

## 2 Kognition

## 2.1 Selektive Aufmerksamkeit

Wir können nur schlecht zwei Gesprächspartnern gleichzeitig zuhören, gleichzeitig Musik hören und fernsehen, lesen oder Nachrichten hören. Am besten sind wir, wenn wir uns einer Reizquelle in unserer Umgebung zuwenden und störende Reize ausblenden können. Wir können auch nur einem Gedanken zu einer Zeit anhängen und sind beeinträchtigt, wenn wir zwei Handlungen gleichzeitig ausführen müssen. Diese Beschränkungen unserer Kapazität, die uns in einem Moment auf möglichst eine Reizkonstellation und eine Aufgabe festlegen, wird sich wie ein roter Faden durch die nächsten Kapitel ziehen. Während wir in diesem Kapitel, aufbauend auf den vorangegangenen Wahrnehmungskapiteln, die Selektion von Reizen in unserer Umwelt besprechen, wird es in den nächsten Kapiteln um die Selektion von Handlungen gehen.

### 2.1.1 Aufmerksamkeit als Selektionsprozess

Wenn wir etwas betrachten, so rückt dieser Gegenstand ins Zentrum der Aufmerksamkeit, andere Dinge in unserer Umgebung werden demgegenüber vernachlässigt. Eine wichtige Rolle der Aufmerksamkeit ist damit die Selektion von Teilen unserer Umwelt. Wie geschieht nun diese Selektion? Ein einflussreiches Modell wurde 1958 von Donald Broadbent vorgeschlagen.

Broadbent hatte, angeregt durch praktische Probleme der Telekommunikation und Sprachübermittlung, sogenannte *shadowing*-Experimente durchgeführt. Das Prinzip dieser Experimente war, dass den Versuchspersonen über Kopfhörer verschiedene Texte auf dem linken und dem rechten Ohr präsentiert wurden. Die Probanden waren instruiert, sich auf ein Ohr zu konzentrieren und den dort präsentierten Text nachzusprechen. Broadbent beobachtete, dass die Probanden die dem unbeachteten Ohr präsentierten Texte nicht behielten. Mehr noch, sie merkten nicht einmal, wenn der Text auf dem nicht beachteten Ohr plötzlich vom Englischen ins Deutsche wechselte. Nur deutliche Veränderungen der physikalischen Lautstruktur, wie ein Wechsel von einer männlichen zu einer weiblichen Sprecherstimme oder eingefügte Piep-Laute wurden bemerkt.

Broadbent erklärte diese Daten mit seiner Filter-Theorie (1958). Ausgehend von informationstheoretischen Modellen zur Signalübertragung nahm er an, dass die Vielzahl sensorischer Reize, die parallel von unseren Sinnesorganen aufgenommen werden, nur kurz in einem sensorischen Speicher (Kap. 3.4) gehalten und dann so gefiltert werden, dass nur ein Bruchteil der Reize eine weitergehende Verarbeitung erfährt. Broadbent dachte, dass nur die sensorische Verarbeitung über parallele Sinneskanäle läuft, während hinter dem Filter ein einheitlicher „Kanal“ die weitere Verarbeitung übernimmt. Das Modell war stark von technischen Vorstellungen geprägt und versuchte nicht, die Verarbeitung im menschlichen Gehirn konkret abzubilden.

Seine Befunde ergaben, dass nur auffällige physikalische Eigenschaften der nicht beachteten Quelle die Aufmerksamkeitsselektion durchbrechen konnten, nicht aber ebenso gravierende semantische oder syntaktische Aspekte des Textes.



Filtermodell

frühe Selektion

Deswegen nahm er an, dass der nicht beachtete Text erst gar keine weitergehende Verarbeitung erfuhr. Damit wurde Broadbents Filter-Theorie zum klassischen Beispiel einer Theorie der frühen Selektion (*early selection*).

Bald schon wurden jedoch Befunde berichtet, die mit früher Selektion nicht in Einklang standen. Moray (1959) führte *shadowing*-Experimente durch, in denen er zeigen konnte, dass selbst bis zu 30-mal wiederholte Wörter auf dem unbeachteten Ohr von den Probanden im Anschluss an das Experiment nicht benannt werden konnten. Insofern bestätigte er Broadbents Befunde. Moray fand jedoch auch, dass hochrelevante Wörter, wie etwa der eigene Name, auf dem nicht beachteten Ohr entdeckt wurden (s. a. Wood/Cowan 1995). Dies sprach nun gegen die Annahme, dass die dem nicht beachteten Ohr präsentierten Wörter überhaupt nicht semantisch verarbeitet wurden.

In den 1960er Jahren führte Anne Treisman eine Reihe von Experimenten durch, die auch gegen eine strikte frühe Selektion sprachen. Treisman präsentierte je eine Geschichte auf dem linken und dem rechten Ohr und instruierte ihre Probanden, sich auf ein Ohr zu konzentrieren. Nach einer Weile wechselte jedoch die Geschichte abrupt zum jeweils anderen Ohr. Treisman konnte zeigen, dass ihre Probanden diesem Wechsel für die Dauer von einigen Wörtern folgten, bevor sie wieder instruktionsgemäß zu dem ursprünglich beachteten Ohr zurückwechselten.

Weitere Experimente zeigten, dass den Probanden das *shadowing* einer Geschichte am leichtesten fiel, wenn auf dem nicht beachteten Ohr sinnlose Silben präsentiert wurden. Etwas schwieriger wurde die Aufgabe, wenn ein technischer Text präsentiert wurde, der sich stark von dem zu beachtenden Text unterschied. Am schwierigsten war die Aufgabe, wenn sich beide Texte stark ähnelten. Dennoch konnten die Versuchsteilnehmer im Nachhinein nicht berichten, welchen Inhalts der nicht beachtete Text war. Treisman stellte auch fest, dass sich der „Durchbruch des Nichtbeachteten“ selbst bei hochrelevanten Wörtern nur zu etwa 6 % vollzog. Sie hielt deshalb an Broadbents Filter-Konzept fest, schloss jedoch, dass dieser Filter nicht so ausschließlich über physikalische Reizmerkmale funktioniert wie in Broadbents ursprünglicher Konzeption.

Dem stellten Deutsch und Deutsch (1963) eine völlig andere Konzeption der Aufmerksamkeitsselektion entgegen. Sie postulierten, dass alle vom Individuum aufgenommenen Reize vollständig verarbeitet werden und erst dann, gemäß den Anforderungen der Situation, relevante Information ausgewählt wird. Dies war der Prototyp einer Theorie der späten Selektion (*late selection*).

Während die Vertreter der frühen oder späten Selektion lange Zeit darüber stritten, wer die besseren Argumente hätte, reifte schließlich die Einsicht, dass dieser Streit um einen künstlich aufgebauten Widerspruch entbrannt war. Kahneman und Treisman (1984) hatten darauf hingewiesen, dass in der Aufmerksamkeitsliteratur zwei Klassen von Experimenten unterschieden werden konnten, die unterschiedliche Anforderungen an Aufmerksamkeitsprozesse stellen. Auf der einen Seite fanden sie Experimente wie *shadowing* oder die Teilberichts-aufgabe, in denen eine große Zahl von Reizen präsentiert werden und die korrekte Reaktion aus einer Vielzahl von Alternativen ausgewählt werden muss, etwa durch Benennung eines Reizes. Hierbei sahen sie die Aufmerksamkeitsanforderung als selektives Filtern. Auf der anderen Seite standen Experimente, die wenige Stimuli verwendeten und



**späte Selektion**

**flexible Filterung**

in denen die Antwortmöglichkeiten eng begrenzt waren, etwa bei der Messung von Reaktionszeiten bei Einfachwahlreaktionen. Bei dieser Art von Aufgaben bestand die Aufmerksamkeitsleistung in einer selektiven Voreinstellung (*selective set*), etwa auf bestimmte Reizcharakteristika oder räumliche Positionen.

Kahneman und Treisman folgerten daraus, dass eine frühe Filterung dann durchgeführt wird, wenn die Verarbeitung aufgrund der Vielzahl von Stimuli und/oder Antwortanforderungen ohne Filter überlastet würde. Sind jedoch nur wenige Reize zu verarbeiten und auch die Antwortanforderungen begrenzt, so erübrigt sich eine frühe Selektion. Anknüpfend an diese Überlegung konnte Lavie (1995) empirisch nachweisen, dass eine frühe Selektion nur bei hoher perzeptueller Belastung auftrat. Für die Bearbeitung der Aufgabe wurden irrelevante Reize also früh gefiltert, wenn die Aufgabenbearbeitung die Beachtung einer größeren Zahl von Reizen (oder weniger komplexer Reize) verlangte. War dies nicht der Fall, wurden die irrelevanten Reize auch (unbewusst) relativ weitgehend analysiert.

Ein weiterer empirischer Beleg für späte Selektion ist negatives *Priming*. In diesen Experimenten werden Reize präsentiert, von denen einer als aufgabenrelevant, der andere als irrelevant gekennzeichnet ist. Die Probanden werden aufgefordert, die irrelevanten Reize nicht zu beachten. Dennoch zeigt sich, dass die irrelevanten Reize, wenn sie in späteren Durchgängen als relevanter Reiz verwendet werden, längere Verarbeitungszeiten verursachen. Daher weiß man, dass die irrelevanten Reize nicht einfach ignoriert werden, sondern eine weitergehende Verarbeitung erfahren (Tipper 1985). Wird jedoch die Anzahl der relevanten Reize erhöht, verringert sich das negative Priming (Lavie/Fox 2000). Daraus wurde geschlossen, dass die Selektion in Abhängigkeit von der Aufgabe früher oder später erfolgte. War nur ein relevanter Reiz zu beachten, bestand keine Notwendigkeit für eine frühe Selektion und die einzige Selektion, die erfolgte, war die Auswahl der richtigen Reaktion. Steigt die perzeptuelle Last jedoch, wird bereits eine frühe Selektion auf der Stufe perzeptueller Prozesse durchgeführt, um die optimale Erkennung der Zielreize zu gewährleisten.

### 2.1.2 Modelle der visuellen Suche

Wir haben bisher auf einer recht abstrakten Ebene diskutiert, an welcher Stelle der Informationsverarbeitung eine Selektion relevanter Inhalte entstehen kann. Der folgende Abschnitt soll nun anhand von Modellen der visuellen Suche darstellen, wie man sich die Umsetzung dieser Vorstellungen denken kann.

**Merkmalsintegrationstheorie/FIT:** Eine der einflussreichsten Theorien der visuellen Suche ist die Merkmalsintegrationstheorie (*feature-integration-theory*, FIT) von Treisman und Gelade (1980). Die Grundidee dieser Theorie ist folgende: Es gibt basale visuelle Merkmale, die so etwas wie die „Atome“ der Wahrnehmung sind und von uns automatisch verarbeitet werden, also ohne dass wir begrenzte Ressourcen für die Erkennung dieser Merkmale aufwenden müssen. Man spricht daher auch von präattentiver Verarbeitung. Natürlich gibt es auch komple-

Ressourcen-  
verteilung

negatives Priming

xere Stimuli, die aus mehreren Merkmalen zusammengesetzt sind und deren Auffinden in Suchdisplays Aufmerksamkeit verlangt.

**Guided search:** Ein weiteres einflussreiches Modell der visuellen Suche ist *guided search* (Cave/Wolfe 1990; Wolfe et al. 1989). Während die FIT ursprünglich davon ausging, dass die Verarbeitung von Merkmalen parallel, die Verarbeitung von Konjunktionen hingegen seriell ablief, wies Wolfe darauf hin, dass die Suche nach Konjunktionsreizen häufig zu schnell für eine vollständig serielle Suche verlief. Im Unterschied zu FIT ging er davon aus, dass die „präattentive“ Verarbeitung die anschließende attentive Verarbeitung lenken könne. So kann zwar die Verknüpfung einer Farbe (z. B. rot) und einer Ausrichtung (vertikal) nicht auf der Stufe der Merkmalskarten gefunden werden, aber die durch den Reiz ausgelösten Aktivierungen in den Merkmalskarten können zu einer Gewichtung führen, die den nachfolgenden attentiven Suchprozess zu allen roten und vertikalen Reizen, und damit zum Zielreiz, führt. Ein solcher Lenkungsmechanismus kann natürlich auch gut erklären, warum die Suche bei heterogenen Ablenkern schwieriger wird. Je heterogener die Ablenker sind, umso mehr verteilt sich die Aktivierung in den Merkmalskarten auf verschiedene Merkmale und umso weniger kann der Suchprozess auf bestimmte Merkmale eingengt werden.

**Attentional Engagement Theory (AET):** Die attentional engagement-Theorie (AET) von Duncan und Humphreys (1992) unterscheidet sich von der FIT einerseits darin, dass die Unterscheidung in parallele und serielle Suche keine zentrale Rolle spielt. Andererseits hängt die Effizienz der Suche in ihrem Modell nicht direkt von Reizmerkmalen ab, sondern vielmehr von der Ähnlichkeit oder Unähnlichkeit der Reize.

Die Effizienz der Suche hängt nicht nur von der Zahl der Ablenker, sondern auch von ihrer Heterogenität ab. Duncan und Humphreys (1989) haben diesen Zusammenhang untersucht und festgestellt, dass die Sucheeffizienz sowohl von der Ähnlichkeit zwischen Zielreiz und Ablenkern wie auch von der Ähnlichkeit der Ablenker untereinander abhängt (s. Abb. 1.2.5 zur Veranschaulichung). Die Suche ist besonders effizient, wenn Zielreiz und Ablenker sehr unähnlich und die Ablenker untereinander sehr ähnlich sind. Steigt die Ähnlichkeit von Zielreiz und Ablenkern, und sinkt die Ähnlichkeit zwischen den Ablenkern, so wird die Suche schwieriger.

