ansonsten wären die Zeitrahmen für die Unterrichtsinhalte zu eng gesetzt. Hier fehlt das Verständnis, dass dynamisch vorstrukturierte Nervennetze viel effizienter lernen. Am Ende ergibt sich sogar ein Zeitvorteil, da die richtig vorbereiteten neuronalen Strukturen Informationen schneller integrieren können. So zeigt das HERA-Modell, dass gerade die asymmetrische Verarbeitung im Stirnhirn zu effizienten Gedächtnisleistungen führt. Durch die Aktivierung des Stirnhirns und die gleichzeitige Aktivierung der lateralen Verarbeitung in den Hemisphären werden so Lerninhalte besser gespeichert und in verschiedenen Situationen aktivierbar.

Das Unterrichten des Themas „Lernen“ im Kurshalbjahres Neurobiologie hat mir persönlich gezeigt, dass die Erkenntnisse der aktuellen Gehirn- und speziell der Plastizitätsforschung Schüler für das aktive Lernen faszinieren und ihnen einen reflektierten Umgang mit Lernprozessen vermitteln können. Aus meiner Sicht ist es absolut notwendig, die gleiche Faszination und Reflexionskompetenz auch in die Lehrerausbildung einfließen zu lassen.

7 LITERATURVERZEICHNIS

- Artelt, C., Baumert J., Klieme E., Neubrand M., Prenzel M., Schiefele U., Schneider W., Schümer G., Stanat P., Tillmann K.-J., Weiß M. (Hrsg.) (2001): „PISA 2000 Zusammenfassung zentraler Befunde“ Max-Planck-Institut für Bildungsforschung, Berlin.
- Aschersleben, K. (1999): „Frontalunterricht - klassisch und modern“, Luchterhand Verlag, Neuwied
- Aufenanger, S. (2001): „Wie die neuen Medien Kindheit verändern“ in: medien praktisch, 25, S. 4-7.
- Aufenanger, S. (2004): „Mediensozialisation. Aufwachsen in einer Medienwelt“, in: „Computer und Unterricht“, Heft 53, S. 6-9
- Bagorda, F, Teuchert-Noodt, G, Lehmann, K (2006): „Isolation rearing or methamphetamine traumatization induce a "dysconnection" of prefrontal efferents in gerbils: implications for schizophrenia". *J. Neural Transm.* 113 (3) S. 365-379
- Basser, L.S. (1962): „Hemiplegia of Early Onset and the Faculty of Speech with Special Reference to the Effects of Hemispherectomy“ in: „Brain“ Nr. 85 S. 427-460
- Baumert, J., Bos, W., Brockmann, J., Gruehn, S., Klieme, E., Köller, O., Lehmann, R., Lehrke, M., Neubrand, J., Schnabel, K.-U., Schwippert, K., Watermann, R. (2000): „TIMSS/III –Deutschland - Der Abschlussbericht: Zusammenfassung ausgewählter Ergebnisse der Dritten Internationalen Mathematik- und Naturwissenschaftsstudie zur mathematischen und naturwissenschaftlichen Bildung am Ende der Schullaufbahn“.
- Benninghoff (1994): „Benninghoff-Anatomie“; Band 2; 15. Auflage; München; Urban und Schwarzenberg Verlag.

- Berreb, A.S. Fitch, R.H., Rlaphe D.L. und Deneberg, J.O. (1988): „Corpus Callosum; Region Specific Effects of Sex, Early Experience and Age“ in: Brain Research Nr. 438, S. 216-224.
- Berridge C.W., España R.A., Stalnaker T.A.: (2003): „Stress and coping: asymmetry of dopamine efferents within the prefrontal cortex“, in: Hugdahl K. und Davidson R. (Herg.) „The Asymmetrical Brain“; MIT Press; Cambridge MA, S. 69–104.
- Betz, D. & Breuninger H. (1996): „Teufelskreis Lernstörungen - Theoretische Grundlagen und Standardprogramm“; 4. Aufl.; Beltz - Psychologische Verlag Union, Weinheim.
- Bickel, H., Eckenbrecht, D. Krull, H.-P. Loth, U. und Ponzelar-Warter, E.: (1997): „Natura: Neurobiologie und Verhalten“ Ernst Klett Verlag, Stuttgart.
- Birkmayer W. und Riederer P. (1986): „Neurotransmitter und menschliches Verhalten“; Springer Verlag, Wien.
- Bishop, D. (1993): „Language Development After Focal Brain Damage“ in „Language Development Exceptional Circumstances“, Hrsg. Bishop, D und Mogford K., Hove Verlag, Erlbaum (UK).
- Blaesing, B., Nossoll, M., Teuchert-Noodt, G., Dawirs, R.R. (2001): Postnatal maturation of prefrontal pyramidal neurones is sensitive to a single early dose of methamphetamine in gerbils (*Meriones unguiculatus*). *J. Neural Transm.* 108, S. 101-113.
- Blakeslee, T.S (1992): „Das rechte Gehirn: Das Unbewußte und seine schöpferischen Fähigkeiten“; Braunschweig; Aurum Verlag.
- Bründel, H. (1990): „Welche Hand reicht ihnen das Schulkind? Über Händigkeit, Lateralität und Gehirnasymmetrie“; in: „Psychologie, Erziehung und Unterricht“; Nr.37; S. 123-130
- Buchner, Christina (1997): „Brain-Gym und Co.: kinderleicht ans Kind gebracht“, VAK Verlags GmbH

- Butz, M, Teuchert-Noodt, G (2006): „Lernen durch Lehren formt die Netzwerkbildung im Gehirn. Simulation struktureller Entwicklung in neuronalen und sozialen Netzwerken.“ In: „Praxis der Naturwissenschaften Biologie in der Schule.“, Aulis Verlag Deuber, Köln.
- Calvin, H.C. (1994): „Einsicht ins Gehirn: Wie Denken und Sprache entstehen“; München; Carl Hanser Verlag.
- Campbell N. A. (1998): „Biologie“, 1. Nachdruck, Spektrum Verlag, Heidelberg.
- Collins, R.L. (1969): „On the Inheritance of Handedness II: Selection for Sinistrality in Mice“; in: Journal of Heredity Nr. 60; S. 117-119.
- Corballis, und M. Morgan, M.J. (1978): „On the Biological Basis of Human Laterality: I Evidence for a Maturational Left-Right Gradient“; in: „Behavior and Brain Sciences“ Nr.2; S. 261-336.
- Damasio, Antonio R. (1997): „Descartes' Irrtum: Fühlen - Denken und das menschliche Gehirn“ Deutscher Taschenbuchverlag GmbH und Co KG; München.
- Dawirs, R.R. (1993): „Spontan und experimentell induzierte Neuroplastizität: Ausdruck eines allgemeinen Prinzips adaptiver Entwicklungsstrategien des Nervensystems; Habilitationsschrift“; Bielefeld.
- Dawirs, R.R., Teuchert-Noodt, G. und Czaniera, R. (1993): „Maturation of the dopamine innervation during postnatal development of the prefrontal cortex in gerbils (*Meriones unguiculatus*). A quantitative immunocytochemical study“; in Journal für Hirnforschung Nr. 34; S. 281-291.
- Dawirs, R.R., Teuchert-Noodt, G. und Kacza, J. (1992): „Naturally occurring degrading events in axon terminal of the dentate gyrus and stratum lucidum in the spiny mouse (*Acomys cahirinus*) during maturation, adulthood and aging“; in: Dev. Neurosci Nr. 14, S. 210-220.

- Ding, Y.-S., Fowler, J.S., Volkow, N.D., Gatley, S.J., Logan, J., Dewey, S., Alexoff, D. and Wolf, A.P. (1994) „Pharmacokinetics and in vivo specificity of [11C]dl-threo-methylphenidate for the presynaptic dopaminergic neuron“; *Synapse* 18, S.152-160.
- Dinter, C. (2002): „Einfluß extrinsischer Faktoren auf die Serotonin-Reifung im hippocampalen Dentatus. Eine immunhistochemische quantitative Studie an *Meriones unguiculatus*.“ Schriftliche Hausarbeit für das Lehramt, Sekundarstufe I und II, Universität Bielefeld.
- Doty, R.W. (1969): „Electrical Stimulation of the Brain in Behavior Cortex“; in „Annual Review of Psychology“, Nr. 20; S. 189-320.
- Duus, P. (1990): „Neurologisch- topische Diagnostik: Anatomie - Physiologie - Klinik“; Stuttgart; Georg Thieme Verlag.
- Eccles, J.C. (1975): „Gehirn und Seele: Erkenntnisse der Neurobiologie“; München; R Piper GmbH & Co [Originalausgabe Facing Reality; Heidelberg, Springer Verlag; 1970].
- Eccles, J.C. (1984): „Die Psyche des Menschen“; München; Ernst Reinhardt GmbH & Co Verlag; [Originalausgabe: „The Human Psyche“; Heidelberg; Springer Verlag 1980].
- Edelmann, W. (1988): „Suggestopädie, superlearning : ganzheitliches Lernen - das Lernen der Zukunft?“; Asanger Verlag Heidelberg.
- Efron, R. (1963): „The effect of handedness on the perception of simultaneity and temporal order“; in „Brain“ 86, S. 261-284.
- Fallon, JH, Loughlin, SE (1987): „Monoamine innervation of cerebral cortex and a theory of the roles of monoamines in cerebral cortex and basal ganglia“; in *Cereb Cortex* 6; S.41-127.
- Fargot, J. und Vauclair, J. (1991): „Manual Laterality in Non-Human Primates. A Distinction Between Handeness and Manual Specialization“; *Physiological Bulletin*; Nr. 109; S. 76-89.

- Förstl, H. (2002) „Frontalhirn: Funktionen und Erkrankungen“, Springer Verlag, Berlin.
- Franz, H.P. (1995): „Wir bauen eine Stadt“; in: „Computer und Unterricht“; Nr. 19 S. 17-21.
- Gardner, Howard (1991): „Abschied vom IQ - Die Rahmen-Theorie der vielfachen Intelligenz“; Klett-Cotta Verlag; Stuttgart.
- Gatley, J. S., Ding, Y.-S., Volkow, N.D., Chen, R., Sugano, Y. and Fowler, J. S. (1995) „Effects of L-DOPA on striatal uptake of d-threo-[11C]methylphenidate: implications for PET studies“, European J. Pharmacology 281, S. 141-149.
- Geschwind, N. and Behan, P. (1982): „Left Handless: Association with Immune Disease, Migraine and Developmental Learning Disorders“; in: Proceedings of the National Academy of Sciences, USA S. 5079-5100.
- Geschwind, N. and Behan, P. (1984): „Laterality, Hormones and Immunity“ in: „Cerebral Dominance: The Biological Foundations“; Hrsg. Geschwind, N. und Galaburda, N.; Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Geschwind, N. und Galaburda, N. (1987): „Cerebral Laterilization: Biological Mechanisms, Associaations and Pathology“; Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Grasby, P.M., Frith, C.D., Friston, K.J., Bench, C., Frackowiak, R.S.J. & Dolan, R.J. (1993): „Functional mapping of brain areas implicated in auditory-verbal memory function“, in: „Brain“, 116, S. 1-20.
- Grigonis, A.M., Murphy, E.H. (1991): „Organization of callosal connections in the visual cortex of the rabbit following neonatal enucleation, dark rearing, and strobe rearing“, J. Comp. Neurol. Okt, 22;312(4) S. 561-572.
- Haffelder, G. (1998): „Lernen optimieren - Lernstörungen verhindern“ in: „Co'Med“, Fachmagazin für Complementäre Medizin, Nr. 10/98.

- Haffelder, G. (2004): Internetseite: <http://www.haffelder.de/index2.html> 23.07.04, 13:53
- Hamilton, C.R. (1990): „Hemispheric Specialization in Monkeys“ in: „Brain, Circuits and Functions of the Mind“; Hrsg. Trevarthen C.R.; Cambridge University Press; Cambridge.
- Hamilton, C.R., Vermeire, B.A. (1988): „Complementary hemispheric specializations in monkeys“, Science 242, S. 1691-1694.
- Hanle, R. (1991): „Motorische Leistungsfähigkeit von Vorschulkindern in Abhängigkeit von Motorischer Stimulation, Pigmentation und körperlicher Reife“; Mainz.
- Hebb, D. O. (1949): „The Organisation of Behavior“; New York; John Wiley & Son Verlag.
- Hebb, D. O. (1975): „Einführung in die moderne Psychologie“; Weinheim; Beltz Verlag.
- Hedin-Pereira, C., Lent, R. und Jhaveri, S. (1999): „Morphogenesis of callosal arbors in the parietal cortex of hamsters“, Cereb Cortex. Jan-Feb 9(1), S.50-64.
- Heidrich, J.J. (1995): „Multimedia mit CD-ROMs in der Schule“; in: „Computer und Unterricht“; Nr. 18 S.63 u. 64.
- Heyne, F. (1989): „Funktionelle Asymmetrien des Menschen-wesentliche Komponenten seiner Individualität“; in: „Psychologie für die Praxis“; Nr. 7; S. 339-344.
- Horstmann, S. (2000): „Erarbeitung des Ableitungsbegriffes mit Hilfe des Computeralgebra Systems DERIVE unter besondere Berücksichtigung des Umgangs mit dem Grenzwertbegriff in der Jahrgangsstufe 11“ Schriftliche Hausarbeit für das Lehramt Sekundarstufe I/II, Studienseminar für das Lehramt für die Sekundarstufe II Hagen II.