Bei der Betrachtung der Ähnlichkeitsverhältnisse zwischen Stimuli muss auf zwei Aspekte geachtet werden. Zum einen, welche Ähnlichkeiten zwischen den Reizen des Displays bestehen, das gerade abgesucht wird. Zum anderen muss aber auch berücksichtigt werden, welche Ähnlichkeiten ein konkreter Reiz zu allen möglichen, d. h. zu irgendeinem Zeitpunkt im Experiment verwendeten Reizen hat. Wenn der Betrachter etwa die Aufgabe hat, nach den Buchstaben O und Q zu suchen, so wird ihr die Klassifizierung eines R als Ablenker dadurch erschwert, dass Q und R ein gemeinsames Merkmal (den schrägen Strich) haben, auch wenn im aktuellen Display gar kein Q enthalten ist (Pashler 1987). Andererseits sind die in einem Display enthaltenen Reize und ihre räumliche Nachbarschaft entscheidend für die Gruppierung von Reizen, ein Faktor, der die Sucheeffizienz entscheidend beeinflussen kann.

Die AET geht davon aus, dass alle von den Sinnesorganen aufgenommenen Reize sehr weitgehend verarbeitet werden, bis hin zu Assoziationen mit Gedächtnisinhalten. Auf dieser Ebene der perzeptuellen Deskription erfolgt auch eine Gruppierung von Reizen, wie sie etwa durch die Gestaltgesetze beschrieben werden. Diese Segmentierung erfolgt auf mehreren Maßstabsebenen, und das Ergebnis sind hierarchisch strukturierte Einheiten. Der Sprung in die bewusste Wahrnehmung gelingt jedoch nur den Informationen, die in das visuelle Arbeitsgedächtnis aufgenommen werden (s. Kap. 3.4 für weitere Konzepte zum Zusammenhang von Aufmerksamkeitsfokus und Arbeitsgedächtnis). Entscheidend für die Aufnahme in das Arbeitsgedächtnis ist die Übereinstimmung mit Schablonen, die die Erwartung des Individuums widerspiegeln. Die AET gehört damit zu den Theorien der späten Selektion.

Eine Grundannahme der FIT ist, dass die Verknüpfung von Merkmalen zu einem Reiz Aufmerksamkeit erfordert. Dies soll über Merkmalskarten und eine zentrale Ortskarte geschehen (Abb. 2.1.1). Präsentation eines Stimulus führt zu Aktivierungen in den jeweiligen Merkmalskarten. Um zu erkennen, dass ein präsentierter Reiz sowohl vertikal ausgerichtet wie auch rot ist, müssen die Aktivierungen in den entsprechenden Merkmalskarten – vertikal, rot – über die zentrale Ortskarte miteinander verknüpft werden. Dies erfordert Aufmerksamkeit. Treisman kam zu dieser Aussage insbesondere über die Beobachtung „illusionärer Verknüpfungen“. Merkmale unterschiedlicher Reize eines Displays werden irrtümlich miteinander verknüpft (etwa grünes O aus grünem X und rotem O), wenn die Aufmerksamkeit durch eine simultane Zweitaufgabe gebunden war (Treisman/Schmidt 1982).

Wie wir gesehen haben, werden die Charakteristika eines Reizes gemäß FIT erst in einer Reihe von getrennten Karten analysiert, bevor sie unter Verwendung von Aufmerksamkeit wieder zusammengefügt werden. Diese Architektur erscheint zunächst kontraintuitiv. Allerdings haben wir gesehen, dass es für visuelle Merkmale wie Farbe und Bewegung im Gehirn eine gewisse Spezialisierung gibt, in dem Sinne, dass diese Merkmale zwar zunächst parallel, etwa in V1, verarbeitet werden, dann aber auch in spezialisierten Arealen wie hMT+ oder V4 (Kap. 1.3 und 1.4). Wenn einzelne Merkmale zuerst getrennt analysiert werden, dann müssen sie auch wieder aufwendig, unter Verwendung limitierter Ressourcen, zusammengefügt werden. Als möglichen Mechanismus für dieses „Binding“ wurde die zeitliche Synchronisierung der neuronalen Aktivität in verschiedenen Hirnarealen vorgeschlagen, die Aspekte des gleichen Reizes bearbeiten. Eine sehr präzise Synchronisierung neuronaler Feuerraten in weit voneinander entfernten Hirnarealen wurde tatsächlich in einer Reihe von tierexperimentellen Untersuchungen gefunden (Engel/Singer 2001).

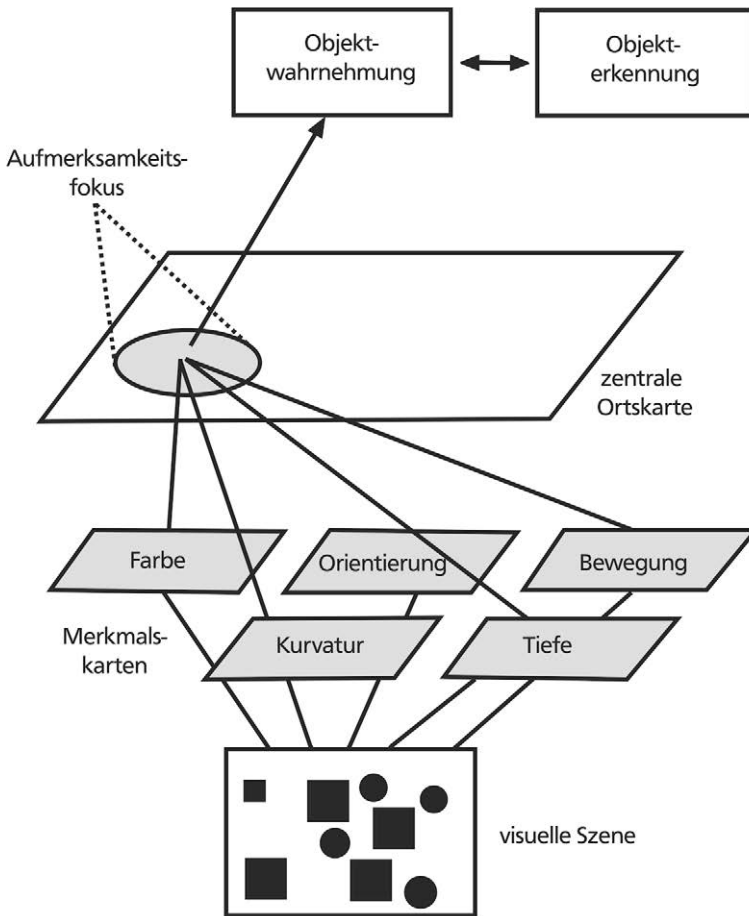
Die Frage, was ein Merkmal ist, ist damit von der Diskriminationsfähigkeit des Gehirns abhängig. Schon bald nach der ursprünglichen Formulierung der FIT wurden eine Reihe von Experimenten berichtet, in denen Konjunktsreize, also Stimuli, die sich von den Ablenkerreizen nur in der Verknüpfung physikalischer Merkmale unterschieden, flache Suchzeiten hervorriefen. Dies betraf etwa dreidimensionale, würfelförmige Stimuli oder durch Schattierung hervorgerufene Eindrücke konkaver oder konvexer Elemente. Diese Befunde wurden als Wider-

**Merkmals-  
verknüpfung**

**gelernte „basale“  
Merkmale**

legung der FIT angesehen. Treisman erweiterte ihre Theorie daraufhin um die Annahme, dass wir in der Lage sind, auch physikalisch komplexe Reize wie Merkmale zu verarbeiten, insbesondere dann, wenn wir eine lange Lernerfahrung mit den jeweiligen Reizen haben.

Diese Annahme wurde später in einem Experiment überprüft, in dem die Technik der transkraniellen Magnetstimulation eingesetzt wurde, um Neurone des posterioren Parietallappens kurzzeitig in ihrer Funktionalität zu stören (Walsh et al. 1998). Die Probanden suchten nach einem grünen vertikalen Balken unter grünen horizontalen und blauen vertikalen Ablenkern. Das ist eine typische Konjunktionssuchaufgabe, die zu ineffizienter Suche führt, mit ansteigenden Suchzeiten



**Abb. 2.1.1:** Skizze der Merkmalsintegrationstheorie (FIT)

Dieses Dokument wurde mit IP-Adresse 141.46.144.6 aus dem Netz der USEB HS Zittau am 14.10.2020 um 18:17 Uhr heruntergeladen. Das Weitergeben und Kopieren dieses Dokuments ist nicht zulässig.

mit steigender Displaygröße (Kap. 1.1). Wurde kurz nach der Präsentation des Suchdisplays ein Magnetpuls über dem posterioren Parietallappen gegeben, so verlängerte sich die Suchzeit – ein Zeichen dafür, dass parietale Neurone offenbar in die Suche involviert waren. Die Probanden übten dann die Suchaufgabe so lange (im Durchschnitt 2.500 Versuchsdurchgänge), bis ihre Suchzeiten mit steigender Displaygröße nicht mehr anstiegen – ein Zeichen dafür, dass die Probanden die Zielreize in den Displays mit einem Blick erfassten (*pop out*), eines der Kriterien für ein basales visuelles Merkmal. Wurden nun nach dieser Trainingsphase wieder parietale TMS-Pulse gegeben, so beeinflusste das die Suchzeiten nicht mehr. Die Studie zeigte also nicht nur, dass anhaltendes Training zu einer automatischen Detektion von zuvor nur mit Hilfe aufmerksamkeitsfordernder Suche auffindbaren Konjunktionsreizen führte. Sie zeigte auch, dass der posteriore Parietalcortex in die aufmerksamkeitsfordernde Suche eingebunden war, aber nicht in die automatische Detektion basaler visueller Reize.

Ist der posteriore Parietalcortex damit der Ort der zentralen Ortskarte nach der FIT, also eine Struktur, in dem die in den visuellen Arealen verteilt kodierten Merkmale wieder zu einem Objekt zusammengefügt werden? Mehrere bildgebende Studien haben sich dieser Frage gewidmet, bisher jedoch ohne eindeutiges Ergebnis. Die Logik dieser Studien bestand darin, eine Konjunktionssuche mit einer einfachen Merkmalsuche zu vergleichen. Hirnareale, die bei der Konjunktionssuche stärker aktiviert werden, könnten in die Verknüpfung der Merkmale zu dem gesuchten Zielreiz involviert sein. Dieser Vergleich ist aber problematisch, weil Konjunktionssuchen i. d. R. schwieriger als Merkmalsuchaufgaben sind. Damit könnten stärkere Aktivierungen bei der Konjunktionssuche auf andere Faktoren als auf die Merkmalsverknüpfung zurückzuführen sein.

Eine Studie, die die Suchschwierigkeit unabhängig von der Merkmalsverknüpfung variiert hatte, fand kein parietales Areal, das allein durch die Merkmalsverknüpfung stärker aktiviert wurde (Nobre et al. 2003). Eine weitere Studie nach demselben Schema fand ebenfalls eine weitgehende Überlappung zwischen den Arealen, die auf Suchschwierigkeit einerseits und auf die Anforderung der Merkmalsverknüpfung andererseits reagierten. Nur kleine Areale entlang des deszendierenden Sulcus intraparietalis und in den frontalen Augenfeldern schienen primär auf Merkmalsverknüpfung zu reagieren (Donner et al. 2002).

Ein Problem bei diesen Studien ist, dass man die Aufgabenschwierigkeit zwischen einer Merkmals- und einer Konjunktionssuche nur vergleichbar halten kann, indem man sehr untypische Reize verwendet. Wenn eine Verknüpfung leicht gelingt, wie zwischen Größe und Farbe (Nobre et al. 2003), mag das ein Zeichen dafür sein, dass die Probanden schnell lernten, die Zielreize als ein basales Merkmal zu verarbeiten, wie in der Studie von Walsh und Kollegen (1998). Umgekehrt verwendeten Donner und Mitarbeiter sehr ähnlich aussehende Reize, um die Schwierigkeit der Merkmalsuche zu erhöhen. Vielleicht führt auch das dazu, zusätzliche Suchprozesse zu aktivieren, die bei einer einfachen Merkmalsuche nicht benötigt werden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Lernexperiment von Walsh und Kollegen noch am ehesten einen Hinweis darauf gab, dass der posteriore Parietalcortex die Funktion hat, im Occipitalcortex verteilt kodierte Merkmalsrepräsentationen miteinander zu verknüpfen.