- Horstmann, S., Teuchert-Noodt, G. (2000): „Informationen aus der Neurobiologie Teil 2: Chancen und Risiken der kognitiven Gehirnreifung im Kindes- und Jugendalter“. *Biologie in der Schule* 49, S. 116-119.
- Hubel, D. H (1989): „Auge und Gehirn: Neurobiologie des Sehens“, Spektrum der Wissenschaft Verlag, Heidelberg.
- Immelmann, K. [Hrsg.] (1982): „Verhaltensentwicklung bei Mensch und Tier“; Hamburg; Paul Parey Verlag.
- Innocenti, G.M., Aggoun-Zouaoui, D., Lehmann, P. (1995): „Cellular aspects of callosal connections and their development“ in: *Neuropsychologia* 33 (8); S. 961-987.
- Isseroff, A., Schwartz, M.L., Dekker, J.J., Goldman-Rakic, P.S. (1984): „Columnar organization of callosal and associational projections from rat frontal cortex“, in „*Brain Res.*“; Feb. 20; 293(2) S. 213-23.
- Jendrszczok, S., Horstmann, S., Teuchert-Noodt G. (2000): „Informationen aus der Neurobiologie Teil 3: Neurobiologie der Sprache vor dem Hintergrund von Selbstorganisation“ *Biologie in der Schule* 49, 172-175.
- Kandel, E.R. und Schwartz, J.S. (1996): „Neurowissenschaften“; Heidelberg; Spektrum Akademischer Verlag.
- Kiese, C. and Henze, K.-H. (1988): „Umfassende Lateralitätsbestimmung in der phoniatischen Klinik“; in: „*Praxis der Kinderpsychologie und Kinderpsychiatrie*“; Nr. 37; S. 11-16.
- King, M. A., Loid, P.M., Hunter, B.E und Walke,r D.R. (1989): “Biocytin: a versatile anterograde neuroanatomical tract-tracing alternative”, in: „*Brain Res.*“ 497: S. 361-367.
- Klafki, W. (1963): „Studien zur Bildungstheorie und Didaktik“, Beltz Verlag, Basel.
- Klafki, W. (1996): „Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik“, 5. Auflage Beltz Verlag, Basel.

- Klinghardt, Dietrich (2004): „Lehrbuch der Psycho-Kinesiologie : ein neuer Weg in der psychosomatischen Medizin“; 6. Aufl.;; INK - Institut für Neurobiologie; Stuttgart
- Klippert, H. (1994): „Methoden-Training- Übungsbausteine für den Unterricht“, 13. Auflage, Beltz Verlag, Basel.
- Knußmann, R. (1996): „Vergleichende Biologie des Menschen- Lehrbuch der Anthropologie und Humangenetik“ Stuttgart; Gustav Fischer Verlag.
- Kolb, B. und Whishaw (1996): „Neuropsychologie“, 2. Auflage, Spektrum Verlag, Heidelberg.
- Krasnegor, N.A.; Lyon, G.R. und Golman-Rakic, P.S. (1997) “Development of Prefrontal Cortex- Evolution, Neurobiology and Behavior”; The Maple Press Company; York – Pennsylvania.
- Kuhlen, R. (1991): „Hypertext ein nicht lineares Medium zwischen Buch und Wissensbank“, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Lake, D.A. und Bryden, M.P. (1976): „Handedness and Sex Differences in Hemispheric Asymmetrie“, in: Brain and Language Nr. 3, S. 266-282.
- Lehmann, K. (2001): „Zur Entstehung psychomotorischer Störungen aus der Wechselwirkung von präfrontalen Afferenzen, Dopamin und Serotonin im Caudatus-Putamen (Quantitative immunohistochemische Studien an *Meriones unguiculatus*)“, Dissertation, Fakultät für Biologie, Universität Bielefeld.
- Lenneberg E.H. (1967): „Biological Foundations of Language“; Wiley; New York.
- Lesting, J, Neddens, J und Teuchert-Noodt, G (2005): „Ontogeny of the dopamine innervation in the nucleus accumbens of gerbils“, in: „Brain Res.“ 1066 (1-2), 16-23.
- Levy, J. (1974): „Psychobiological Implications of Bilateral Asymmetry“; in: „Hemispheric Function in the Human Brain“; Herausgeber S. Dimond und S. Beaumont ; Halstead Press; New York.

- Levy, J. (1978): „Lateral Differences in the Human Brain in Cognition and Behavioral Control“; in: „Cerebral Correlates of Conscious Experience“; Hrsg. P. Buser und A. Rougeul-Buser; North Holland Publishing Co.; New York.
- Levy, J., Trevarthen, C.B. und Sperry, R.W. (1972): „Perception of Bilateral Chimeric Figures Following Hemispheric Disconnections“ in: *Brain* 95; S. 61-78.
- Lindvall, O und Björklund, A (1984): „General organization of cortical monoamine systems“; in: „Descarries, Reader und Jasper: Monoamine innervation of cerebral cortex“. Alan R. Liss, New York, S. 9-40.
- Loring, D.W., Meador, K., Lee, G., Murro, A., Smith, J., Gallagher, B., und King, D. (1990): „Cerebral Language Lateralization: Evidence from Intracarotid Amobarbitol Testing“ *Neuropsychologia* 28; S. 831-838.
- Lürken, A. (2000): „Funktionelle Asymmetrie und cerebrale Asymmetrien kortikaler Aktiviertheit“, Dissertation, Fakultät für Psychologie, Universität Trier.
- Mähringer, H. (1996): „Lateralität, Gehirnfunktion und Lernerfolg: Erhebung an Sehbehindertenschulen und Entwicklung eines gehirnfrendlichen Unterrichtskonzepts“, Dissertation, Päd. Hochschule Heidelberg.
- Maier, R. und Lünser, W. (1991): „Beobachtungen zur Hemisphärendominanz kortikaler sprachverarbeitender Prozesse und ihrer Dynamik im Verlauf der Aphasietherapie: Ein psychologischer Beitrag zur Diskussion der Neuroplastizitätshypothese“; in: „Folia Phoniatria“; Nr. 43; S. 36-43.
- Martin, J.P. (2002): „Lernen durch Lehren (LdL)“, in: „Die Schulleitung - Zeitschrift für pädagogische Führung und Fortbildung in Bayern“; Heft 4, S. 3-9.
- Mentor Biologie (1998): „Nervensystem, Hormonsystem und Immunsystem-Molekulare Grundlagen biologischer Kommunikation“; Mentor-Verlag, München.

- Merkert, Rainald (1992): „Medien und Erziehung - Einführung in die pädagogischen Fragen des Medienzeitalters“; Wissenschaftliche Buchgesellschaft; Darmstadt.
- Mesulam, M.M. (1998): „From sensation to cognition“, in: „Brain“ 121, S. 1013-1052.
- Meyer H. und Jank, W. (1996): „Didaktische Modelle“; Frankfurt am Main; Cornelsen Verlag.
- Meyer, H. (1996): „Unterrichtsmethoden: I Theorieband“; Frankfurt am Main; Cornelsen Verlag.
- Miller, M.W., Vogt, B.A. (1984): „Heterotopic and homotopic callosal connections in rat visual cortex“, in „Brain Res.“; Apr 9; 297(1), S. 75-89.
- Molfese D.L. und Betz J.C. (1988) „Electrophysiological Indices of the Early Development of Lateralization and Cognition and Their Implications for Predicting Later Development“ in Brain Lateralization in Children: Development, Hrsg. Molfese D.L und Segalowitz, Guilford Verlag, New York.
- Molfese, D.L., Freeman Jr., R.B. und Palermo, D.S. (1975): „The Ontogeny of Brain Lateralization for Speech and Nonspeech Stimuli“; in: „Brain and Language“ 2; S. 356-368.
- Nebes, R.D. (1978): „Direct Examination of Cognitiv Function in the Right and Left Hemisphers“ in: Hemispheric Asymmetry Function; M.Kinsbourne [Hrsg.]; Cambridge; Cambridge University Press.
- Nebes, R.D. (1978): „Direct Examinations of Callosal Syndromes in Neurological Practice“; in: „Epilepsy and the Corpus Callosum“ Reeves, A.G. [Hrsg.]; Plenum Press; New York.
- Neddens, J. (2002): „Zum Einfluß epigenetischer Faktoren auf die Reifung aminерger Neurotransmitter im Frontalhirn von Meriones unguiculatus: der Einsatz moderner Bildanalyzesysteme in

- neurobiologischen Fragestellungen“, Dissertation, Fakultät für Biologie, Universität Bielefeld.
- Neddens, J., Bagorda, F., Busche, A., Horstmann, S., Moll, G.H., Dawirs, R.R., Teuchert-Noodt, G. (2003): „Epigenetic factors differentially influence postnatal maturation of serotonin (5-HT) innervation in cerebral cortex of gerbils: interaction of rearing conditions and early methamphetamine challenge.“, in: „Dev Brain Res“, 146, S. 119-130.
- Neddens, J., Brandenburg, K., Teuchert-Noodt G., Dawirs R.R. (2001): „Differential environment alters ontogeny of dopamine innervation of the orbital prefrontal cortex in gerbils“, J Neurosci Res 63, S.209-213.
- Nolde, S.F., Johnson, M.K. & D’Esposito, M. (1998): „Left prefrontal activation during episodic remembering: an event-related fMRI study“, Neuroreport 9, S. 3509-3514.
- O’Leary D.D., Stanfield B.B. (1985) „Occipital cortical neurons with transient pyramidal tract axons extend and maintain collaterals to subcortical but not intracortical targets“, in: „Brain Res.“ 336(2); S. 326-330
- Olson, M. B. (1975) „Right or Left Hemispheric Informations Processing in Gifted Students“; in „The Gifted Child Quarterly“ 21/1 S. 116-121 zitiert in: Blakeslee, T.S. (1992): „Das rechte Gehirn: Das Unbewußte und seine schöpferischen Fähigkeiten“; Braunschweig; Aurum Verlag.
- Opitz, B., Mecklinger, A. and Friederici, A. D. (2003): „Functional Asymmetry of Human Prefrontal Cortex: Encoding and Retrieval of Verbally and Nonverbally Coded Information“, Learning & Memory 7(2), S. 85-96.
- Polascheck, D. (2004): „Zum Einfluss epigenetischer Faktoren auf die Reifung aminergener Neurotransmitter im Corpus amygdaloideum und zum Verhalten: eine quantitative Studie an Meriones unguiculatus“ Dissertation, Fakultät für Biologie, Universität Bielefeld.
- Pöppel, E. (1997): „Grenzen des Bewusstseins“, Insel-Verlag.

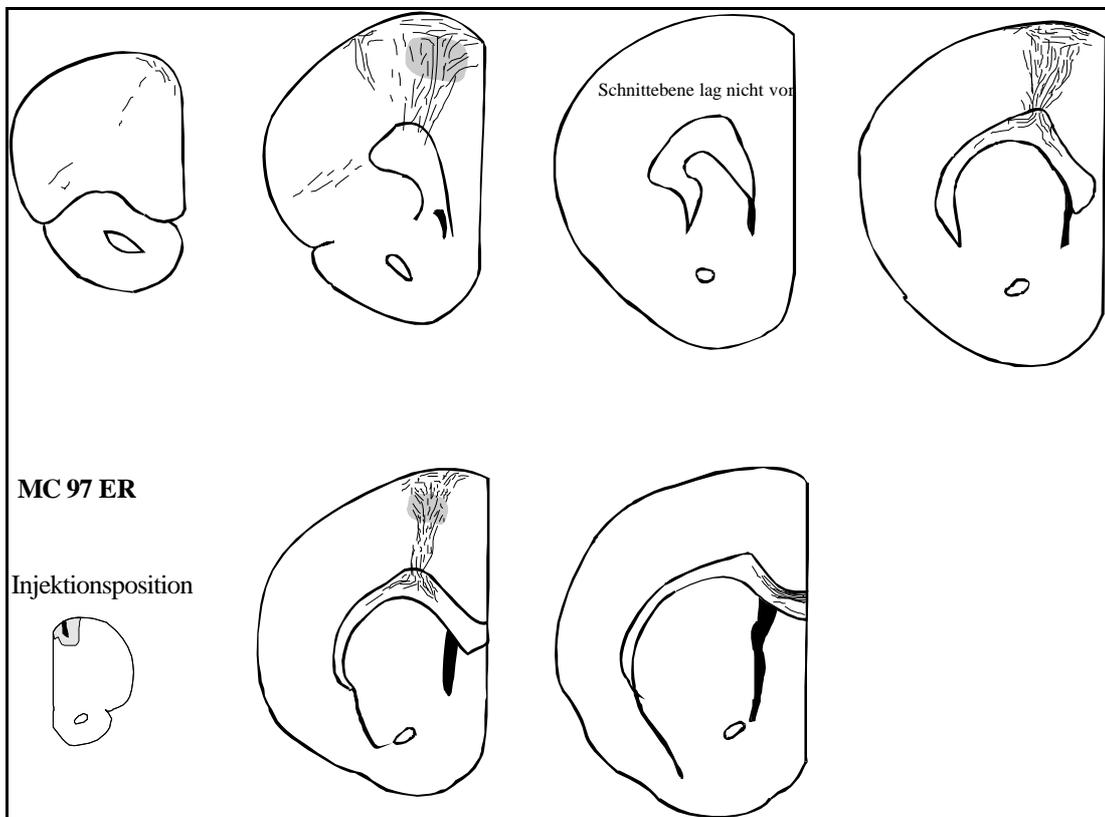
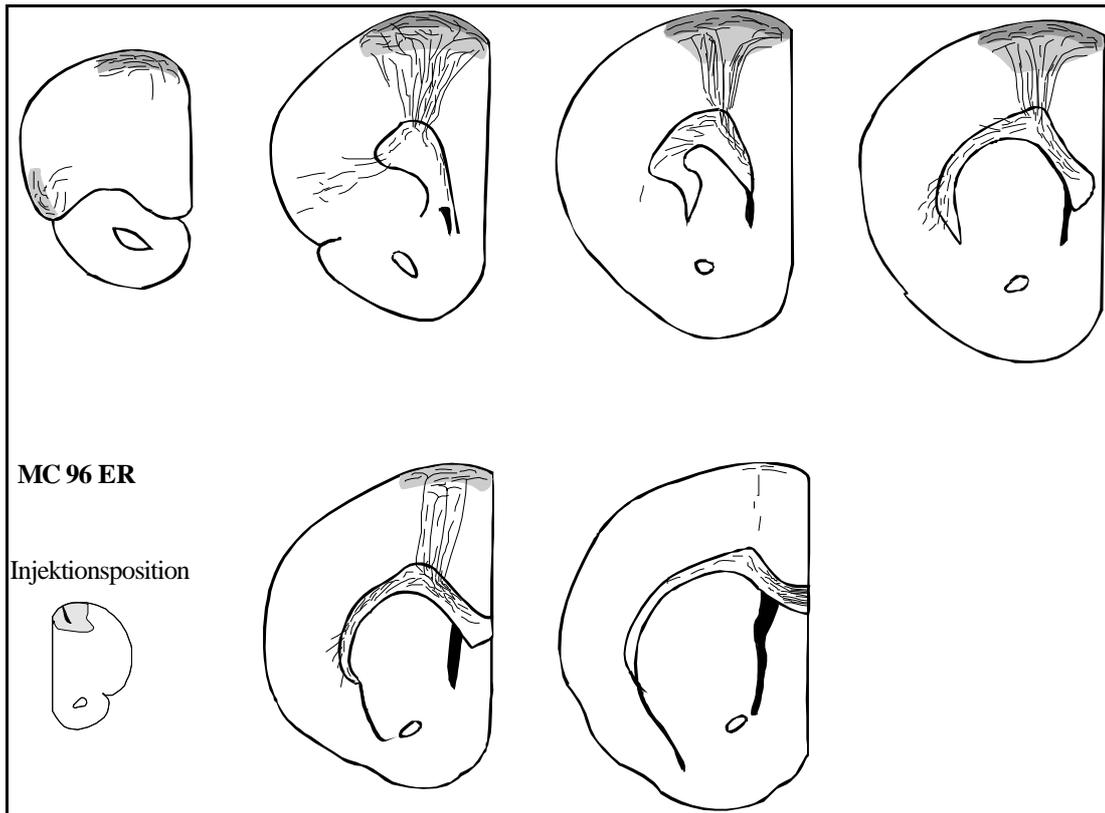
- Rahimi, R. (2005): „Neuropsychologische Störungen und Symptomatik bei schizophrenen und depressiven Patienten“; Dissertation im Fachbereich Psychologie, Universität Osnabrück.
- Röhrenbach, C. (1995): „Funktionale Lateralität im Stirnhirn: prospektives Denken, sequenzielles Ordnen und affektives Entscheiden“ Dissertation, Zentralstelle der Studentenschaft, Zürich.
- Röthlein, B. (1993): „Unser Gehirn wird entschlüsselt: Sinne; Gedanken, Gefühle“; Hamburg; Hoffmann und Campe Verlag.
- Sasanuma, S., Itoh ,M. und Kobayashi, Y (1977): „Tachistoscopic Recognitions of Kana and Kanji Words“ , Neuropsychologia Nr. 15; S. 547-553.
- Schmidt R.F. (1995). „Neuro- und Sinnesphysiologie“, Springer Verlag, Berlin.
- Schulmeister, R, (1997): „Grundlagen der Hypertexte Theorie – Didaktik - Design“ 2. Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München.
- Shallice, T., Fletcher, P., Frith, C.D., Grasby, P., Frackowiak, R.S. & Dolan, R.J. (1994): „Brain regions associated with acquisition and retrieval of verbal episodic memory“, in: „Nature“ 368, S. 633-635.
- Sotelo, C. (1978): „Purkinje cell ontogeny: formation and maintenace of spines“ in Progress in Brain Research Nr. 48; Seite 149-170.
- Sperling, R.A., Chua, E., Cocchiarella, A., Rand-Giovannetti, E., Poldrack, R., Schacter, D.L. & Albert, M.S. (2003): „Putting names to faces: successful encoding of asso-ciative memories activates the anterior hippocampal formation. Neuroimage, 20 (2), 1400-1401.
- Sperry, R.W. (1968) „Hemisphere Deconnection and Unity in Conscious Awareness“; American Psychologist 23: S. 723-733.
- Sperry, R.W. und Zaidel, D. (1979): „Self-recongnition ans social awareness in the deconnected minor hemisphere“; in Neuropsychologia Nr. 17; Seite 156-166; zitiert bei: Eccles, J.C (1984): „Die Psyche des Menschen“;Ernst Reinhardt GmbH & Co Verlag; München;

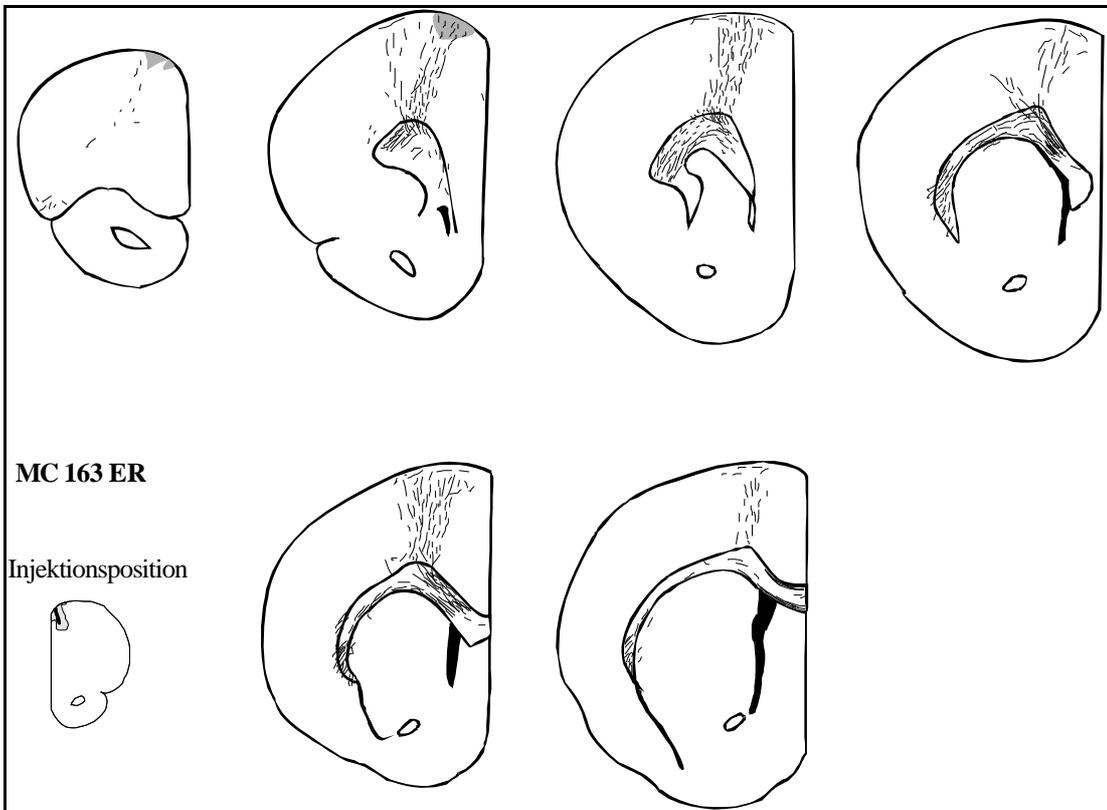
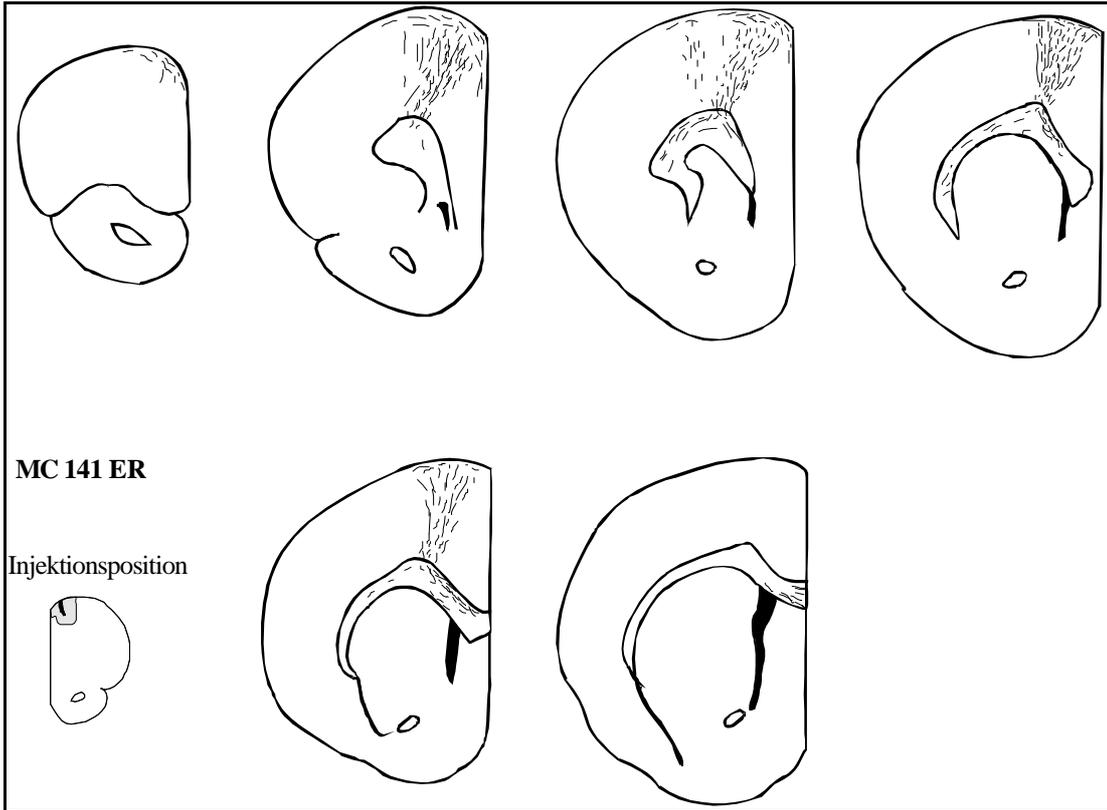
- [Originalausgabe: *The Human Psyche*“; Heidelberg; Springer Verlag 1980].
- Spitzer, M. (2000): „Geist im Netz Modelle für Lernen, Denken und Handeln“, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Spitzer, M. (2002): „Lernen: Gehirnforschung und Schule des Lebens“, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg,
- Springer, S.P. und Deutsch, G. (1998): „Linkes / Rechtes Gehirn“; (4. Auflage); Spektrum Akademischer Verlag; Heidelberg.
- Stark, R. E., Beile, K., Brandt, J., Freema, J. und Vinig E.P.G. (1995): „Speech-Language Outcomes of Hemispherectomy in Children and Young Adults” in: „Brain and Language” 51, S. 406-421.
- Sträter, J. (1995): „Spielen wir heute oder machen wir Unterricht?“; in: „Computer und Unterricht“; Nr. 19 Seite 10-15
- Suchan, B, Yaguez, L, Wunderlich, G, Canavan, AG, Herzog, H, Tellmann, L, Homberg, V, Seitz, RJ (2002) „Hemispheric dissociation of visual-pattern processing and visual rotation”, in: „Behav. Brain Res.” Nov 15; 136(2); S. 533-544.
- Teuchert-Noodt, G (2000): „Neuronal degeneration and reorganization: a mutual principle in pathological and healthy interactions of limbic and prefrontal circuits”. *J. Neural Transm. [Suppl]* 60, S. 315-333.
- Teuchert-Noodt, G. und Dawirs, R.R. (1996): „Naturally occurring synapse degeneration in the developing cerebellum of the Mallard (*Anas platyrhynchos*) and Peking duck (*Forma domestica*) in“: *Journal Brain* Nr. 37, S. 547-560.
- Teuchert-Noodt, G. und Lehmann, K. (2003): „1.3 – Entwicklungsneuroanatomie“, in: Herpertz-Dahlmann, Resch, Schulte-Markwort und Warnke (Eds.) „Entwicklungspsychiatrie - Biopsychologische Grundlagen und die Entwicklung psychischer Störungen.“, Schattauer Verlag, Stuttgart.