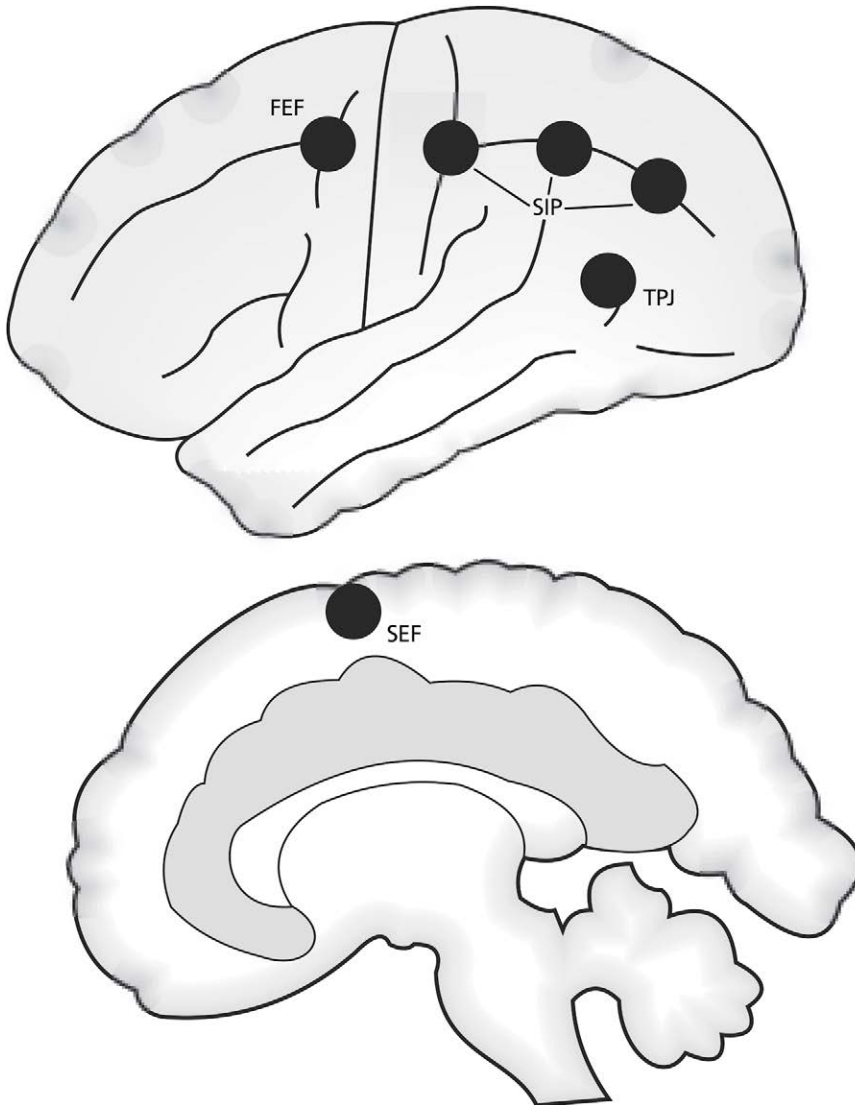
### zentrale Ortskarte



### 2.1.3 Frontoparietales Aufmerksamkeitsnetzwerk

Mit großer Übereinstimmung wurde bei räumlichen Aufmerksamkeitsanforderungen ein frontoparietales Netzwerk gefunden, das im Kern aus folgenden Strukturen besteht (Abb. 2.1.2): Im Frontallappen wurden insbesondere Areale aktiviert, die den prä- und supplementärmotorischen Cortices angehören und die speziell die Steuerung von Augenbewegungen unterstützen. Im frontomedianen Cortex ist dies das supplementäre Augenfeld. Es befindet sich im medialen

**Frontalcortex**



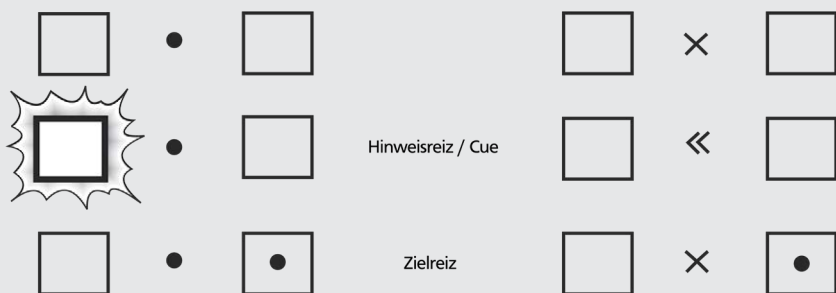
**Abb. 2.1.2:** Das frontoparietales Aufmerksamkeitsnetzwerk. FEF: frontales Augenfeld; SEF: supplementäres Augenfeld; SIP: Sulcus intraparietalis; TPJ: temporoparietale Grenzregion

Frontalcortex im Bereich der Mantelkante, genau posterior zu einer gedachten coronaren Schnittebene durch die Commissura anterior und anterior zum motorischen Cortex. Weiter lateral, an der Mündung des Sulcus frontalis superior in den Sulcus praecentralis, befindet sich das frontale Augenfeld. Dieses wird reliabel aktiviert, zusammen mit einem weiter ventral an den Ufern des inferioren Abschnitts des Sulcus praecentralis gelegenen Areal, wenn die Versuchspersonen Sakkaden ausführen. Diese Areale, die alle in die Steuerung offener Augenbewegungen involviert sind, werden gleichermaßen aktiviert, wenn verdeckte Aufmerksamkeitsverlagerungen vorgenommen werden. Überhaupt wurden nur geringe Unterschiede im Aktivationsmuster bei offenen und verdeckten Aufmerksamkeitsverlagerungen gefunden.

### Räumliches Cueing-Paradigma

Das Paradigma, welches zur Charakterisierung des Aufmerksamkeitsnetzwerks am häufigsten verwendet wurde, stammt von Posner und Cohen (1984). Die grundlegende Idee dieser Experimente ist, dass die Aufmerksamkeit auf einen bestimmten Ort gerichtet werden kann, ohne dass es eine begleitende Augenbewegung gibt. Man beachtet also einen Ort „aus den Augenwinkeln heraus“. Diese Ausrichtung der Aufmerksamkeit wird verdeckte Aufmerksamkeit genannt.

Im Experiment fixieren die Probanden einen Punkt in der Mitte des Bildschirms. Ein Lichtreiz, den es zu entdecken gilt, kann an gekennzeichneten Orten links oder rechts des Fixationspunktes aufleuchten. Vor der Präsentation dieses Zielreizes erscheint ein Hinweisreiz, der einen der beiden möglichen Präsentationsorte markiert. Der grundlegende Befund ist, dass unter bestimmten Bedingungen die Entdeckung des Zielreizes erleichtert wird, wenn der Hinweisreiz den Präsentationsort des Zielreizes markiert hat. Dieser „Gewinn“ zeigt, dass der Hinweisreiz die Entdeckung des Zielreizes erleichtert hat, dass es also möglich ist, Aufmerksamkeit auf eine extrafoveale Lokation zu verschieben. Entsprechend findet man auch eine Reaktionszeitverlängerung („Kosten“), wenn der Zielreiz nicht an dem durch den Hinweisreiz markierten Ort erscheint. Die Reaktionszeit ist dann länger, als wenn überhaupt kein Hinweisreiz gegeben wird.



**Abb. 2.1.3:** Versuchsablauf beim räumlichen Cueing-Paradigma. Links: peripherer Cue. Rechts: zentraler Cue. In den Beispielen sind die Cues invalide.

Interessanter als diese Befunde sind die Rahmenbedingungen, unter denen diese Effekte auftreten. Zunächst kann man zwei Arten von Hinweisreizen unterscheiden: Der Hinweisreiz kann darin bestehen, dass direkt einer der potenziellen peripheren Präsentationsorte des Zielreizes markiert wird (Abb. 2.1.3 links). Ein solcher peripherer Hinweisreiz – i. d. R. das Aufleuchten eines Rahmens um einen potenziellen Präsentationsort – führt dazu, dass die Aufmerksamkeit automatisch, also durch den Reiz getrieben, auf den Ort des Hinweisreizes ausgerichtet wird. Diese Schlussfolgerung beruht auf folgenden Befunden. Zum einen entfalten periphere Hinweisreize ihre Wirkung selbst dann, wenn man eine willentliche Ausrichtung der Aufmerksamkeit dadurch unwahrscheinlich macht, dass die Hinweisreize genauso häufig den falschen wie den richtigen Reizort markieren. Man spricht dann davon, dass sich die Validität des Reizes auf dem Zufallsniveau befindet. Weiterhin spricht für eine automatische Aufmerksamkeitsauslenkung, dass die Reaktionszeit auf einen Zielreiz am zuvor markierten Ort nur dann verkürzt ist, wenn der Zielreiz sehr schnell (in einem Zeitfenster von etwa 250 ms) auf den Hinweisreiz folgt.

Dies kontrastiert mit einer willentlichen (endogenen) Aufmerksamkeitsauslenkung als Reaktion auf einen symbolischen Hinweisreiz (Abb. 2.1.3 rechts). In diesem Fall wird nicht der Reizort selbst markiert, sondern ein Hinweisreiz – typischerweise ein nach links oder rechts weisender Pfeil in der Mitte des Bildschirms – gibt einen indirekten Hinweis auf den wahrscheinlichen Präsentationsort des Zielreizes. Diese Art von Hinweisreiz ist nur dann effektiv, wenn die Validität des Hinweisreizes recht hoch ist (typisch sind 70–100 % valide Reize). Weiterhin beobachtet man Gewinne und Kosten erst ab ca. 300 ms nach Präsentation des Hinweisreizes. Beides, die Abhängigkeit von der Validität des Hinweisreizes und der verzögerte Zeitverlauf, deutet darauf hin, dass symbolische Hinweisreize ihre Wirkung nicht durch reizgetriebene Aufmerksamkeitsauslenkung, sondern durch eine endogene Aufmerksamkeitsauslenkung erzielen, die gegenüber der automatischen Aufmerksamkeitsauslenkung verzögert ist.

Im Parietallappen unterstützen mehrere Areale entlang des Sulcus intraparietalis räumliche Aufmerksamkeitsfunktionen. Der Sulcus intraparietalis (SIP) ist eine U-förmig gebogene Struktur, die anterior in den Sulcus postcentralis mündet und posterior in den Sulcus intraoccipitalis übergeht (Abb. 2.1.2, s. a. Abb. 1.7.4). Der SIP ist in einen aufsteigenden (anterioren), horizontalen und absteigenden (posterioren) Ast gegliedert. Aufmerksamkeitsbezogene Aktivierungen finden sich insbesondere im horizontalen und im absteigenden Ast. Manchmal tritt eine dritte Aktivierung im aufsteigenden Ast hinzu. Der aufsteigende Ast ist jedoch insbesondere für die räumliche Koordination von Greifbewegungen von Bedeutung (Binkofski et al. 1998). Auch im inferioren Parietallappen, an der Grenze zum Temporallappen, findet sich häufig eine weitere Aktivierung. Occipital findet man eine großflächige Modulation visueller Areale durch gerichtete Aufmerksamkeit, insbesondere contralateral zur beachteten Seite.

### 2.1.4 Aufmerksamkeitssteuerung

#### vorbereitende und reizbezogene Aktivierung

Die zeitliche Auflösung der fMRT erlaubt eine ereigniskorrelierte Auswertung, d. h. eine Zuordnung von Aktivierungen zu auslösenden Ereignissen. In einigen Studien wurde untersucht, welche Hirnareale durch Präsentation eines räumlichen Hinweisreizes aktiviert wurden und welche Areale infolge der Entdeckung des nachfolgenden Zielreizes aktiviert wurden. Dabei zeigte sich, dass die frontalen Anteile des Netzwerks und der horizontale SIP bereits dann aktiviert wurden, wenn der Hinweisreiz gegeben wurde, so dass die Probanden ihre Aufmerksamkeit auf den angegebenen Ort ausrichten konnten. Im Gegensatz dazu wurden der Cortex um den deszendierenden Ast des SIP, an der Grenze zum Occipitallappen, sowie die visuellen occipitalen Areale erst mit Präsentation des Zielreizes aktiviert (Kastner et al. 1999).

Dieses Aktivierungsmuster bestätigte die Vorstellung, dass die anterioren Anteile des Netzwerkes – insbesondere die frontalen, in die Steuerung offener Augenbewegungen involvierten Augenfelder – auch an der Steuerung verdeckter Augenbewegungen partizipieren. Dagegen ist die Aktivierung der visuellen Areale des Occipitalcortex stärker an die physische Präsenz visueller Stimuli gebunden. Das Areal um den deszendierenden Ast des SIP scheint dabei eine Ausnahme zu sein, da es eher eine reizbezogene Aktivierung zeigte, analog zu den occipitalen Arealen.

Die zeitliche Trennung von Aktivierungen, die durch Hinweisreiz und Zielreiz ausgelöst wurden, ergab auch einen weiteren interessanten Befund. In der Grenzregion zwischen Parietallappen und Temporallappen wurde sowohl in tierexperimentellen Untersuchungen (Steinmetz/Constantinidis 1995), Patientenstudien (Friedrich et al. 1998) wie in bildgebenden Untersuchungen (Corbetta et al. 2000) eine zielreizbezogene Aktivierung gefunden, die besonders stark war, wenn der Zielreiz an einem anderen als dem durch den Hinweisreiz angezeigten Ort präsentiert wurde. In diesen Studien wurden Varianten des räumlichen Cueing-Paradigmas verwendet, wobei das Augenmerk insbesondere darauf lag, wie schnell sich die Probanden von einem Aufmerksamkeitsfokus lösen konnten, wenn der Cue in die Irre führte und der Zielreiz an einem anderen als dem angezeigten Ort erschien.

Beispielhaft sei kurz die Patientenstudie beschrieben. Es wurden zwei Gruppen von Patienten untersucht: eine, deren Läsionen primär den superioren Parietalcortex betrafen, und eine zweite, deren Läsionen im temporoparietalen Übergangscortex zentriert waren. Beide Gruppen wurden mit dem Posner-Paradigma (s. Kasten „Räumliches Cueing-Paradigma“) getestet, wobei durch periphere Hinweisreize eine automatische Aufmerksamkeitsauslenkung hervorgerufen wurde. Beide Patientengruppen profitierten von den Hinweisreizen, indem sie schnellere Reaktionszeiten zeigten, wenn der Zielreiz am Ort des Hinweisreizes präsentiert wurde. Nur die zweite Patientengruppe, mit Läsionen der temporoparietalen Übergangsregion, zeigte stark verlängerte Reaktionszeiten, wenn der Hinweisreiz die Aufmerksamkeit auf einen Ort im ipsiläsionalen Halbfeld lenkte, der Zielreiz aber contraläsional präsentiert wurde. Dieses Reaktionsmuster wurde als Unfähigkeit interpretiert, die Aufmerksamkeit von einem Reizort zu lösen, um sie neu auszurichten.

#### Reize außerhalb des Aufmerksamkeits- fokus



Dass die temporoparietale Übergangsregion für die Entdeckung von Reizen, insbesondere an unerwarteten Orten, von Bedeutung sei, passt gut dazu, dass nach Läsionen dieses Gebiets Aufmerksamkeitsstörungen wie Neglect (Mort et al. 2003) oder Extinktion (Karnath et al. 2003) beschrieben wurden, denen gemeinsam ist, dass die Patienten Anteile ihrer Umgebung vernachlässigen (Kap. 1.3).