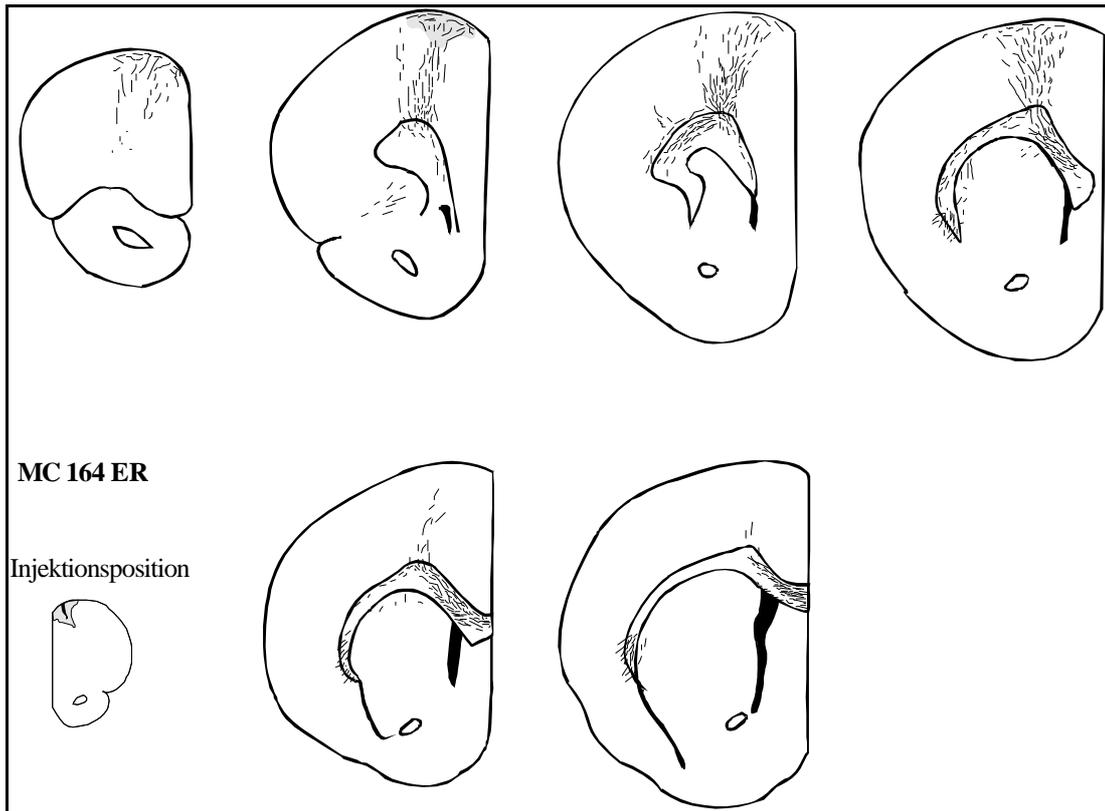
- Teuchert-Noodt, G. und Todzy, S. (1997): „Wirkung von Drogen auf höhere Hirnfunktion Teil 3: Neuropsychologie des Drogenmißbrauches“; in: *Biologie in der Schule*; Nr. 46 (2); Seite 104-114; Berlin.
- Teuchert-Noodt, G., Breuker, K.-H. und Dawirs, R.R. (1991): „Neural lysosome accumulation in degrading synapse of sensory-motor and limbic subsystems in the duck *Anas platyrhynchos*: Indication of rearrangements during avian brain development? “ in: „*Dev. Neurosci*“ Nr. 13, S. 151-163.
- Trevarthen, C.B (1974): „Manipulative Strategies of Baboons, and the Origins of Cerebral Asymmetry“; in: Kinsbourne, M. [Hrsg.]: „*Hemispheric Asymmetry Function*“; London.
- Tulving, E., Kapur, S., Craik, F.I., Moscovitch, M. and Houle, S. (1994): „Hemispheric encoding/retrieval asymmetry in episodic memory: positron emission tomography findings“, *Proceedings National Academy of Science USA*, 91, S. 2016-2020.
- Vester, F. (1975): „*Denken, Lernen, Vergessen*“ 3. Auflage Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart.
- Vester, F. (1998): „*Denken, Lernen, Vergessen*“, 25. Auflage Deutsche Verlagsanstalt GmbH, Stuttgart.
- Volkow, N.D., Wang, G.J., Fowler, J.S., Fischman M., Foltin, R., Gatley, S.J., Logan, J., Wong C., Gifford, A., Hitzemann, R. and Pappas, N. (1999): „Methylphenidate and cocaine have a similar in vivo potency to block dopamine transporters in the human brain“. *Life Sciences* 65, S. 7-12.
- Wada, J.A. und Davis A. (1977): „Fundamental Nature of Human Infants' Brain Asymmetry“, *Canadian Journal of Neurological Sciences*; Nr. 4, S. 203-207.
- Wada, J.A., Clark, R. und Hamm, A. (1975): „Cerebral Hemisphere Asymmetry in Humans“; in : *Archives of Neurology* Nr. 32 S. 239-246.

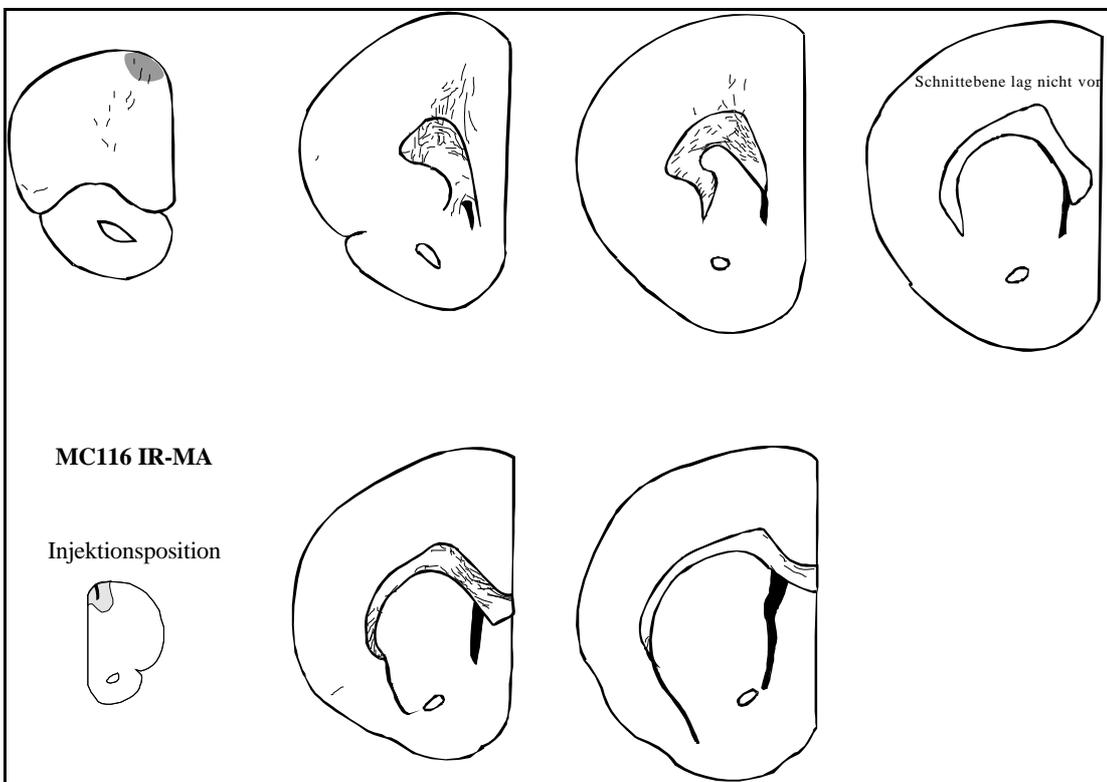
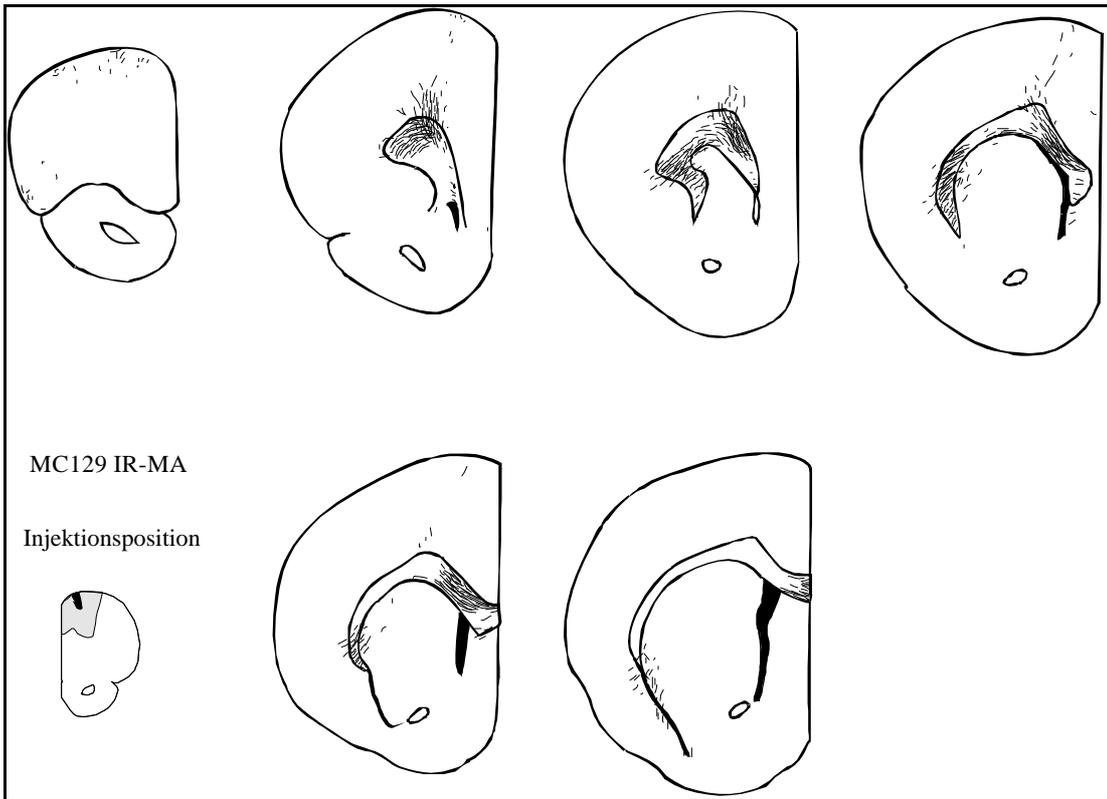
- Warnke, F. (1995): „Takt des Gehirns ...“, VAK-Verlag, Freiburg.
- Weigand, H.-G. (1997): „Überlegungen zur TIMMS-Studie“ aus Mathematik in der Schule 35 Heft 10, Pädagogischer Zeitschriftenverlag.
- Weisenberg, T. und McBride, K.E. (1935): „Aphasia: A Clinical and Psychological Study“, Commonwealth Fund, New York.
- Witte, A.V., Bagorda, F., Teuchert-Noodt, G., Lehmann, K. (2006): „Contralateral prefrontal projections mature abnormally after early methamphetamine trauma and isolated rearing of gerbils“, in: J. Neural Transm.
- Wolber, M, Wascher, E. (2003): „Visual search strategies are indexed by event-related lateralizations of the EEG“, in: Biol. Psychol. Apr;63(1) S. 79-100.
- Wolff, J.R. (1978): „Ontogenetic aspects of cortical architecture: Lamination“, in: „Architectonics of the Cerebral Cortex“, Hrsg.: Bazier M. and Petsch H. Seite 159-173.
- Wolff, J.R. und Wagner G.P. (1983): „Selforganisation in Synaptogenesis: Interaction between the Formation of Excitatory and Inhibitory Synapses“, Universität Göttingen; in: „Synergetics of the Brain“ Hrsg. Baser, E. u.a. Springer Verlag; Berlin.
- Zaidel, E. (1978): „Auditory Language Comprehension in the Right Hemisphere Following Cerebral Commissurotomy and Hemispherectomy: A Comparison with Child Language and Aphasia“ in: „Language Acquisition and Language Breakdown“, Hrsg. Caramazza, A. und Zurif, E. John Hopkins University Press.
- Zech, F. (1998): „Grundkurs der Mathematikdidaktik -Theoretische und praktische Anleitungen für das Lehren und Lernen von Mathematik“ 9. Aufl., Beltz Verlag, Weinheim.

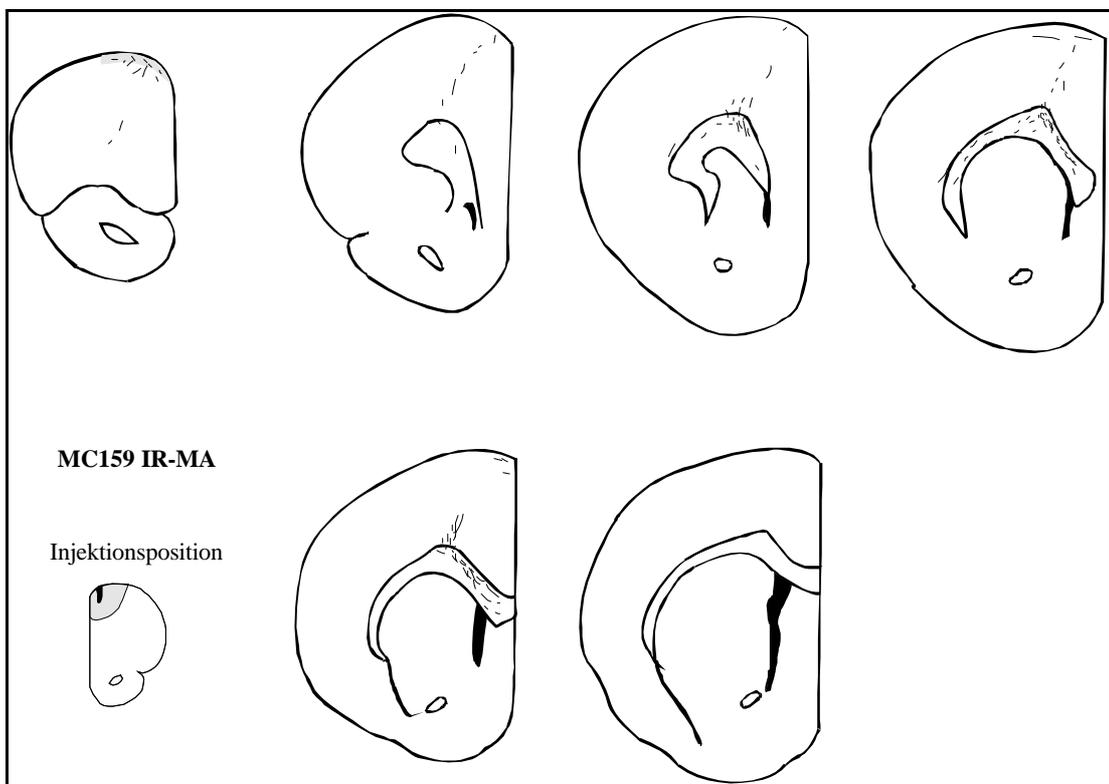
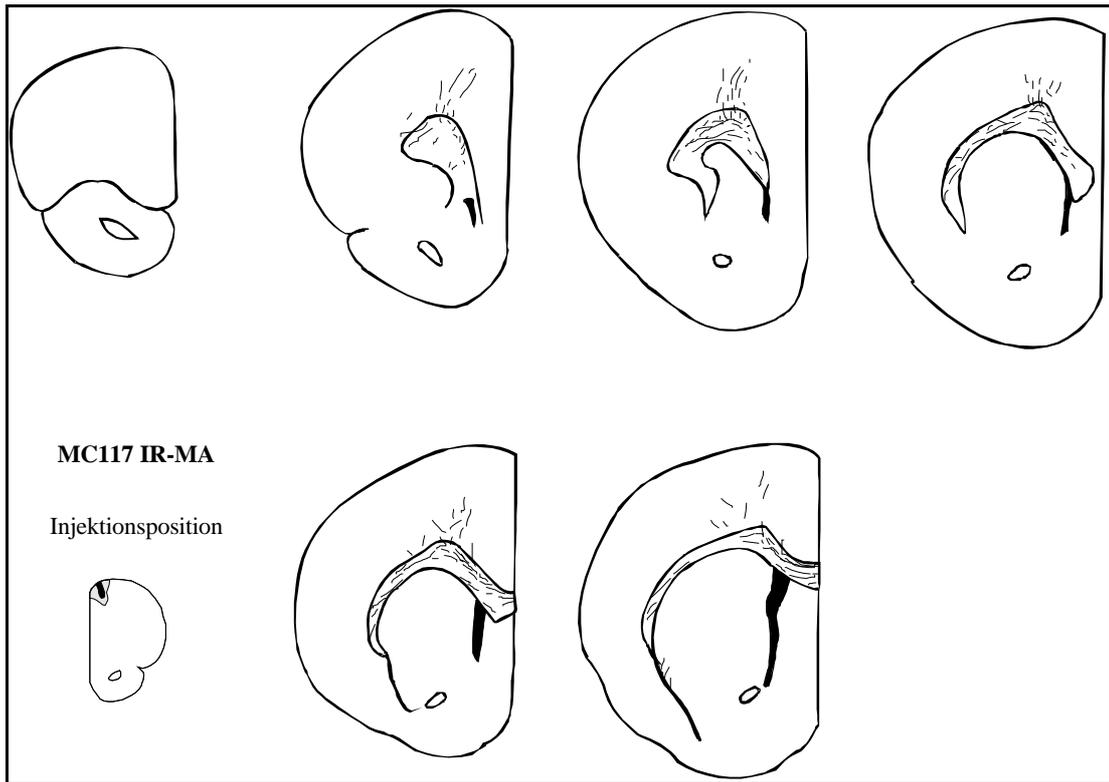
- Zeineh, M.M., Engel, S.A., Thompson, P.M. & Bookheimer, S.Y. (2003): „Dynamics of the hippocampus during encoding and retrieval of name-face pairs”. *Science*, 299 (24), S. 577-580.
- Zhang Y., Zhang Q., Zhang J. und Li W. (2005) „Laterality of brain areas associated with arithmetic calculations revealed by functional magnetic resonance imaging”, *Chinese Medical Journal*, 118 (6), S. 633-638.

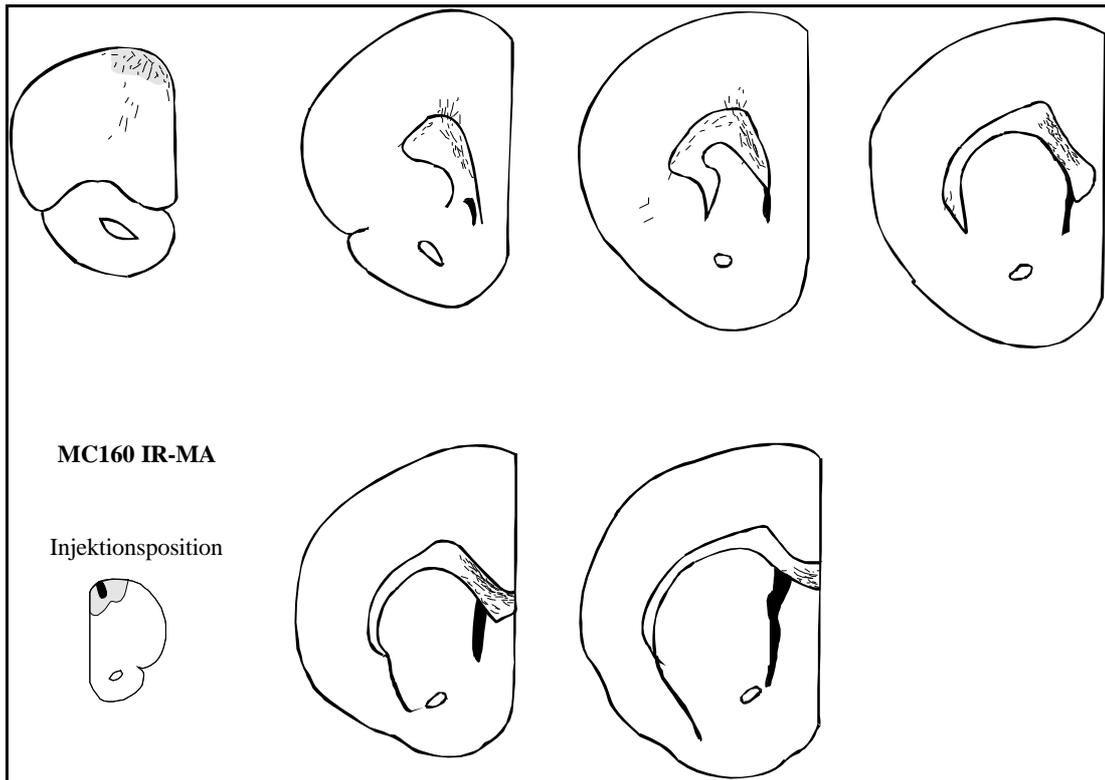












Themen der Unterrichtseinheiten im Kurshalbjahr Neurobiologie

Unterrichtsreihe Neurophysiologie

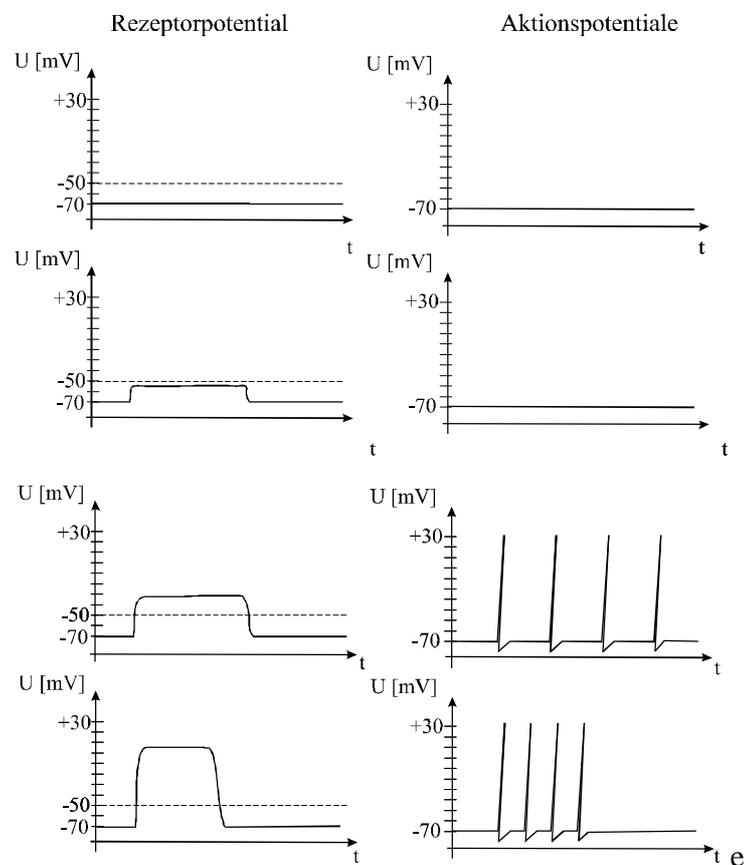
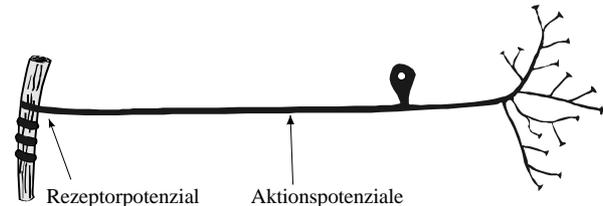
- Grobaufbau des Nervensystems.
- Cytologie der Nervenzelle.
- Aufbau und Funktion der Nervenzellmembran: Ruhepotenzial und Aktionspotenzial.
- Amplituden- und Frequenzcodierung an der Muskelspindelzelle (nach Schulbuch Natura). (→Arbeitsblätter zu I, s. hinten)
- Aufbau und Funktion der Synapse.
- Wirkung von hemmenden und erregenden Synapsen auf die postsynaptische Membran. (→Arbeitsblätter zu II, s. hinten)

Unterrichtsreihe Neurobiologie und Lernen

- Verknüpfen von Rindenzellen: Synaptogenese nach Hebb. (→Arbeitsblätter zur Phase III s. hinten)
- Klassisches und operantes Konditionieren.
- Umbau von Nervennetzen in kritischen Reifungsphasen während der Prägung von Entenküken. (→Arbeitsblätter zu IV, s. hinten)
- Motorisches Lernen in verschiedenen Altersstufen.
- Sequenzielle und komplexe Verarbeitungsstrategien der Hemisphären (Parallel-serielles Hemisphärenmodell). (→Arbeitsblätter zu V, s. hinten)
- Kritische Zeitfenster der Gehirnreifung.
- Konzeption verschiedener Workshops.

Arbeitsblatt		LEO-SYMPHER BERUFSKOLLEG	
Thema: Reizleitung vom Rezeptor zum Axon	Klasse	Datum	
Name:			

Kontrahiert ein Muskel, werden die Rezeptoren der Muskelspindelzelle gedehnt. In der Membran befinden sich Na^+ -Kanäle, die sich bei mechanischen Veränderungen der Membran öffnen. Durch den Einstrom von Na^+ Ionen in das Cytoplasma entsteht ein **Rezeptorpotential**, das am Axon **Aktionspotenziale** auslösen kann.