Das Auftreten eines Reizes außerhalb des Aufmerksamkeitsfokus kann zu einer Neuausrichtung der Aufmerksamkeit führen, wie wir gerade gesehen haben. Aber auch ohne das Auftreten solcher Reize ist es sinnvoll, die Aufmerksamkeit nicht zu lange auf einen Ort zu konzentrieren, um für neue Reize an anderen Orten des Gesichtsfeldes wieder aufnahmebereit zu sein. Tatsächlich scheint ein solcher Mechanismus fest in unser Aufmerksamkeitssystem „eingebaut“ zu sein. Wenn die Aufmerksamkeit durch einen auffälligen Reiz, etwa das Aufleuchten eines Rahmens, auf einen Ort ausgelenkt wird, so ist die Erkennung eines Zielreizes an diesem Ort nur in einem Zeitfenster von etwa 250 ms beschleunigt. Wird der zeitliche Abstand zwischen Hinweisreiz und Zielreiz größer, dann beobachtet man das paradoxe Phänomen, dass die Reaktionszeit sogar verlängert ist gegenüber der Entdeckung eines gleichartigen Reizes an einem neutralen Ort. Aus dem Gewinn durch den Hinweisreiz innerhalb der ersten 250 ms werden also im weiteren Verlauf Kosten. Dieses Phänomen nennt man *inhibition of return* (IOR, Posner/Cohen 1984; Klein 2000). Eine mögliche Funktion von IOR mag sein, dass Aufmerksamkeitsressourcen für die Beachtung anderer Aspekte der Umwelt freigesetzt werden, wenn am attendierten Ort kein relevantes Ereignis stattfindet (Klein 2000).

IOR hängt von intakten Colliculi superiores ab (Sapir et al. 1999). In einer fMRT-Studie haben wir gefunden, dass neben der temporoparietalen Übergangsregion insbesondere die frontalen und supplementären Augenfelder bei IOR aktiviert waren (Lepsien/Pollmann 2002). Diese Areale sind primär in die Steuerung offener Augenbewegungen involviert. Kurzzeitige Ausschaltung der frontalen Augenfelder durch einen transkraniellen Magnetpuls reduzierte IOR (Ro et al. 2003). Zusammengefasst zeigen die Befunde eine deutliche Involvierung okulomotorischer Hirnareale in die Generierung von IOR.

## Inhibition of return

### 2.1.5 Auswirkungen von Aufmerksamkeit

Wir haben gesehen, dass ein komplexes Netzwerk von Hirnarealen aktiviert wird, wenn wir unsere Aufmerksamkeit auf einen bestimmten Reizort oder ein bestimmtes Reizmerkmal richten. Worin besteht aber nun das neuronale Äquivalent von „Aufmerksamkeit“, was wird im Gehirn bewirkt, wenn wir einen bestimmten Aspekt unserer Umwelt besonders beachten?

Eine Antwort auf diese Frage geben Studien, die die attentionale Modulation des fMRT-Signals in den retinotopen visuellen Arealen des Occipitallappens untersucht haben (Brefczynski/DeYoe 1999; Tootell et al. 1998). Die Vorgehensweise war analog zu den Studien, mit denen die Retinotopie der visuellen Areale zunächst bestimmt wurde (Kap. 1.3). Anstelle eines Reizes, der nacheinander an verschiedenen Stellen des Gesichtsfeldes präsentiert wurde, sollten die Probanden sukzessiv ihre Aufmerksamkeit auf verschiedene Stellen des Gesichtsfeldes

## Retinotopie der Aufmerksamkeit



richten, wobei sie stets den gleichen Punkt fixierten. Die Übereinstimmung zwischen den Aktivierungsmustern, die durch Reizpräsentation einerseits und reine Aufmerksamkeitsausrichtung andererseits hervorgerufen wurde, war sehr hoch. Aufmerksamkeitsausrichtung auf einen Ort im Gesichtsfeld führt also zu einem erhöhten Sauerstoffverbrauch in den gleichen Arealen wie die Präsentation eines visuellen Reizes am gleichen Ort.

Damit haben wir einen indirekten Hinweis auf eine erhöhte Aktivität retinotoper Neurone. Welche funktionelle Bedeutung hat aber nun diese erhöhte Aktivität? Tierexperimentelle Studien zeigen zwei Mechanismen, mit denen Aufmerksamkeit zu einer erhöhten Sensitivität für alle Reize, damit also auch für die schwachen, führt. Ein solcher Mechanismus ist in tierexperimentellen Studien im Areal V4 des Affen beschrieben worden (McAdams/Maunsell 1999). Eine andere Möglichkeit ist eine spezifisch für die schwachen Reize erhöhte Sensitivität. Ein solcher Mechanismus ist ebenfalls tierexperimentell in V4 beschrieben worden (Reynolds et al. 2000). Bildgebende Studien, die sich dieser Frage gewidmet haben, fanden zum einen, dass Aktivierungssteigerungen bereits vor der Präsentation des Reizes auftraten, also eher in Übereinstimmung mit einer allgemeinen Erhöhung der neuronalen Aktivität (Chawla et al. 1999). Zum anderen fanden sie aber auch selektiv erhöhte Aktivierung für die attendierten Stimuli (Murray/Wojciulik 2004). Inwieweit diese beiden Mechanismen, die sich nicht gegenseitig ausschließen, in spezifische Aufmerksamkeitsleistungen einfließen, bleibt der Gegenstand zukünftiger Untersuchungen.



## Fragen zu Kapitel 2.1

### Überprüfen Sie Ihr Wissen!

71. Was sind die Annahmen von Broadbents Filtermodell? Welche empirischen Daten unterstützen es? Welche nicht?
72. Unter welchen Umständen findet man Anzeichen von früher oder später Selektion? Nennen Sie empirische Studien.
73. Beschreiben Sie das Merkmalsintegrationsmodell.
74. Welche Kritik wurde am Merkmalsintegrationsmodell geäußert? Wie wurde das Modell daraufhin angepasst?
75. Wie unterscheidet sich das *guided search*-Modell vom Merkmalsintegrationsmodell?
76. Was sind die Grundannahmen der *attentional engagement*-Theorie?
77. Welche Evidenz gibt es für und gegen eine Beteiligung parietaler Neurone an der Merkmalsverknüpfung?
78. Welche Hirnareale gehören zum frontoparietalen Aufmerksamkeitsnetzwerk?
79. Was ist *inhibition of return*? Was weiß man über die neuronalen Korrelate?

## 2.2 Exekutivfunktionen I

### 2.2.1 Handlungskontrolle

Im Alltag sind wir ständig mit der Aufgabe konfrontiert, Handlungen auszuwählen, zu koordinieren oder in eine bestimmte Reihenfolge zu bringen. Manchmal genügt es, mehr oder weniger gut gelernte Routinehandlungen auszuführen, dann und wann aber müssen diese Handlungen unterbrochen werden, um durch eine Verhaltensänderung dafür zu sorgen, dass das angestrebte Ziel nicht aus den Augen verloren wird. Morgens auf dem Weg zur Uni zu einer bestimmten Zeit an einem bestimmten Ort auf die Straßenbahn zu warten, an einer bestimmten Zielhaltestelle wieder auszusteigen, dann an verschiedenen Wochentagen zu verschiedenen Hörsälen zu gehen und dort die bevorzugte Bankreihe aufzusuchen – das alles ist eine komplexe Folge von Handlungen, die uns aber nach einiger Zeit keinerlei Mühe mehr bereitet. Man spricht in einem solchen Fall davon, dass ein Handlungsschema vorhanden ist, dessen Ausführung relativ automatisch erfolgt. Ich kann mich in der Mensa mit den Tischnachbarn unterhalten, während ich meine Suppe löftele – aber nicht gleichzeitig. Es erfordert aber i. d. R. keinen großen Kontrollaufwand, Essen und Reden so aufeinanderfolgen zu lassen, dass sich beides nicht stört.

Handlungsschema

In einem einflussreichen Handlungskontrollmodell von Norman und Shallice (1980) wird diese Koordinierung inkompatibler Routinehandlungen *contention scheduling* genannt. Wir haben bereits als Kinder gelernt: „Mit vollem Munde spricht man nicht.“ Dies ist Bestandteil einer Reihe von Verhaltensweisen, die in einer bestimmten Situation (gemeinsames Essen) häufig zusammen auftreten und ein Schema bilden. Entscheidend ist hierbei, dass die Koordinierung auch komplexer Handlungen nach solchen Schemata abläuft, ohne dass wir bewusst eingreifen müssen.

contention  
scheduling

Es gibt aber auch Situationen, in denen diese automatische Koordination nicht weiterhilft. Dies ist der Fall, wenn noch kein Schema verfügbar ist (denken Sie an die erste Woche des ersten Semesters), wenn ein vorhandenes Schema abgeändert werden muss, wenn gefährliche Handlungen ausgeführt werden müssen, wenn Handlungen entgegen inkompatibler gewohnter Handlungsweisen erfolgen oder auch gewohnte Handlungen unterlassen werden sollen (Rauchen abgewöhnen; Diät). In diesen Fällen greift nach Norman und Shallice (1986; Shallice 1988) eine übergeordnete Kontrollinstanz ein, das *supervisory attentional system* (SAS). Eine solche Kontrollinstanz ist also nötig, wenn wir nicht zum Spielball unserer Umwelt oder unserer Gewohnheiten werden sollen.

supervisory atten-  
tional system (SAS)

Nach Läsionen des Präfrontalcortex wurde eine Außengeleitetheit des Verhaltens beobachtet, die auf den Ausfall einer solchen Kontrollinstanz hindeutet. In einem klassischen Fall versuchte der Patient, eine Brille, die vor ihm auf dem Tisch liegt, aufzusetzen, obwohl er seine Brille bereits trägt. Der bloße Anblick einer Kaffeekanne genügt, dass sich die Patienten eine Tasse eingießen und trinken, auch wenn sie eigentlich etwas ganz anderes vorhatten. In abgeschwächter Form mag uns allen schon Ähnliches passiert sein (Rauchen beim Anblick einer Zigarettenspackung, Essen von Erdnüssen, die auf dem Tisch stehen usw.).

## Exekutivprozesse

Für aktive Handlungskontrollprozesse hat sich die Bezeichnung Exekutivprozesse eingebürgert. Störungen dieser Kontrollprozesse werden in der Neuropsychologie unter dem Begriff „dysexekutives Syndrom“ zusammengefasst. Kennzeichen der Exekutivfunktionen ist, dass sie aufmerksamkeitsfordernd sind. Während überlernte Schemata nahezu automatisch ablaufen können (Morgentoilette, Frühstück und Fahrt zur Uni gelingen auch nach sehr wenig Schlaf), erfordern exekutive Kontrollprozesse ihren Anteil an den begrenzten attentionalen Ressourcen (aktive Teilnahme am Seminar).

Schon früh wurden Störungen exekutiver Funktionen nach präfrontalen Läsionen gefunden. Begriffe wie dysexekutives Syndrom, SAS oder zentrale Exekutive (Baddeley 1986; zu seinem Arbeitsgedächtniskonzept mehr in Kap. 3.1) suggerieren zunächst einmal eine einheitliche Kontrollinstanz, deren neuronales Substrat der Präfrontalcortex bildet. In diesem und dem nächsten Kapitel werden wir sehen, dass darin einerseits ein Körnchen Wahrheit steckt, andererseits aber durchaus einzelne Prozesse verschiedenen neuronalen Substraten zugeordnet werden können.

Wir beginnen zunächst mit der Frage, an welche Grenzen wir stoßen, wenn wir zwei Handlungen gleichzeitig ausführen wollen. Dann beschäftigen wir uns mit der Frage, welche „Kosten“ entstehen, wenn wir von einer Aufgabe zu einer anderen wechseln. Im nächsten Kapitel werden wir uns der Fehlerkontrolle und der Planung und Ausführung komplexerer Handlungsfolgen zuwenden.

### 2.2.2 Koordination mehrerer Handlungen

# B

Das Benutzen eines Handys beim Autofahren ist verboten. Der Gesetzgeber geht davon aus, dass die Bedienung des Handys die Fahrtüchtigkeit beeinträchtigt. Das Führen eines Gesprächs über die Freisprecheinrichtung ist dem Autofahrer dagegen erlaubt. Kann man hier davon ausgehen, dass sich dies nicht negativ auf unsere Fahrtüchtigkeit auswirkt? Wie ist es, wenn wir uns angeregt mit der Beifahrerin unterhalten? Manche Autos ermöglichen es, während der Fahrt über den Bordcomputer E-Mails zu schreiben, und das auch bei 200 km/h. Ist dies wirklich sinnvoll – oder sogar gefährlich?

Die beiden experimentellen Paradigmen, denen wir viele grundlegende Erkenntnisse bezüglich dieser Fragen verdanken, sind das Doppelaufgaben- und das Aufgabenwechselparadigma. Wir wenden uns zunächst dem Doppelaufgabenparadigma zu.

#### Doppelaufgaben

Im Doppelaufgabenparadigma bearbeiten die Probanden in jedem Experimentaldurchgang zwei Aufgaben, wobei der Grad der zeitlichen Überlappung variiert wird. Wie in Abbildung 2.2.1 dargestellt, gibt es i. d. R. zwei Stimuli (S1 und S2), auf die zwei Reaktionen (R1 und R2) abgegeben werden müssen. Die Zweitaufgabe beginnt mit einer Verzögerung, dem SOA (*stimulus onset asynchrony*), deren Dauer variiert wird. (Von Interesse ist insbesondere, inwieweit sich die Überlappung mit der Erstaufgabe auf die Reaktionszeit S2 der Zweitaufgabe auswirkt.)



SOA

Wie die Beispiele zu Beginn des Abschnitts nahelegen, könnte es durchaus sein, dass nur bestimmte Prozesse, auf die beide Aufgaben angewiesen sind und die nur mit begrenzter Kapazität verfügbar sind, zu einer Interferenz in der Aufgabenbearbeitung führen. Andere Prozesse mit genügender Kapazität stünden dagegen für beide Aufgaben zur Verfügung.