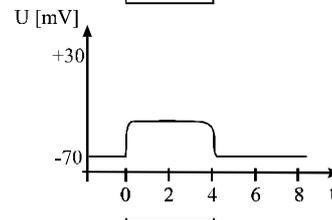
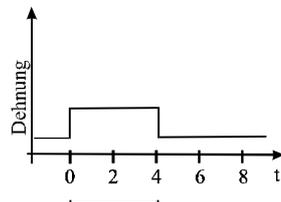
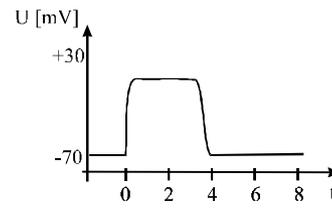
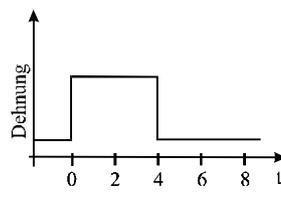
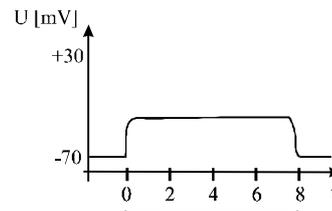
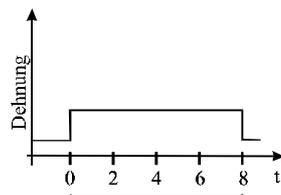
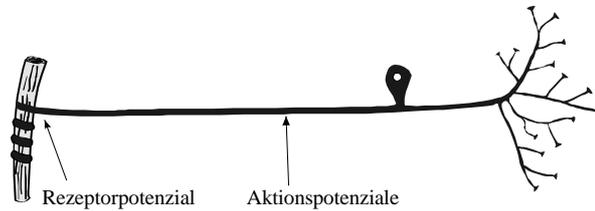


Aufgaben:

- Beschreiben Sie, wann das Rezeptorpotential Aktionspotenziale auslöst.
- Welche Auswirkungen hat ein weiteres Erhöhen des Rezeptorpotenzials?
- Formulieren Sie in ein bis zwei kurzen Sätzen, welche Informationen an die Tafel übernommen werden sollen.

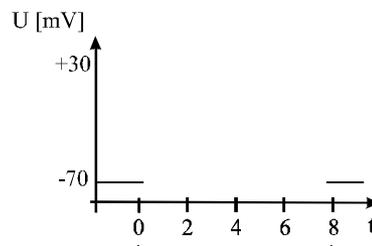
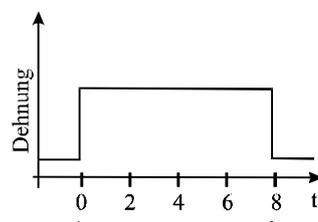
<h1>Arbeitsblatt</h1>		LEO-SYMPHER BERUFSKOLLEG	
Thema: Potenziale an der Rezeptormembran	Klasse	Datum	
Name:			

An einer Muskelspindelzelle wurde bei unterschiedlichen Kontraktionen des Bizepses Membranpotenziale gemessen. Am Rezeptor wurden folgende **Rezeptorpotenziale** abgeleitet:



Aufgaben:

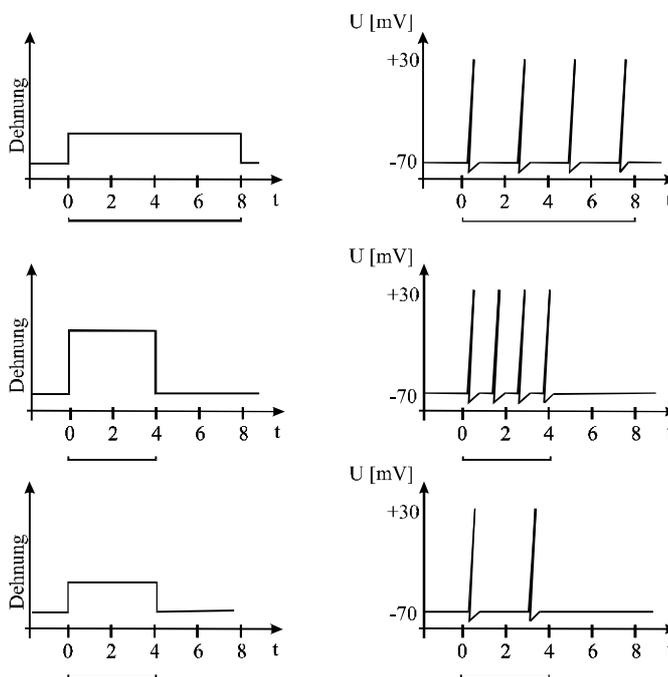
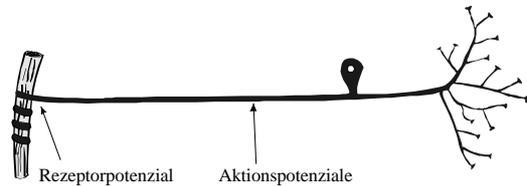
- Beschreiben Sie, wie am Rezeptor die Informationen Dauer und Stärke des Reizes weitergegeben wird.
- Zeichnen Sie das Membranpotenzial für die folgende Dehnung nach Ihren gewonnenen Erkenntnissen in das rechte Diagramm ein.



- Ordnen Sie den dargestellten Potenzialen möglichen Stellungen des Armes zu, und stellen Sie die Information für einen gestreckten Arm als Membranpotenzial am Rezeptor dar.

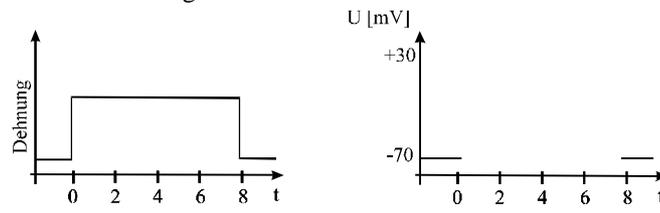
<h1>Arbeitsblatt</h1>		LEO-SYMPHER BERUFSKOLLEG	
Thema: Potenziale an der Axonmembran		Klasse	Datum
Name:			

An einer Muskelspindelzelle wurde bei unterschiedlichen Kontraktionen des Bizepses Membranpotenziale gemessen. Am Axon wurden folgende **Aktionspotenziale** abgeleitet:



Aufgaben:

1. Beschreiben Sie, wie am Axon die Informationen Dauer und Stärke des Reizes weitergegeben wird.
2. Zeichnen Sie das Membranpotenzial für die folgende Dehnung nach Ihren gewonnenen Erkenntnissen in das rechte Diagramm ein.



3. Ordnen Sie den dargestellten Potenzialen mögliche Stellungen des Armes zu, und stellen Sie die Information für einen gestreckten Arm als Membranpotenzial am Axon dar.

Arbeitsblatt		LEO-SYMPHER BERUFSKOLLEG	
Thema:	Reizsummation I	Klasse	Datum
Name:			

Am Soma einer Nervenzelle befinden sich Synapsen mit dem Transmitter Acetylcholin (weiß) und GABA (schwarz). An zwei Messpunkten werden Membranpotenziale abgeleitet. Die Diagramme geben die gemessene Spannung über den Messzeitraum an.

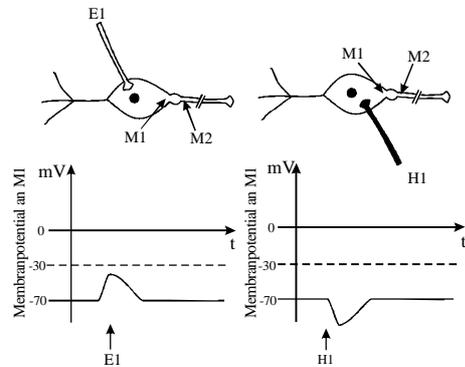
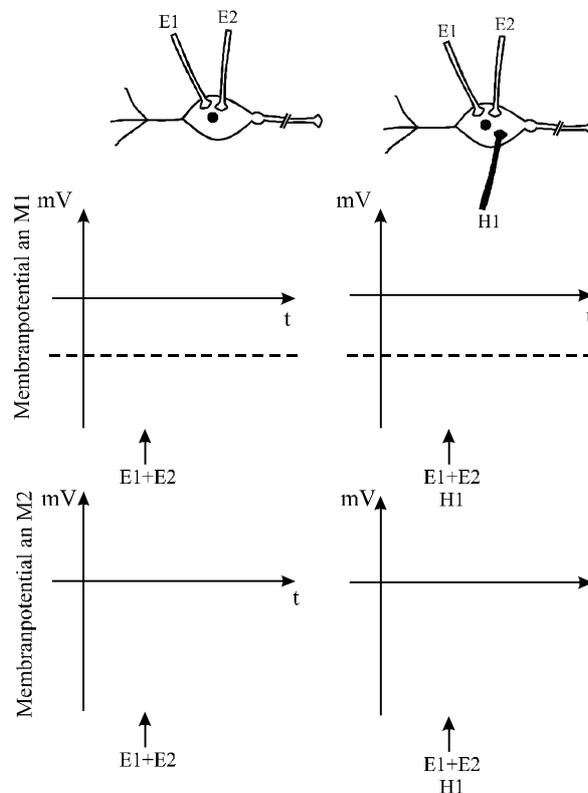


Abbildung 1: Messergebnis an Messpunkt M1

Aufgaben:

- Beschreiben und deuten Sie die Messergebnisse in der obigen *Abbildung 1*. Gehen Sie dabei auch auf den Ort der Messung und die Bedeutung der gestrichelten Linie für das Diagramm am zweiten Messpunkt M2 ein.
- Zeichnen Sie die zu erwartenden Spannungskurven in die Diagramme für die Messpunkte M1 und M2 ein. Erläutern Sie Ihre Ergebnisse.



Arbeitsblatt		LEO-SYPHER BERUFSSKOLLEG	
Thema:	Reizsummation II	Klasse	Datum
Name:			

Am Soma einer Nervenzelle befinden sich Synapsen mit dem Transmitter Acetylcholin (weiß) und GABA (schwarz). An zwei Messpunkten werden Membranpotenziale abgeleitet. Die Diagramme geben die gemessene Spannung über den Messzeitraum an.

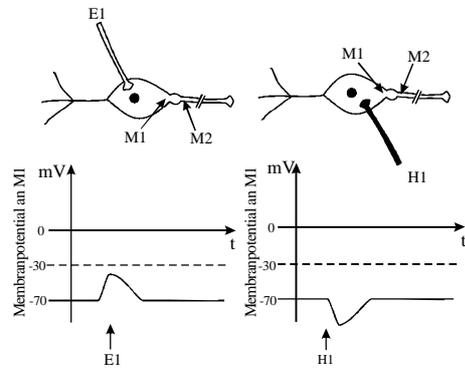
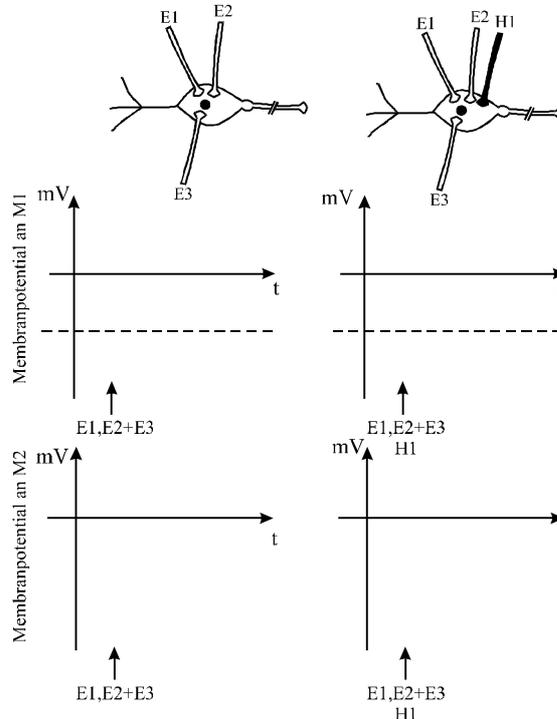


Abbildung 1: Messergebnis an Messpunkt M1

Aufgaben:

- Beschreiben und deuten Sie die Messergebnisse in der obigen *Abbildung 1*. Gehen Sie dabei auch auf den Ort der Messung und die Bedeutung der gestrichelten Linie für das Diagramm am zweiten Messpunkt M2 ein.
- Zeichnen Sie die zu erwartenden Spannungskurven in die Diagramme für die Messpunkte M1 und M2 ein. Erläutern Sie Ihre Ergebnisse.



<h1>Arbeitsblatt</h1>		LEO-SYPHER BERUFSKOLLEG	
Thema:	Reizsummation III	Klasse	Datum
Name:			

Am Soma einer Nervenzelle befinden sich Synapsen mit dem Transmitter Acetylcholin (weiß) und GABA (schwarz). An zwei Messpunkten werden Membranpotenziale abgeleitet. Die Diagramme geben die gemessene Spannung über den Messzeitraum an.

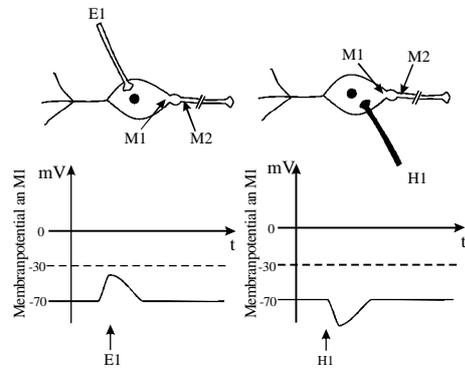
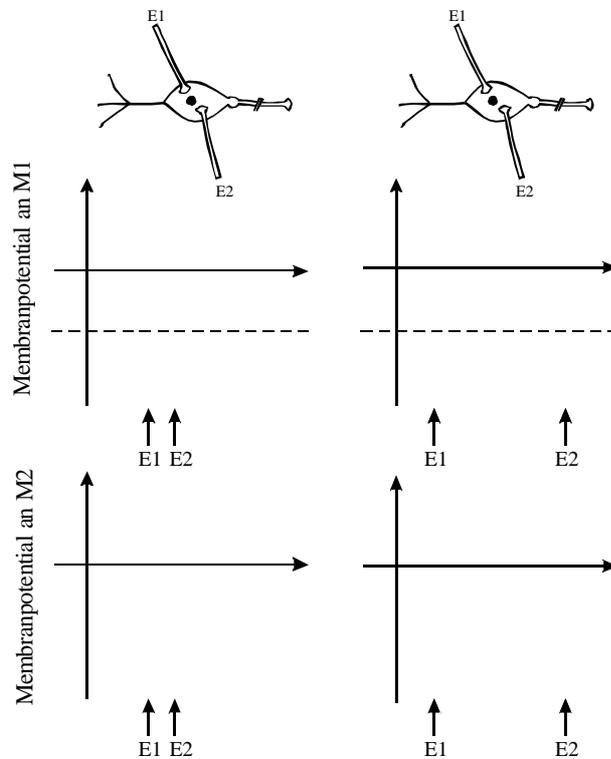


Abbildung 1: Messergebnis an Messpunkt M1

Aufgaben:

- Beschreiben und deuten Sie die Messergebnisse in der obigen *Abbildung 1*. Gehen Sie dabei auch auf den Ort der Messung und die Bedeutung der gestrichelten Linie für das Diagramm am zweiten Messpunkt M2 ein.
- Zeichnen Sie die zu erwartenden Spannungskurven in die Diagramme für die Messpunkte M1 und M2 ein. Erläutern Sie Ihre Ergebnisse.



Arbeitsblatt		LEO-SYMPHER BERUFSKOLLEG	
Thema:	Reizsummation IV	Klasse	Datum
Name:			

Am Soma einer Nervenzelle befinden sich Synapsen mit dem Transmitter Acetylcholin (weiß) und GABA (schwarz). An zwei Messpunkten werden Membranpotenziale abgeleitet. Die Diagramme geben die gemessene Spannung über den Messzeitraum an.

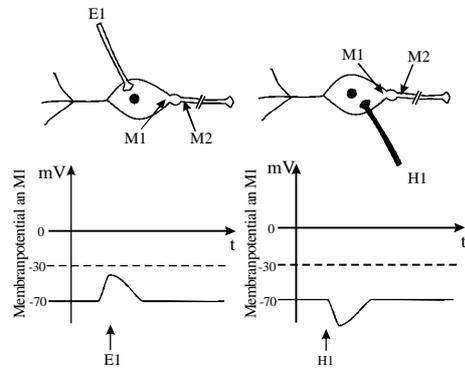
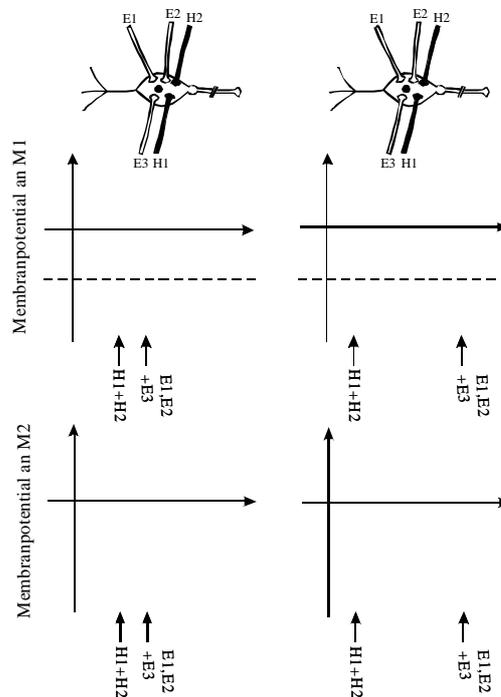


Abbildung 1: Messergebnis an Messpunkt M1

Aufgaben:

- Beschreiben und deuten Sie die Messergebnisse in der obigen *Abbildung 1*. Gehen Sie dabei auch auf den Ort der Messung und die Bedeutung der gestrichelten Linie für das Diagramm am zweiten Messpunkt M2 ein.
- Zeichnen Sie die zu erwartenden Spannungskurven in die Diagramme für die Messpunkte M1 und M2 ein. Erläutern Sie Ihre Ergebnisse.



Arbeitsblatt		LEO-SYMPHER BERUFSKOLLEG	
Thema:	Verknüpfen von Sinneskanälen	Klasse	Datum
Name:			

Die Reize der Sinnesorgane werden zuerst in klar definierte Gebiete der Hirnrinde weitergeleitet (primäre Sinnesfelder, s. Abbildung 1). Hier verarbeiten Gruppen von Nervenzellen ganz bestimmte Reize der Sinnesorgane: z.B. die Lage der Bildpunkte auf der Netzhaut beim Sehen und die Orientierung von Strichen. Um die **primäre Sehrinde** liegt die **sekundäre Sehrinde**. Hier werden die Striche auf Muster geprüft. In der äußeren **tertiären Sehrinde** wird eine Bedeutung zugordnet. z.B. die Striche bedeuten das Symbol „A“. Durch das Vergleichen der abgespeicherten Muster mit den Reizen aus den Sinnesorganen werden Bilder, Buchstaben und Texte erkannt. Dabei müssen neue Reizmuster in das Netzwerk der Nervenzellen eingegliedert werden.

Sekundäre und tertiäre Sinnesfelder gehören zu den **assoziativen Feldern**. In den Schnittflächen der assoziativen Felder werden die Informationen der verschiedenen Sinneskanäle kombiniert, indem sich die zuständigen Nervenzellen verknüpfen. Zu dem Bild einer Gitarre werden auch gleich der Klang und das Gefühl beim Tasten des Holzes oder der Saiten gespeichert.

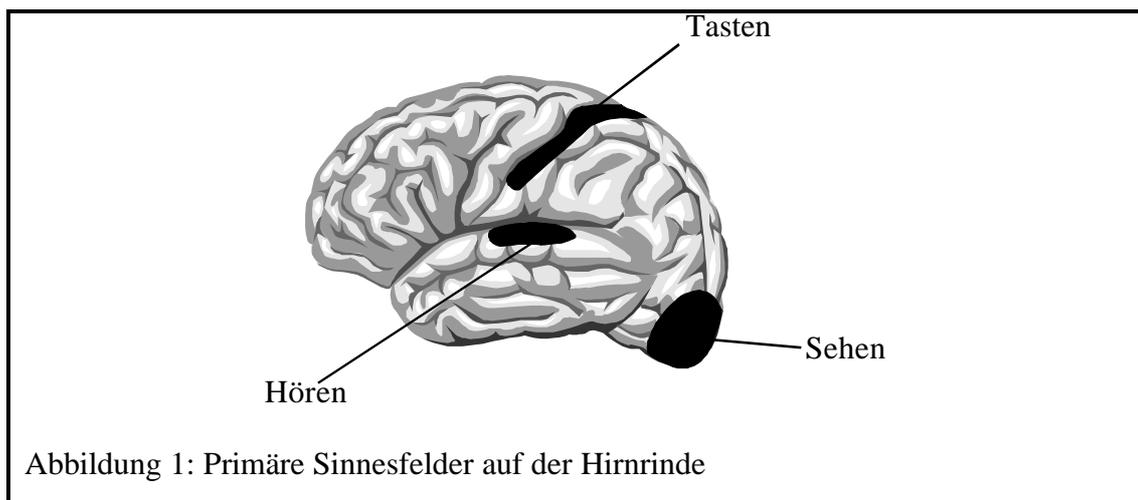


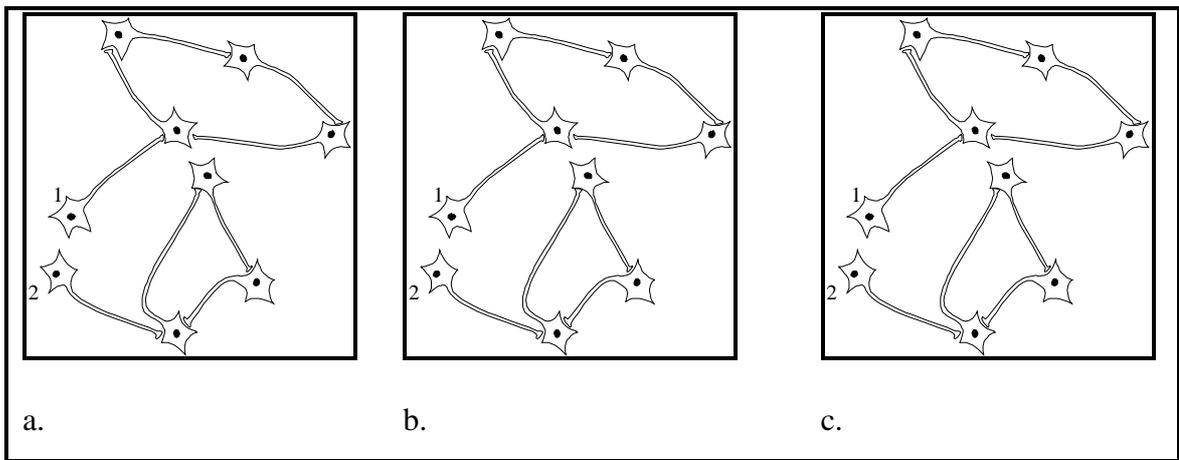
Abbildung 1: Primäre Sinnesfelder auf der Hirnrinde

Aufgaben

1. Zeichnen Sie die Sehrinde mit ihren drei Bereichen als Fläche. Setzen Sie die Informationen aus dem Text graphisch um.
2. Erläutern Sie, welche Informationen beim Hören einer Gitarre in den entsprechenden drei Bereichen der Hörrinde verarbeitet werden.
3. Zeichnen Sie den Bereich auf der Gehirnrinde ein, in dem Sie die stärkste Verknüpfung der **Sinneskanäle** vermuten.
4. Vergleichen Sie die Lage mit der Abbildung der Rindenfelder aus Ihren Unterlagen und interpretieren Sie das Ergebnis.

Arbeitsblatt		LEO-SYMPHER BERUFSKOLLEG	
Thema:	Synaptogenese	Klasse	Datum
Name:			

Reize aus der Umwelt werden von den Sinnesorganen in elektrische Signale, der Sprache des Gehirns, umgewandelt und von den Nervenzellen verarbeitet und weitergeleitet. Die Nervenzellen bilden über Synapsen ein Netzwerk. Eintreffende Reizmuster erregen bestimmte Teile dieses Netzwerkes und aktivieren die verbundenen Nervenzellen. Werden die Nervenverbindungen oft benutzt, verstärken sich die Synapsen und es können sogar neue Axone auswachsen. Jedes neue Reizmuster verändert die Verbindung zwischen den Nervenzellen. Ist der Reiz schwach oder erreicht er die Nervenzellen zu unterschiedlichen Zeiten, werden nur sehr labile Verbindungen (elektrische Ströme) zwischen Nervenzellen hergestellt. Wiederholt sich hingegen ein starker Reiz und führt zu einer gleichzeitigen Aktivität von benachbarten Nervenzellen, so verstärken sich die vorhandenen Verbindungen und neue Verbindungen wachsen aus (**aktivitätsgesteuerte Synaptogenese**). Auf diese Weise baut sich das Netzwerk „Gehirn“ nach den Reizen aus der Umwelt aus. Die unteren Schemazeichnungen zeigen sehr vereinfachte Nervenetze. Durch verschiedene Reize der Sinnesorgane wird jeweils die Nervenzelle 1, die Nervenzelle 2 oder beide Nervenzellen gereizt.



Aufgaben

1. Zeichnen Sie die synaptischen Verbindungen grün, die sich verstärken und rot, die zurückgebildet werden, wenn:
 - a. die Nervenzelle 1 oft gereizt und die Nervenzelle 2 nicht gereizt wird.
 - b. die Nervenzelle 2 oft gereizt und die Nervenzelle 1 nicht gereizt wird.
 - c. die Nervenzellen 1 & 2 oft gleichzeitig gereizt werden.

☛ Bedenken Sie, dass auch neue Verbindungen auswachsen können.
2. Nehmen Sie zu der Modellvorstellung kritisch Stellung. Bedenken Sie, dass es sich ausschließlich um einen Ausbau von Nervenetze handelt.

Arbeitsblatt		LEO-SYMPHER BERUFSKOLLEG	
Thema:	Umbau von Nervenetzen	Klasse	Datum
Name:			

Beim Auflösen von synaptischen Verbindungen werden Lysosomen in den beteiligten Nervenzellen angereichert, die Verdauungsenzyme enthalten. Diese werden durch eine Silberfärbung sichtbar gemacht. Nach dieser Methode haben Hirnforscher an der Universität Bielefeld 1990 Gehirne von Entenküken mikroskopisch untersucht. Die Forscher zählten die Anzahl der versilberten Lysosomen in bestimmten Feldern, die mit frühem Lernen in Verbindung stehen (s. Abb. 1). Außerdem wurden Dornen (Auswüchse von Dendriten an den meisten Synapsen) der Pyramidenzellen dieser Felder während der gleichen Zeitspanne gezählt (s. Abb 2 bzw. 3).