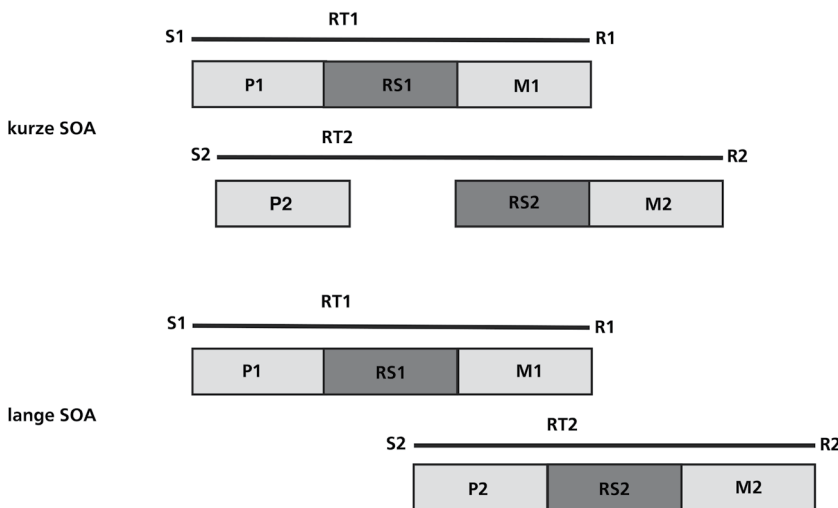
Für die Prozesse, die nur begrenzt zur Verfügung stehen, nimmt man an, dass die Zweitaufgabe auf deren Verfügbarkeit so lange warten muss, bis die Erstaufgabe diese Prozesse nicht mehr benötigt. Man spricht in diesem Fall bildlich von einem „Flaschenhals“ (*response-selection-bottleneck*, RSB; Welford 1952): Durch diesen können pro Zeiteinheit nur eine begrenzte Menge von Prozessen abgearbeitet werden, so dass andere anstehende Prozesse vor dem „Flaschenhals“ warten müssen.

Flaschenhals / RSB

Die Verzögerung, die dabei entsteht, wird auch als psychologische Refraktärperiode (PRP; Telford 1931) bezeichnet, in Anlehnung an die physiologische Refraktärperiode (etwa eines Neurons, das nach einem Aktionspotenzial für kurze Zeit kein neues Aktionspotenzial generieren kann, bis die intra-/extrazelluläre Ionenverteilung sich wieder dem Ausgangszustand angenähert hat). Grob kann man bei der Aufgabenbearbeitung folgende Prozesse unterscheiden:

psychologische Refraktärperiode (PRP)

- perzeptuelle Prozesse,
- Prozesse der Reiz-Reaktions-Auswahl,
- Prozesse der „Übersetzung“ und Reaktionsauswahl und
- Prozesse der motorischen Reaktion (Pashler 1994).



**Abb. 2.2.1:** Das Doppelaufgabenparadigma. S1 und S2 bezeichnen die Reize (Stimuli), auf die in der Erst- und Zweitaufgabe reagiert werden muss. Dementsprechend bezeichnen RT1 und RT2 die zugehörigen Reaktionszeiten. P1 und P2 bezeichnen die perzeptuellen Prozesse, RS1 und RS2 die Reaktionsauswahl und M1 und M2 die motorischen Reaktionen beider Aufgaben.

Für die Frage der Doppelaufgabenbearbeitung werden die perzeptuellen und motorischen Prozesse häufig als periphere Prozesse angesehen. Dagegen gelten die Prozesse, die zwischen Reiz und Reaktion vermitteln, als zentrale Prozesse. Dies spiegelt in gewissem Maße den Blickwinkel der an der Aufgabenkoordination interessierten Forscher wider. Schließlich haben wir in Kapitel 2.1 bereits gesehen, dass die Ähnlichkeit von Ziel- und Ablenkerreizen sich sehr stark auf die benötigten Aufmerksamkeitsressourcen auswirkt und erhöhte corticale (also zentralnervöse) Aktivierung mit sich bringt. Ähnliches gilt natürlich auch, wenn die Zielreize für die Erst- und Zweitaufgabe sehr ähnlich oder unähnlich sind. Weiterhin interferieren sehr ähnliche Reaktionen mehr als sehr unähnliche. In diesem Abschnitt soll es aber darum gehen, ob bei sehr verschiedenen, wenig interferierenden Wahrnehmungs- und Reaktionsanforderungen dennoch Kosten entstehen, wenn zwei Aufgaben zeitgleich ausgeführt werden.

**B**

Betrachten wir zwei Aufgaben, die sich hinsichtlich der perzeptuellen und motorischen Anforderungen stark unterscheiden: etwa dadurch, dass in S1 ein visueller Reiz, S2 dagegen ein auditiver Reiz ist, R1 eine Reaktion mit der linken und R2 eine Reaktion mit der rechten Hand erfordert. In dem Fall würden wir wenig oder keine Interferenz perzeptueller oder motorischer Prozesse erwarten. Wie würde sich nun eine Interferenz der zentralen Reaktionsauswahlprozesse auf die Reaktionszeiten auswirken? Wenn Aufgabe 1 zuerst die Stufe der Reaktionsauswahl erreicht und die dortigen Prozesse bindet, dann muss die Bearbeitung von Aufgabe 2 so lange warten, bis die Reaktionsauswahl in Aufgabe 1 abgeschlossen ist und die Auswahlprozesse wieder verfügbar werden. Dementsprechend sollte sich R2 um die Zeit verlängern, die Aufgabe 2 bis zum Beginn von RA2 warten muss. Nun ist aber noch zu berücksichtigen, dass während der Wartezeit die nicht interferierenden perzeptuellen Prozesse P2 ausgeführt werden können. Je mehr die interferierenden Stufen RA1 und RA2 überlappen, je länger wird R2 verzögert. Das heißt aber auch, dass ein Anstieg der perzeptuellen Verarbeitungsdauer P2 (z. B. aufgrund verringerter Reizintensität; Pashler/Johnston 1989) sich in diesem Fall erst einmal nicht weiter auf R2 auswirkt – wenn die Aufgabenbearbeitung sowieso warten muss, können in der Zeit noch weitere perzeptuelle Prozesse ablaufen, ohne dass es zu einer zusätzlichen Reaktionsverzögerung in Aufgabe 2 kommt.

Anders ist es bei Variationen der motorischen Anforderungen. Da diese in beiden Aufgaben hinter der kritischen interferierenden Stufe liegen, führen Verlängerungen der motorischen Anforderungen jeweils nur zu Reaktionszeitverlängerungen in der jeweiligen Aufgabe und wirken sich nicht auf die andere Aufgabe aus.

Mit Hilfe dieser Aufgabenlogik wurde gefunden, dass insbesondere Prozesse der Reaktionsauswahl und -initiiierung zu ausgeprägten Interferenzen führen. So führt etwa eine Erhöhung der Reaktionsalternativen in Aufgabe 1 nicht nur zu einer Verlängerung von R1, sondern auch von R2 (Karlín/Kestenbaum 1968; Smith 1969). Demgegenüber führt eine komplexere Reaktion (motorische Stufe) in Aufgabe 1 zwar zu einer erhöhten R1, beeinflusst R2 aber nicht wesentlich.

Was aber bedeutet es eigentlich, wenn wir von einer Interferenz auf der Stufe der Reaktionsauswahl sprechen? Geht es darum, dass der „Flaschenhals“ in der Zuordnung der Reize S1 und S2 zu den Reaktionen R1 und R2 besteht? Dies

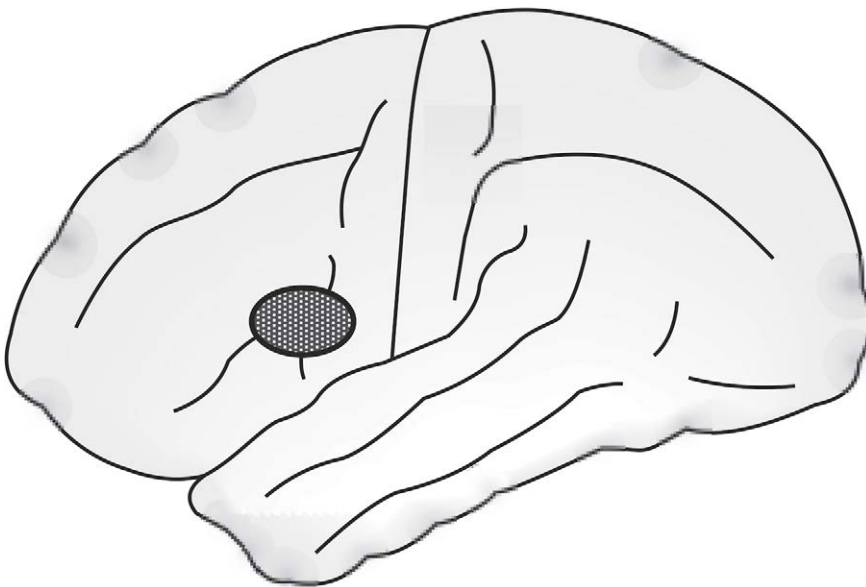
scheint eher nicht der Fall zu sein: Die Reaktionszeit in der Erstaufgabe ist nämlich kürzer, wenn die Reaktionen in beiden Aufgaben miteinander kompatibel sind, wie etwa bei R1: Tastendruck links und R2: verbale Antwort „links“, als wenn die Antworten inkompatibel sind (Hommel 1998). Dieser Effekt ist nur zu erklären, wenn die „Übersetzung“ von S2 in R2 schon vor oder während der Übersetzung von S1 zu R1 erfolgt. Somit ist es wahrscheinlich, dass der „Flaschenhals“ der Reaktionsauswahl in der eigentlichen Koordinierung der Reaktionen liegt. Auch wenn die Zuordnung von Reiz zu Reaktion in beiden Aufgaben schon abgeschlossen ist, so müssen die Reaktionen noch in eine Handlungssequenz gebracht werden. Dabei sollen die Probanden i. d. R. eine bestimmte Reihenfolge (R1 vor R2) einhalten.

Daran hat sich die weitere Frage entzündet, ob der PRP-Effekt auf einen sozusagen „fest verdrahteten“ strukturellen „Flaschenhals“ zurückgeht oder nach ausreichender Erfahrung mit der primär meist recht künstlichen Aufgabensituation in den Doppelaufgabenexperimenten verschwindet. Eine Mehrheit der Studien hat einen stabilen RSB auch nach längerer Übung gefunden (Karlín/Kestenbaum 1968; van Selst/Jolicoeur 1997). In Einzelfällen ist jedoch auch eine deutliche Minimierung des RSB beobachtet worden. Diese trat besonders dann auf, wenn die geforderten Reaktionen sehr unterschiedlich waren (van Selst et al. 1999: verbal/manuell) und weniger bei ähnlichen Reaktionen (Ruthruff et al. 2001).

Funktionell bildgebende Experimente deuten auf eine zentrale Rolle des posterioren Segments des linken Gyrus frontalis medius bei der Doppelaufgabenkoordination hin (z. B. Schubert/Szameitat 2003). Dieses Hirnareal grenzt posterior an den Sulcus praecentralis und ventral an den Sulcus frontalis inferior an und wird

**Lernen**

**inferiorer frontaler  
Knotenpunkt/IFJ**



**Abb. 2.2.2:** Doppelaufgaben aktivieren den posterioren inferioren Präfrontalcortex

daher auch inferiorer frontaler Knotenpunkt genannt (IFJ: *inferior frontal junction*; Abb. 2.2.2). Es ist bei Doppelaufgaben stärker aktiviert als in der Addition der Aktivierungen, die man misst, wenn die beiden Aufgaben, die in der Doppelaufgabe kombiniert wurden, einzeln durchgeführt werden.

### Superadditivität

Eine solche superadditive Aktivierung kann also nicht einfach dadurch erklärt werden, dass beide Teilaufgaben Ressourcen benötigen. Sie zeigt einen zusätzlichen Ressourcenbedarf, der spezifisch durch die Doppelaufgabensituation hervorgerufen wird. Welcher Art dieser zusätzliche Bedarf ist, zeigt die Aktivierung jedoch nicht. Neben Prozessen der Reaktionsauswahl kommen auch etwa höhere Arbeitsgedächtnisanforderungen in Frage, dadurch, dass die Probanden die Instruktionen für beide Aufgaben aktiv halten müssen.

Eine neuere Studie fand ein weiteres Indiz dafür, dass das linkshemisphärische IFJ spezifisch in Reaktionsauswahlprozesse eingebunden wird (Dux et al. 2006). Der Zeitverlauf der IFJ-Aktivierung folgte dem Zeitbedarf für die zentrale Reaktionsauswahlphase, während er unabhängig von der Reaktionszeit war.

Bisher haben wir angenommen, dass Doppelaufgaben immer in der gleichen Reihenfolge bearbeitet werden, beginnend mit Aufgabe 1, gefolgt von Aufgabe 2. Die Verzögerung des fMRT-Signals in dem Experiment von Dux und Kollegen könnte auch tatsächlich mit einem solchen passiven Warten erklärt werden. Andere Daten zeigen jedoch, dass das IFJ-Areal Funktionen unterstützt, die darüber hinausgehen. So wurde im linken IFJ eine erhöhte Aktivierung gefunden, wenn die Reihenfolge der Teilaufgaben unvorhersehbar war (Szameitat et al. 2006). Dabei begannen blockweise die Versuchsdurchgänge entweder immer mit A1, überlappend gefolgt von A2, die Reihenfolge war umgekehrt A2 gefolgt von A1, oder die Reihenfolge variierte zufällig. Wenn die Reihenfolge unvorhersehbar ist, steigen sowohl Reaktionszeiten wie auch Fehlerraten in beiden Aufgaben an. Beobachtungen dieser Art haben zu der Annahme geführt, dass die zeitliche Planung der Aufgabenreihenfolge (*task order scheduling*) ein Prozess mit limitierten Ressourcen ist (De Jong 1995; Luria/Meiran 2003).