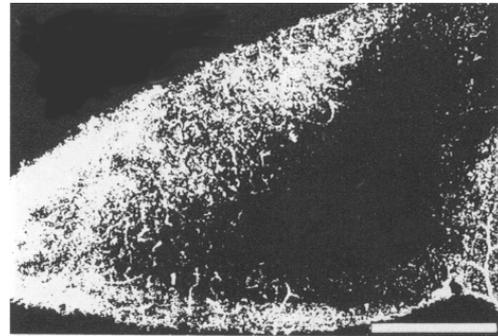


Abbildung 1: Entengehirn nach der Versilberung

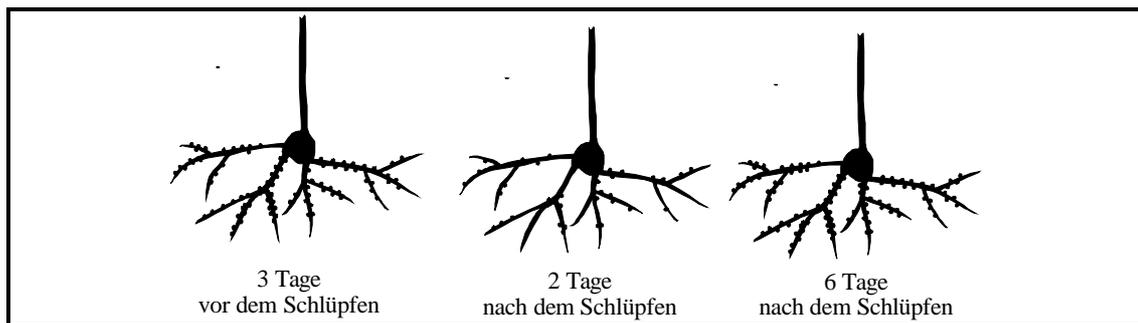


Abbildung 2: Pyramidenzellen mit Dornen an den Dendriten

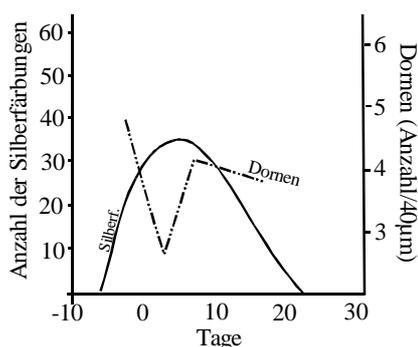


Abbildung 3: Zusammenfassung der Anzahl der Versilberungen und Dornen an den Pyramidenzeldendriten

Aufgaben:

1. Erläutern Sie die Schlussfolgerungen, die aus der steigenden Anzahl der Silberfärbungen gezogen werden können.
2. Stellen Sie einen sinnvollen Zusammenhang zwischen der stärkeren Versilberung und der Änderung der Dornenanzahl her.
3. Nehmen Sie aufgrund Ihrer neuen Erkenntnisse zu den Hypothesen Aufbau und Umbau von Nervenetzen Stellung.

Arbeitsblatt		LEO-SYMPHER BERUFSKOLLEG	
Thema:	Prägung von Entenküken	Klasse	Datum
Name:			

Konrad Lorenz hatte beobachtet, dass ein Entenküken aus einem künstlich ausgebrüteten Ei die Bewegungen des Forschers aufmerksam verfolgte. Als er das Küken danach unter das Gefieder des Muttertieres schob, arbeitete es sich wieder hervor und folgte Konrad Lorenz. Daraufhin entwarf er das Prägungskarussell (s. Abb.1), in das er Küken in verschiedenen Altersstufen setzte. Nach 1-2 Wochen wurde kontrolliert, ob die Küken dem Ball folgten. (Abb. aus: Mentor Schülerhilfe, 1998)

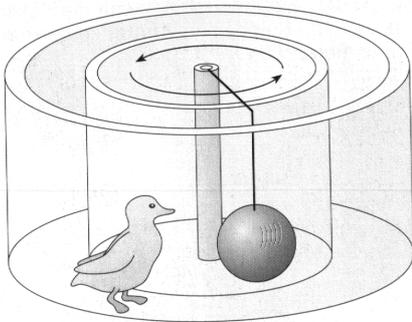


Abbildung 5: Prägungskarussell

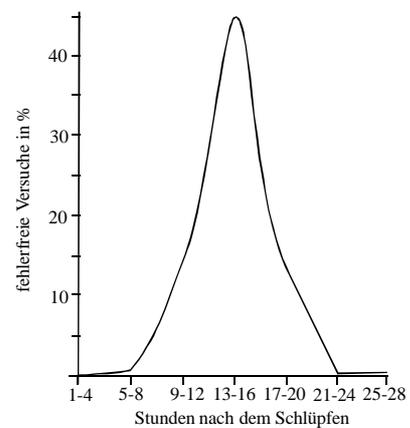


Abbildung 6: Versuchsauswertung

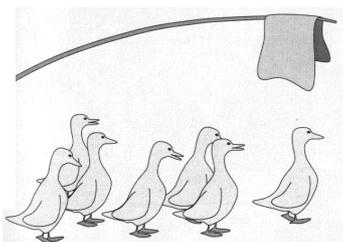


Abbildung 7: Prägungsbeispiel

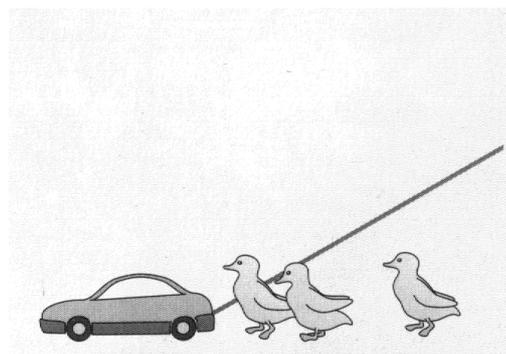


Abbildung 8: Prägungsbeispiel

Aufgaben

1. Stellen Sie eine These auf, die Konrad Lorenz verfolgt haben könnte.
2. Erläutern Sie die methodische Idee des Prägungskarussells. Erläutern Sie in diesen Zusammenhang Abbildung 3 und 4.
3. Konrad Lorenz prägte die Begriffe „*sensible Phase*“ und „*Irreversibilität*“. Nehmen Sie dazu Stellung.
4. Diskutieren Sie die Bedeutung der Prägung bei Säugetieren und dem Menschen.

Arbeitsblatt		LEO-SYMPHER BERUFSKOLLEG	
Thema:	Die linke Hemisphäre	Klasse	Datum
Name:			

Wilde Schimpansen benutzen ca. 36 Laute. Der Mensch ist ihnen dabei keineswegs überlegen, auch er kann rund drei Dutzend Laute bilden. Worin liegt aber der grundlegende Unterschied, der die verbale Sprache des Menschen so leistungsfähig macht? Bei den Schimpansen sind die Laute der Wortschatz, jeder Laut hat seine Bedeutung. In der menschlichen Sprache haben die einzelnen Laute (Phoneme) keine Bedeutung. Erst die Konstruktion zu Wörtern gibt den Phonemen einen Sinn.

Unsere Sprache ist nach festgelegten Regeln aufgebaut. Im Allgemeinen wird durch einen Satz die Information in der Form: „Wer hat wem was womit getan?“ vermittelt.

Dabei teilt sich unsere Sprache in Abschnitte auf. Dies geschieht sowohl beim Sprechen als auch beim Hören. So werden Sequenzen von Phonemen zu Wörtern, Sequenzen von Wörtern zu Sätzen und Sequenzen von Sätzen zu Texten. Diese Sequenzierung ist das Merkmal aller mitteleuropäischen Sprachen und der Grund für Ihre Vielfalt und Variationsmöglichkeiten.

Im Sinne der Lateralität unseres Gehirns nimmt die Sequenzierung eine Schlüsselfunktion ein. Untersuchungen haben ergeben, dass taube Kinder, die zu spät Gebärdensprache erlernen, Defizite im Planen und Organisieren komplexerer Handlungen aufweisen. Hier wird deutlich, dass die Sprache eine ordnende Funktion für einen Teil unserer kognitiven Fähigkeiten hat. Dabei sind vor allem die analytischen Fähigkeiten unseres Gehirns angesprochen, die wir zum Beispiel benötigen, um Strategien zu entwickeln oder einen logischen Lernprozess zu bewältigen. Linkshemisphärische Fähigkeiten basieren auf diesen seriellen Verarbeitungsstrategien. In Anlehnung an den Aufbau sprachlicher Funktionen ist die Sequenzierungsfähigkeit eine Schlüsselfunktion und kann durch sequenzierte Bewegungen der Hände und Füße unterstützt werden.

Aufgaben

1. Stellen Sie die Schlüsselfunktion der linken Hemisphäre an Beispielen dar.
2. Erläutern Sie die Darstellung des Verschaltungsmodells in Abbildung 1.
3. Beschreiben Sie in Stichworten Lernsituationen, in denen lineare Informationsverarbeitungsprozesse im Vordergrund stehen. Notieren Sie die Stichworte auf einer blauen Karte.

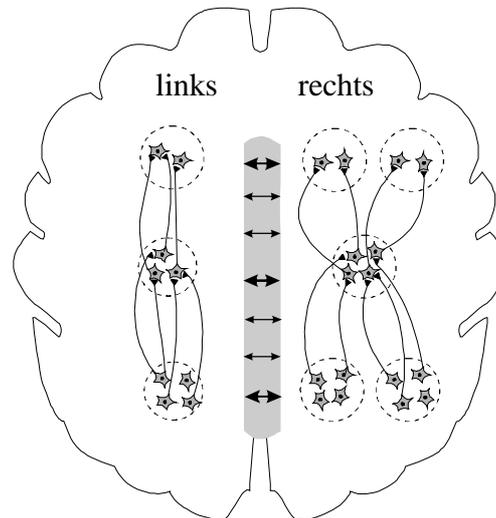


Abbildung 1
Schematische Darstellung der Verarbeitungsstrategien der linken und rechten Hemisphären

Arbeitsblatt		LEO-SYMPHER BERUFSKOLLEG	
Thema:	Die rechte Hemisphäre	Klasse	Datum
Name:			

Bei den rechtshemisphärischen Funktionen handelt es sich um komplexe visuelle und räumliche Prozesse. Probanden wurden Strichzeichnungen von geometrischen Figuren gezeigt, die in Einzelteile zerlegt waren. Die Probanden sollten durch blindes ertasten aus drei verschiedenen Formen die passende zuordnen. Die Testergebnisse wurden für die rechte und linke Hand getrennt dokumentiert. Sie zeigten, dass die linke Hand, die von der rechten Hemisphäre gesteuert wird, die besseren Leistungen erbrachte.

Neurologische Patienten mit rechtsseitiger Schädigung des Gehirns haben gezeigt, dass sie Schwierigkeiten bei der Identifizierung von Gesichtern haben. Die Ausfälle der als Prosoangosie bezeichneten Krankheit können die Patienten nur umgehen, wenn sie sich Einzelheiten aus den Merkmalen der Gesichter einprägen: Sie machen aus dem ursprünglich ganzheitlichen Verarbeitungsprozess einen linearen, analytischen, indem sie sich die Eigenarten einzeln merken.

Die vorgestellten Untersuchungen durchzieht ein roter Faden: Es sollen immer Einzelstücke zu einem „Ganzen“ zusammengesetzt werden. Insbesondere müssen eine Vielfalt von Informationen in ihrer ganzen Bandbreite erfasst und umgesetzt werden. Im Gegensatz zu sprachlichen Prozessen, bei denen die Verarbeitung linear, hintereinander abläuft, muss bei der visuellen Verarbeitung das Ganze betrachtet werden. Informationen müssen auf breiter Ebene parallel einlaufen und verarbeitet werden. Es scheint, als existiere eine Kognition neben der verbalen, die eine weitere asymmetrische Funktion des Gehirns repräsentiert. Die rechte Hemisphäre erfasst Informationen komplex. Ihre visuell-räumliche Spezialisierung hängt anscheinend mit der parallelen Verarbeitung von komplexen Reizen zusammen.

Aufgaben

1. Stellen Sie die Schlüsselfunktion der rechten Hemisphäre an Beispielen dar.
2. Erläutern Sie die Darstellung des Verschaltungsmodells in Abbildung 1.
3. Beschreiben Sie in Stichworten Lernsituationen, in denen komplexe Informationsverarbeitungsprozesse im Vordergrund stehen. Notieren Sie die Stichworte auf einer gelben Karte.

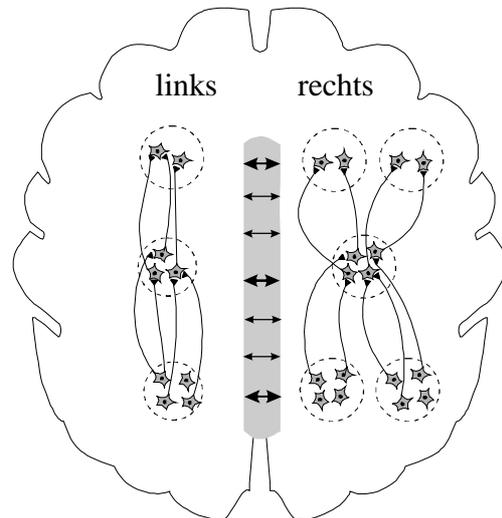


Abbildung 1
Schematische Darstellung der Verarbeitungsstrategien der linken und rechten Hemisphären

Eidesstattliche Versicherung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt habe. Direkt oder indirekt übernommene Gedanken aus fremden Quellen sind als solche kenntlich gemacht.

Ferner erkläre ich, dass es sich um meinen ersten Promotionsversuch handelt.

Bielefeld am 2006-10-22

StR Sven Horstmann