### Aufgabenwechsel

Wir wechseln ständig zwischen den verschiedensten Tätigkeiten hin und her. Während Sie dieses Buch lesen, mag das Telefon klingeln und Sie veranlassen, die Lektüre zu unterbrechen und das Gespräch anzunehmen. Viele dieser Aufgabenwechsel werden uns gar nicht recht bewusst, sie verlaufen mehr oder weniger automatisch. Es gibt allerdings Menschen, denen es oft nicht gelingt, diese Aufgabenwechsel zu vollziehen. Dabei handelt es sich um Patienten mit Schädigungen des Präfrontalcortex. Sie fallen dadurch auf, dass sie eine einmal begonnene Aufgabe immer weiter fortsetzen, auch wenn diese längst sinnlos geworden ist. Dieses Symptom einer präfrontalen Schädigung nennt man Perseveration. Gibt es eine solche Tendenz, eine einmal begonnene Aufgabe fortzuführen, in geringerer Ausprägung auch bei hirngesunden Menschen? Kostet es uns mentale Ressourcen, einen Aufgabenwechsel zu vollziehen?

Eine klassische Versuchsanordnung zu diesem Thema stammt von Jersild (1927). Er präsentierte seinen Versuchspersonen Ziffernfolgen wie diese:



### Aufgabenreihenfolge

### Perseveration



444  
 33333  
 2222  
 5  
 11

Die Probanden erhielten dann in aufeinanderfolgenden Aufgabenblöcken unterschiedliche Instruktionen, wie sie mit diesen Ziffern verfahren sollten. Ein Beispiel: Benennen Sie zunächst die Ziffern, ohne auf die Anzahl zu achten (also 4, 3, 2, 5, 1). Benennen Sie dann die Anzahl, ohne auf die Ziffern zu achten, also 3, 5, 4, 1, 2. Wechseln Sie schließlich in jeder Zeile zwischen den beiden Aufgaben, beginnen Sie mit der Ziffer (Lösung: 4, 5, 2, 1, 1).

Sie werden bemerkt haben, dass das Wechseln zwischen den Aufgaben deutlich mehr Zeit erfordert als die Einzelaufgaben. Worin ist dieser höhere Zeitbedarf aber nun begründet? Liegt es daran, dass wir eine Tendenz haben, eine einmal begonnene Aufgabe weiterzuführen, die aktiv gehemmt werden muss, um eine neue Aufgabe auszuführen? Oder benötigen wir einfach Zeit, uns auf die neue Aufgabe einzustellen? Dazu kommt, dass wir bei obigem Beispiel in der Wechselaufgabe beide Instruktionen verfügbar halten müssen, während dies bei den Einzelaufgaben nicht erforderlich ist.

**Aufgabenwechselkosten**

Vielleicht liegt der erhöhte Zeitbedarf aber auch daran, dass wir überlegen müssen, welche Aufgabe wir als Nächstes ausführen sollen. Dieser Einwand wurde von Spector und Biederman (1976) untersucht. Sie präsentierten ihren Probanden in einer ähnlichen Aufgabe jeweils zu den Ziffern auch das Symbol der arithmetischen Operation, die ausgeführt werden sollte (z. B. +, -). Diese Hinweisreize reduzierten die Wechselkosten (d. h. die Verlängerung der Reaktionszeit in Aufgabenwechsel- gegenüber Nichtwechselblöcken) teilweise, aber nicht vollständig.

**Aufgabenunsicherheit**

Die erhöhte Arbeitsgedächtnisbelastung (zum Konzept Arbeitsgedächtnis s. Kap. 3.1) in den Wechselblocks wurde von Rogers/Monsell (1995) als konfundierende Variable eliminiert, indem sie Wechsel- und Nichtwechseldurchgänge in einem gemeinsamen Block untersuchten. Hierzu wurden die Probanden instruiert, zwei Aufgaben im Wechsel nach dem Schema ABBAAB... auszuführen. Verglichen wurden nun die Reaktionen in Wechseldurchgängen (AB und BA) mit denen in Nichtwechseldurchgängen (AA und BB). Auch in diesem *alternating runs*-Paradigma wurden Wechselkosten beobachtet, ein deutlicher Hinweis darauf, dass Aufgabenwechsel genuine Verarbeitungskosten verursachen.

**Arbeitsgedächtnisbelastung**

Die Bearbeitung einer Aufgabe erfordert i. d. R., dass auf einen bestimmten Satz von Reizen nach festgelegten Regeln reagiert wird. Dieser Satz von Regeln (*task set*) konfiguriert unsere Reaktionen. Ausgehend von dem klinischen Bild der Perseveration könnte man auf den Gedanken kommen, dass eine einmal durchgeführte Aufgabenkonfiguration eine gewisse Trägheit besitzt (*task set inertia*; Allport et al. 1994). Tatsächlich werden die Wechselkosten kleiner, wenn man den Probanden mehr Zeit zwischen der Ausführung einer Aufgabe und dem Wechsel zur nächsten Aufgabe lässt. Hierzu variiert man das Intervall zwischen der letzten Reaktion und der Präsentation des nächsten handlungsbestimmenden („imperativen“) Reizes (Reaktions-Stimulus-Intervall: RSI; Abb. 2.2.3).

**Trägheit der Aufgabenkonfiguration**

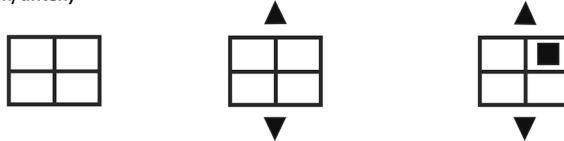


### Aufgaben-Cueing-Paradigma

In der Regel führt eine Verlängerung des RSI bis zu etwa 600 ms zu einer Reduktion der Wechselkosten. Brauchen wir diese Zeit, um uns von der alten Aufgabenkonfiguration zu lösen, oder nutzen wir die Zeit, um uns auf die neue Aufgabe vorzubereiten? Um diese Frage zu untersuchen, muss das RSI unabhängig von dem Intervall variiert werden, in dem die neue Aufgabe vorbereitet werden kann. Zu diesem Zweck wurde das Aufgaben-Cueing-Paradigma entwickelt. Anders als in den bisher besprochenen Experimenten wird in diesem Paradigma die Reihenfolge der Aufgaben zufällig variiert. Welche Aufgabe als Nächstes ausgeführt werden soll, wird durch einen Hinweisreiz (Cue) angezeigt. Mit dieser Technik kann das RSI, in dem die alte Aufgabenkonfiguration „verblassen“ kann, unabhängig vom Cue-Stimulus-Intervall (CSI) variiert werden, in dem die Vorbereitung auf die neue Aufgabe stattfindet. Mit dieser Versuchsanordnung wurden zum einen „echte“ Vorbereitungseffekte gefunden, die nur mit dem CSI variieren. Zum anderen nahmen die Wechselkosten aber auch bei konstantem CSI ab, wenn nur das RCI (Reaktions-Cue-Intervall) variiert wurde. Damit ist also eine proaktive störende Wirkung der vorangegangenen Aufgabe belegt (Meiran 1996; Meiran et al. 2000).

Proaktive, hemmende Einflüsse der vorangegangenen Aufgaben wurden sogar über längere Zeiträume beobachtet. In einem Experiment wurden drei verschiedene Aufgaben in zufälliger Reihenfolge bearbeitet (Mayr/Keele 2000). Die hemmende Wirkung der vorangegangenen Aufgaben war umso geringer, je länger diese Aufgabe zurücklag. Was kann der Grund für diese Interferenz sein? Verschiedene Faktoren scheinen hier eine Rolle zu spielen. Um zu einem möglichst reinen Maß für die Aufgabenwechselprozesse zu gelangen, werden i. d. R. die verwendeten Stimuli

#### Aufgabe (oben/unten)



#### Aufgabe (links/rechts)



cue

Zielreiz

**Abb. 2.2.3:** Das Aufgaben-Cueing-Paradigma. Die auszuführende Aufgabe wird vor Präsentation des imperativen Reizes (S) durch einen Hinweisreiz (Cue) angezeigt. Die Zeitintervalle zwischen Cue und Reiz (CSI) und letzter Reaktion und Reiz (RSI) können unabhängig voneinander variiert werden, um den Anteil von Vorbereitungsprozessen einerseits und der zuletzt gewählten Aufgabenkonfiguration andererseits zu untersuchen (nach Brass et al. 2003, adaptiert).

konstant gehalten und nur die Instruktionen zwischen den Aufgaben variiert. Das bedeutet, dass dieselben Reize mit verschiedenen Reaktionen gekoppelt werden. Wenn ein Reiz in verschiedenen Aufgaben mit verschiedenen Reaktionen assoziiert ist, dann liegt es nahe, dass die irrelevanten Reaktionszuordnungen jeweils unterdrückt werden, um die aktuell aufgabenkonforme Reaktion auszuwählen.

Belege für einen solchen inhibitorischen Mechanismus wurden von Wylie und Allport (2000) berichtet. Sie verwendeten für ihre Untersuchung das Stroop-Paradigma. Diese klassische Versuchsanordnung ist in Farbbildung 6 illustriert.

### **Stroop-Paradigma**

Benennen Sie die Farben der Wörter. (Es geht darum, die Druckfarben zu benennen, nicht die Wörter zu lesen!)

Sie werden bemerkt haben, dass die Benennung der Wortfarbe Ihnen recht schwierig, wenn diese nicht mit der Wortbedeutung übereinstimmte. Diese Schwierigkeit ist darauf zurückzuführen, dass Sie das Lesen von Wörtern durch jahrelange Praxis so automatisiert haben, dass Sie es auch dann nicht unterdrücken können, wenn es, wie im vorliegenden Fall, kontraproduktiv ist. Sie müssen also in der kritischen Bedingung der Stroop-Aufgabe eine stark überlernte, dominante Aufgabe (Lesen) unterdrücken, um eine wenig geübte Aufgabe (Farbbenennung) auszuführen.

### **Inhibition dominanter Reaktionen**

Dass die beiden Aufgaben unterschiedlich dominant sind, können Sie sich leicht vor Augen führen, indem Sie die Wörter in der rechten Spalte einmal lesen. Sie werden sehen, dass die „falsche“ Druckfarbe der Wörter kaum mit dem Lesen interferiert. Überlegen Sie einmal, was wohl höhere Wechselkosten verursacht – der Wechsel von der leichten Lese- zur schwierigen Benennungsaufgabe oder umgekehrt?

Wylie und Allport beobachteten, dass der Wechsel von der schwierigen Farbbenennungs- zur leichteren Wortleseaufgabe im Stroop-Paradigma zu höheren Kosten führte (in beiden Fällen ging es um Wörter mit inkongruenter Wortbedeutung und Druckfarbe). Es mag zunächst paradox erscheinen, dass nach dem Wechsel zur leichten Aufgabe die größeren Kosten auftraten. Die Autoren erklärten dies damit, dass die Probanden für die ungewohnte Farbbenennung die natürliche, überlernte Worterkennung viel stärker inhibieren mussten als im umgekehrten Fall die Farbbenennung. Diese Inhibition schien sich auch dann noch auszuwirken, wenn zur zuvor inhibierten Aufgabe gewechselt wurde (also von der Farbbenennung zum Wortlesen).

Frühe fMRT-Experimente haben gezeigt, dass Aufgabenwechsel mit Aktivierungssteigerungen in einem weiten Netzwerk von Hirnarealen korrelieren (z. B. Dove et al. 2000). Diese wechselkorrelierten Aktivierungssteigerungen vollziehen sich aber i. d. R. in Hirnarealen, die auch in Nichtwechseldurchgängen, wenn auch weniger stark, aktiviert sind. Aufgabenwechsel gehen also eher mit zusätzlicher neuronaler Aktivität in den Netzwerken einher, die die Aufgabenbearbeitung unterstützen, als dass zusätzliche Areale „eingeschaltet“ werden.

### **neuronale Korrelate des Aufgabenwechsels**

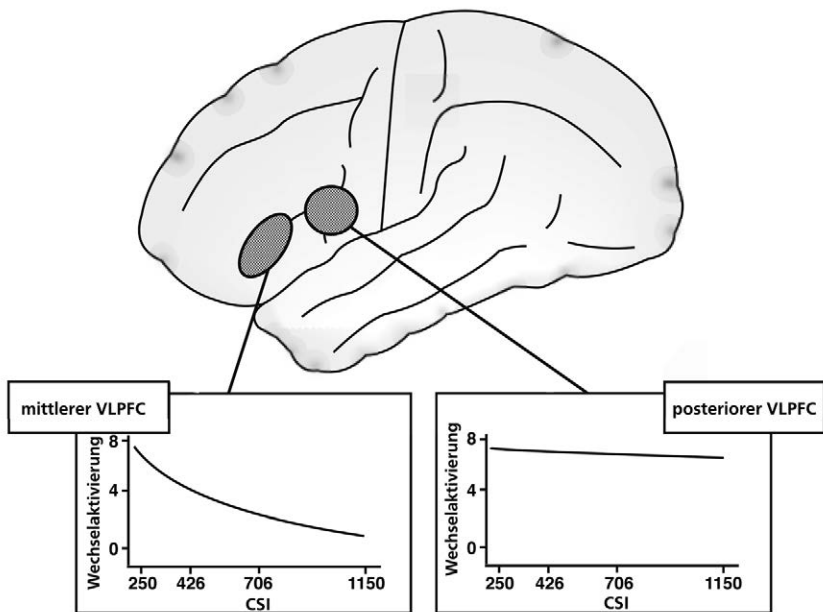
Wir haben gesehen, dass die Reaktionszeitkosten für Wechseldurchgänge mit zunehmendem CSI sinken. Wenn dies auf einem aktiven Umkonfigurierungsprozess

### residuale Wechselkosten

beruht, so sollten längere CSI auch mit erhöhter Aktivierung einhergehen. Dies entspricht aber nicht den Beobachtungen. Im Gegenteil gehen lange CSI mit geringerer präfrontaler Aktivierung einher als kurze CSI, oder es wird kein Unterschied in der Aktivierungsstärke beobachtet (Abb. 2.2.5; Badre/Wagner 2006; Ruge et al. 2005).

Obwohl vorab präsentierte Aufgaben-Cues die Wechselkosten senken, so werden auch nach langen CSI (und langen RSI) noch residuale Wechselkosten beobachtet. Es scheint also Gründe zu geben, die eine perfekte Vorbereitung auf die neue Aufgabe (oder eine perfekte Unterdrückung von Interferenzen durch frühere Aufgaben) verhindern. Eine Sichtweise ist, dass die Präsentation der Stimuli Erinnerungen an den alten, jetzt interferierenden *task set* hervorrufen, die bei aller Vorbereitung auf die neue Aufgabe deren Bearbeitung verzögern. Die Aktivierungsdaten sprechen eher für diese Hypothese als für das Konzept einer längeren aktiven Umkodierung bei langen CSI. Nach dieser Sichtweise dominieren bei kurzem CSI die alten über die neuen Aufgabenkonfigurationen und fordern eine aufwendigere Umstellung als bei langen CSI, bei denen die neue Konfiguration einen zeitlichen Vorsprung hat.

Diese Beispiele zeigen, dass Hirnaktivierungsstudien nicht nur dazu genutzt werden können, mit kognitiven Prozessen korrelierte neuronale Aktivität im Gehirn zu lokalisieren, sondern auch dazu, kognitive Prozessannahmen an sich zu überprüfen. Dabei haben Aktivierungsdaten den gleichen Status wie Verhaltensdaten. Aktivierungsänderungen können indirekt Informationen über Prozesse



**Abb. 2.2.5:** Präfrontale Aktivierung bei variablem Cue-Stimulus-Intervall. Im mittleren Segment des lateralen Präfrontalcortex nimmt die Aktivierung mit steigendem CSI ab, während sie im posterioren Segment (IFJ) gleich bleibt (adaptiert aus Badre/Wagner 2006).

liefern, die sich nicht direkt im Verhalten niederschlagen. In beiden Fällen, bei Verhaltens- wie bei Aktivierungsstudien, kommt es letztlich entscheidend auf das experimentelle Design an, wie viel wir aus den Experimenten über die neuronale Basis kognitiver Prozesse lernen können.

Zurück zu unserer Ausgangsfrage: Stört ein Gespräch, über die Freisprechanlage des Telefons oder mit dem Beifahrer, unsere Fahrzeugbeherrschung im Autoverkehr? Wir haben gesehen, dass es gleich mehrere Gründe gibt, dies zu bejahen. So entstehen auch dann Kosten für die Handlungssequenzierung, wenn perzeptuelle Prozesse – Beobachtung der Straße und Zuhören – und Reaktionen – Lenken und Sprechen – nicht interferieren. Dies umso mehr, als die Reihenfolge der Handlungen stets neu getaktet werden muss. In anderen Alltagssituationen mögen Aufgabenwechselkosten im Vordergrund stehen, etwa bei der Bedienung von Displays mit Tastenmehrfachbelegungen. Man mag einwenden, dass die experimentell ermittelten „Kosten“ meist nur Sekundenbruchteile ausmachen. Diese Sekundenbruchteile können aber in vielen Situationen, gerade im Straßenverkehr, den entscheidenden Unterschied machen. Eine fundierte psychologische Auskunft zu konkreten Alltagsfragen kann sicher am besten durch konkrete am Problem orientierte Untersuchungen gewährleistet werden. Dabei können die besprochenen allgemeinpsychologischen Befunde aber eine wertvolle Orientierungshilfe geben.

B

## Fragen zu Kapitel 2.2

?

### Überprüfen Sie Ihr Wissen!

81. In welchen Situationen greift das *supervisory attentional system* ein?
82. Definieren Sie den Begriff SOA.
83. Worin besteht der „Flaschenhals“ bei der simultanen Aufgabenbearbeitung? Geben Sie ein Beispiel und benennen Sie die Prozessstufen.
84. Geben Sie an, wie sich die Reaktionszeiten einer Erst- und einer Zweitaufgabe verändern, wenn das SOA zwischen beiden Aufgaben verringert wird.
85. Wie heißen die Areale der Hirnrinde, die sich in der lateralen und medialen Großhirnrinde anterior vom Motorcortex befinden? Welche Aufgaben haben sie?
86. Wie heißt der umgekehrt U-förmig verlaufende Sulcus im posterioren Parietalcortex? Welche Funktionen haben die Areale an seinen Ufern?
87. Nennen Sie mindestens drei mögliche Ursachen für erhöhte Reaktionszeiten bei Aufgabenwechseln.
88. Welches Hirnareal scheint spezifisch sowohl in die Doppelaufgabenbearbeitung wie in Aufgabenwechsel involviert zu sein?
89. Geben Sie ein Beispiel, wie bildgebende Daten zur Aufklärung von Prozessannahmen im Aufgabenwechelparadigma herangezogen wurden.
90. Stellen Sie sich vor, Sie seien für das Design einer neuen Flugzeugpilotenkanzel verantwortlich. Worauf würden Sie achten, damit der Pilot möglichst wenige Ressourcen für die Handlungskontrolle aufwenden muss?

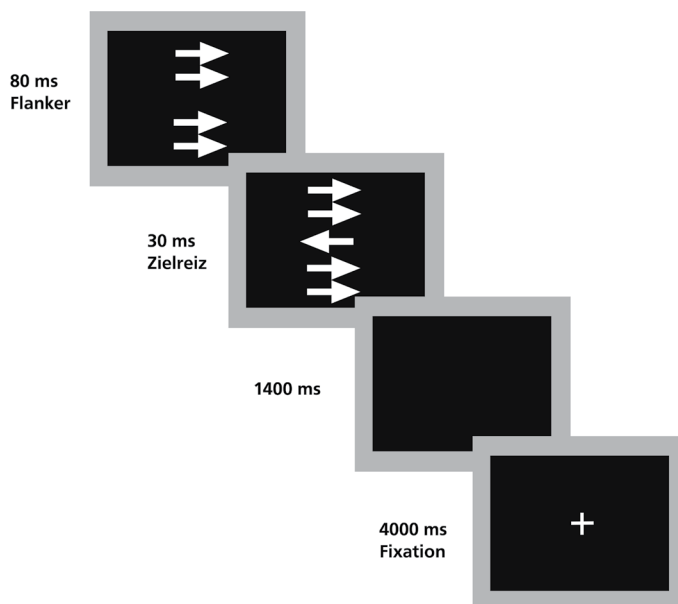
## 2.3 Exekutivfunktionen II

### 2.3.1 Fehlerkontrolle

Fehler sind meist ärgerlich. Wer hat sich nicht schon über einen „dummen“ Fehler geärgert, der, kurz nachdem er begangen wurde, leicht vermeidbar schien. Manchmal erkennt man Fehler aber auch erst, wenn man von anderen darauf hingewiesen wird oder zukünftige Entwicklungen zeigen, dass man sich besser anders verhalten hätte. Man kann Fehler machen, indem man handelt (*error of commission*) oder indem man eine Handlung unterlässt (*error of omission*).

Das Erkennen von Fehlern bietet die Chance, zu lernen, wie man sein zukünftiges Handeln optimieren kann. Dabei kann die Fehlerrückmeldung in manchen Situationen eindeutig (deterministisch) sein – für eine falsch übersetzte Vokabel gibt es eine richtige Lösung –, manchmal aber auch nur eine Wahrscheinlichkeit anzeigen, es in Zukunft besser zu machen – etwa beim Kauf von Aktien.

Fehlersignale enthalten also auch wichtige Informationen. Um diese Informationen nutzbar zu machen, bedarf es oft kognitiver Kontrollmechanismen, die eine Verhaltensänderung erst möglich machen. Wir werden uns daher in diesem Kapitel mit vielen verschiedenen Fragen beschäftigen, von der Detektion von Fehlern bis zu den Prozessen, die eine Umsteuerung des Verhaltens und eine zukünftige Vermeidung von Fehlern ermöglichen.



**Abb. 2.3.1:** Schematische Darstellung eines Versuchsdurchgangs im Eriksen-Flanker-Paradigma. Im Beispiel interferieren die flankierenden Pfeile mit der Richtung des zentralen Pfeils. Die Probanden haben nur begrenzt Zeit für die Abgabe ihrer Reaktion.

In EEG-Untersuchungen wurde eine fehlerkorrelierte negative Potenzialänderung gefunden, die ERN (*error-related negativity*) genannt wird. Die ERN wird besonders dann beobachtet, wenn Probanden unter Zeitdruck Fehler machen (Falkenstein et al. 1990; 2000; Gehring et al. 1993).

**error-related negativity (ERN)**

Ein Paradigma, mit dem man eine erhöhte Zahl von Fehlern auslösen kann, ist das Eriksen-Flanker-Paradigma. Hierbei werden die Probanden instruiert, eine manuelle Wahlreaktion auszuführen, indem sie eine linke oder rechte Taste drücken, abhängig davon, ob ein zentral im Gesichtsfeld präsentierter Pfeil nach links oder rechts zeigt. Kurz bevor der zentrale Pfeil erscheint, werden jedoch flankierende Pfeile gezeigt, die in die gleiche oder entgegengesetzte Richtung zeigen können wie der zentrale Pfeil. Wenn die Richtung der Pfeile nicht übereinstimmt, steigt die Wahrscheinlichkeit, die falsche Reaktion auszulösen, und insbesondere dann, wenn die Probanden nur begrenzte Zeit für ihre Reaktion zur Verfügung haben (Abb. 2.3.1).



Die ERN ist nicht an bestimmte Reaktionen (z.B. Hand- oder Augenbewegungen) gebunden. Diese Potenzialänderung beginnt zu dem Zeitpunkt, zu dem die falsche Reaktion begonnen wird, und erreicht ihr Maximum etwa 100 ms später. Zu diesem Zeitpunkt können die Neurone, die die ERN generieren, bereits über die Ausführung der fehlerhaften Reaktion „informiert“ sein. Dies geschieht über eine „Efferenzkopie“ des motorischen Signals. Dabei handelt es sich um ein Signal, das dem entspricht, welches an die Muskelgruppen gesendet wird, um eine bestimmte Reaktion auszulösen. Diese Kopie wird an das Zentralnervensystem zurückgeleitet und ermöglicht den Vergleich der gerade initiierten Handlung mit der Handlungsabsicht des Organismus (Abb. 2.3.2).

**Efferenzkopie**

Eine ähnliche fehlerkorrelierte Signaländerung wird auch zu einem späteren Zeitpunkt beobachtet, wenn der Proband eine negative Rückmeldung erhält. Man spricht demgemäß von Reaktions- und Rückmeldungs-ERN (*response- and feedback-ERN*).

**Fehlerrückmeldung**

fMRT-Untersuchungen zur ERN fanden wiederholt Aktivierungen im fronto-medianen Cortex, die eine Lokalisation des ERN-Generators in der rostralen cingulären Zone (RCZ) wahrscheinlich machen. Diese Annahme war allerdings mit einer gewissen Unsicherheit verbunden, weil EEG und fMRT unterschiedliche Signale messen – nämlich elektrische Entladungen der Nervenzellen einerseits und die Reaktion des Gefäßsystems auf den damit verbundenen Energieverbrauch andererseits. Eine kürzlich veröffentlichte Studie hat jedoch überzeugende Belege dafür erbracht, dass die ERN tatsächlich in der RCZ ihren Ursprung hat (Debener et al. 2005). In der Regel werden sowohl in EEG- wie auch in fMRT-Untersuchungen die erhaltenen Signale über alle Durchgänge einer Versuchsbedingung gemittelt (hier etwa über alle Fehlerdurchgänge), um ein möglichst rauschfreies Signal zu erhalten. Im Gegensatz dazu gelang es Debener und Kollegen, EEG- und fMRT-Signaländerungen in jedem einzelnen Durchgang des Experiments miteinander in Beziehung zu setzen. Sie fanden, dass die Höhe der ERN-Signaländerung in der RCZ eng mit der fMRT-Signaländerung am gleichen Ort zusammenhing.



**rostrale cinguläre Zone (RCZ)**

Nach einer einflussreichen Theorie wird die Aktivität der RCZ durch dopaminerge Neurone des Mittelhirns beeinflusst (Holroyd/ Coles 2002). Diese Neurone, die den Botenstoff Dopamin ausschütten, sind Teil eines „Belohnungssystems“

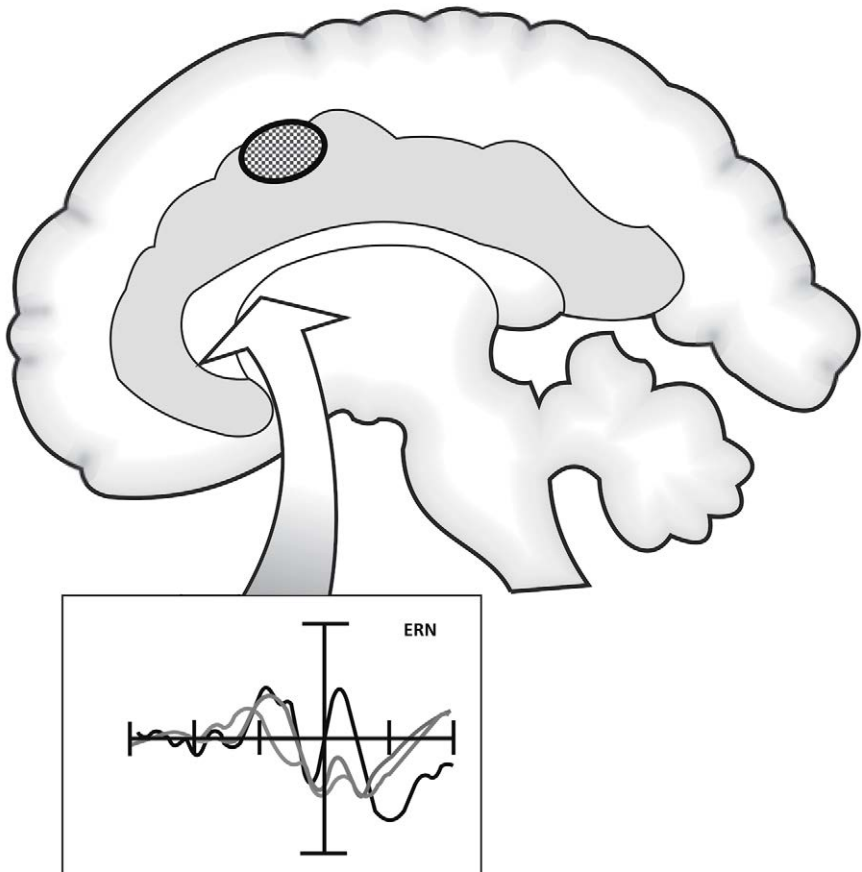
**dopaminerges System**

Dieses Dokument wurde mit IP-Adresse 141.46.144.6 aus dem Netz der USEB HS Zittau am 14.10.2020 um 18:17 Uhr heruntergeladen. Das Weitergeben und Kopieren dieses Dokuments ist nicht zulässig.

des Gehirns: Es meldet dem Organismus zurück, ob seine Erwartungen hinsichtlich positiver oder negativer Handlungsfolgen bestätigt werden oder nicht. Die diesbezüglichen Befunde werden in Kap. 4.4 ausführlich dargestellt. Nach der Theorie von Holroyd und Coles werden Fehlerrückmeldungen wie das Ausbleiben einer erwarteten Belohnung verarbeitet.

#### Fehler-Monitoring-kosten

Eine konkurrierende Sichtweise hebt die Bedeutung von Fehler-Monitoring hervor (Carter et al. 1998). Nach dieser Theorie spiegeln die fehlerrelatierten Aktivierungen in der RCZ und benachbarter Regionen des dorsalen anterioren cingulären Cortex (ACC) nicht so sehr die Rückmeldung über eine fehlerhafte Reaktion, sondern die Feststellung (Monitoring) von Reaktionskonflikten. Diese Reaktionskonflikte liegen etwa vor, wenn eine gut geübte, geläufige Reaktion unterdrückt werden muss, um eine weniger automatisierte Reaktion auszuführen, wie es etwa in der Stroop-Aufgabe der Fall ist (s. voriges Kapitel). In solchen Fällen kommt es, bildhaft gesprochen, zu einem Wettlauf zwischen der automa-

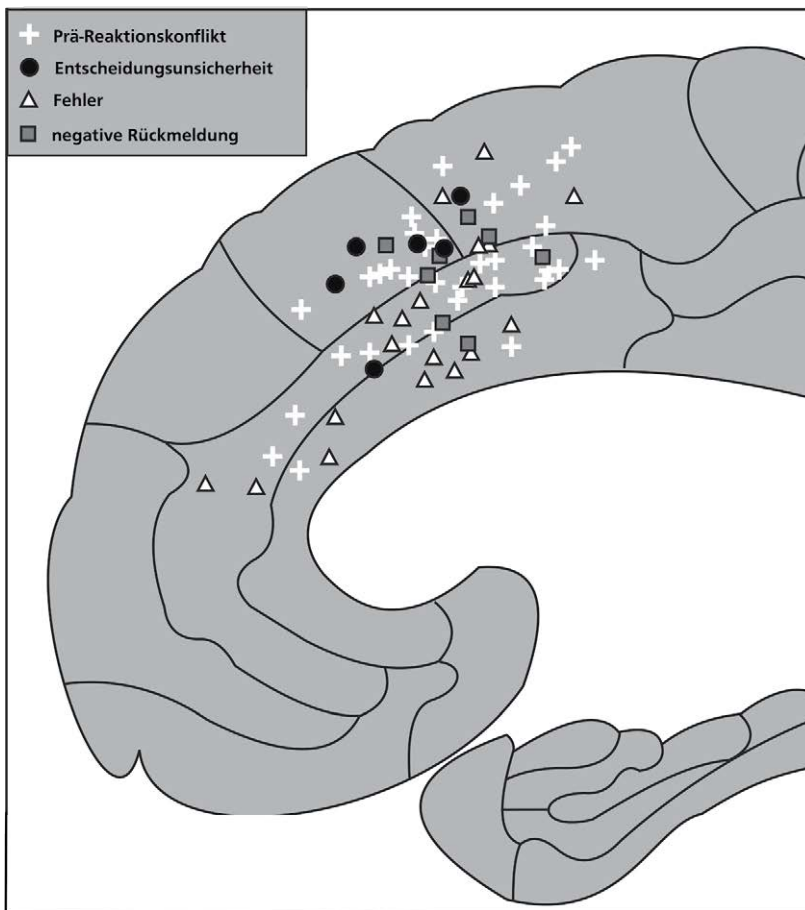


**Abb. 2.3.2:** Die *error-related negativity*. Zeitlicher Verlauf (schwarze Linie) und Lokalisation der vermutlichen Quelle in der rostralen cingulären Zone mit Hilfe von fMRT (nach Debener et al. 2005, bearbeitet)

tischen, aber der Situation unangemessenen Reaktion und der korrekten Reaktion. Steht die Versuchsperson unter Zeitdruck, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die automatisierte falsche Reaktion ausgeführt wird. Dabei werden sich die Versuchspersonen häufig nach Abgabe der Reaktion des Fehlers durchaus bewusst.

Reaktionskonflikt besteht aber auch durchaus in den Durchgängen, in denen die Versuchsperson sich gegen die automatisierte Reaktion entscheidet und die korrekte Reaktion ausführt. In diesem Fall wird der Konflikt bereits vor der Reaktion ausgetragen. Die Fehler-Monitoring-Hypothese sagt auch für diesen Fall eine neuronale Aktivierung voraus. Diese Vorhersage wurde in vielen Studien bestätigt (Abb. 2.3.3). Reaktionskonflikte können weiterhin in Situationen entstehen, in denen keine eindeutig richtige Antwort erkennbar ist – etwa in probabilistischen Lernsituationen, wo die Korrektheit der Antwort nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zurückgemeldet wird.

**Prä-Reaktionskonflikt**



**Abb. 2.3.3:** Aktivierungen im frontomedianen Cortex, die mit Fehlern oder Konfliktsituationen einhergehen (nach Ridderinkhof et al. 2004, bearbeitet)

**Rolle des ACC**

Welche Verallgemeinerungen für die Rolle des ACC und benachbarter Gebiete können nun aus diesen Studien gezogen werden? Die hohe Überlappung der Aktivierungen (Abb. 2.3.3), die bei Auftreten von Reaktionskonflikt (vor der Reaktion), von Fehlern, ohne oder mit negativer Rückmeldung, und in Situationen mit hoher Reaktionsunsicherheit gefunden wurden, könnten zu der Annahme veranlassen, dass in all diesen Situationen ein gemeinsamer Mechanismus am Werk ist. Dem steht die Beobachtung entgegen, dass die gemessenen Aktivierungen doch über einen recht großen Bereich streuen. Dabei ist zumindest ansatzweise zu erkennen, dass der Aktivierungsschwerpunkt bei Prä-Reaktionskonflikt etwas weiter dorsal liegt als die Schwerpunkte für Fehler- und Rückmeldungs-Monitoring. Auch innerhalb eines Hirnareals zeigen benachbarte Neurone innerhalb des posterioren frontomedianen Cortex Reaktionen auf unterschiedliche Aspekte, die bei der Fehlerverarbeitung eine Rolle spielen mögen, wie das Ausbleiben einer erwarteten positiven Konsequenz, aber auch das Eintreffen einer unerwarteten Konsequenz (Ito et al. 2003).

**Evaluation von Verhaltenskonsequenzen**

Die Daten sprechen also für eine bedeutende Rolle des frontomedianen Cortex, und dort insbesondere des anterioren cingulären Cortex, für die Kontrolle unseres Verhaltens. Diese Kontrolle äußert sich im Speziellen in der Vermeidung oder Korrektur von Fehlern, scheint aber im weiteren Sinne in die Evaluation positiver und negativer Verhaltenskonsequenzen eingebunden zu sein. Dabei signalisieren Prä-Reaktionskonflikt und Entscheidungsunsicherheit jeweils reduzierte Belohnungserwartungen, während Fehler und unerwartete negative Rückmeldungen mit dem Ausbleiben erwarteter Belohnungen verbunden sind (Ridderinkhof et al. 2004).

**Optimierung des Verhaltens**

Bisher haben wir von der Erkennung von Fehlern gesprochen, vom Monitoring positiver und negativer Handlungskonsequenzen oder vom Verhältnis von erwarteten und tatsächlichen Konsequenzen. All dies zielt natürlich darauf ab, unser Verhalten zu optimieren, um in Zukunft Fehler zu vermeiden oder positivere Verhaltenskonsequenzen zu erzielen. Im Kontext experimenteller Untersuchungen können solche Verhaltensänderungen daran gemessen werden, wie sich die Versuchsperson im nächsten Durchgang verhält, nachdem sie gerade eine Rückmeldung über ihr Verhalten bekommen hat.

**post-error slowing**

Nach einer Fehlerrückmeldung zeigen Probanden häufig im nächsten Durchgang eine verlangsamte Reaktion (*post-error slowing*; Rabbitt 1966). Die Verlangsamung der Reaktionszeit im Folgedurchgang korreliert mit der Stärke der ERN einerseits und der ACC-Aktivierung andererseits (Gehring et al. 1993; Garavan et al. 2002; Kerns et al. 2004; Debener et al. 2005). Diese Befunde sprechen dafür, dass der posteriore frontomediane Cortex (inclusive des ACC) tatsächlich Informationen liefert, die zu einer Verhaltensänderung führen. Wo aber spiegeln sich diese Verhaltensänderungen im Gehirn wider?

**Monitoring und Kontrolle**

Während die frontomediane Aktivität prädiktiv für die Reaktionszeit im Folgedurchgang ist, wurden im lateralen Präfrontalcortex Aktivitätsänderungen in eben jenem Folgedurchgang gefunden, die mit der gleichzeitigen Reaktionszeitveränderung korrelieren (Kerns et al. 2004). Diese Befunde sprechen für eine Aufgabenteilung zwischen dem frontomedianen Cortex als Monitoring-Instanz und dem lateralen Präfrontalcortex als Kontrollinstanz. In dieser führen die Signale des

frontomedianen Cortex zur Implementierung von Kontrollprozessen, die zukünftige Fehlervermeidung begünstigen.

### 2.3.2 Exekutive Funktionen des lateralen Präfrontalcortex

Im letzten Kapitel haben wir die Frage aufgeworfen, ob es eine einheitliche „zentrale Exekutive“ gebe oder verschiedene Exekutivprozesse mit unterschiedlichen neuronalen Substraten. Inzwischen haben wir gesehen, dass es zumindest Evidenz für eine Aufgabenteilung zwischen frontomedianem Cortex und lateralem Präfrontalcortex gibt, im Sinne einer Monitoring- und einer Kontrollinstanz. Innerhalb des lateralen Präfrontalcortex hat es einige Versuche gegeben, eine weitere Kartierung voneinander abgrenzbarer funktionaler Module vorzunehmen (hier werden nur exekutive Funktionen behandelt; für andere präfrontale Funktionen, etwa in der Sprachverarbeitung oder der sozialen Kognition, s. Kap. 2.6 und 4.5).

Frühe tierexperimentelle Studien (Wilson et al. 1993) sprachen für eine Unterscheidung getrennter Arbeitsgedächtnissysteme für räumliche und figurale Information. Dahinter steckte die Vorstellung, die „Was“- und „Wo“-Pfade (s. Kap. 1.3) ließen sich bis in den Präfrontalcortex weiterverfolgen. Metaanalysen von fMRT-Arbeitsgedächtnisexperimenten konnten eine solche Trennung jedoch nicht bestätigen (D’Esposito et al. 1998; Wager/Smith 2003). Weitere tierexperimentelle Untersuchungen fanden auch im Affen, dass präfrontale Neurone oft räumliche und figurale Aspekte von Arbeitsgedächtnisleistungen integrieren (Rainer et al. 1998).



„Was“ und „Wo“

Ein anderes Konzept postuliert eine Unterscheidung zwischen ventralem und dorsalem Präfrontalcortex im Hinblick darauf, ob bei Arbeitsgedächtnisfunktionen allein das Halten von Information im Arbeitsgedächtnis im Vordergrund steht oder mit diesen Arbeitsgedächtnisinhalten noch exekutive „Manipulationen“ ausgeführt werden (Owen et al. 1996).

Halten und Manipulieren

In frühen Metaanalysen von fMRT-Studien konnte dieses Konzept bestätigt werden, wobei die Trennung zwischen reiner „Haltefunktion“ und Manipulation jedoch eher graduell als absolut verlief und nicht in allen Aufgaben beobachtet wurde (D’Esposito et al. 1998; Smith/Jonides 1999). Eine neuere Metaanalyse hat dies spezifiziert: Nicht alle „Manipulationen“, sondern spezifisch *updating* (wie etwa in der *n-back*-Aufgabe, in der bei sequenzieller Reizdarbietung jeweils der aktuelle Reiz mit dem *n*-Stellen vorher gezeigten Reiz verglichen werden muss) und Anforderungen an das Reihenfolgegedächtnis führen eher zu dorsalen lateral-präfrontalen Aktivierungen (Wager/Smith 2003).



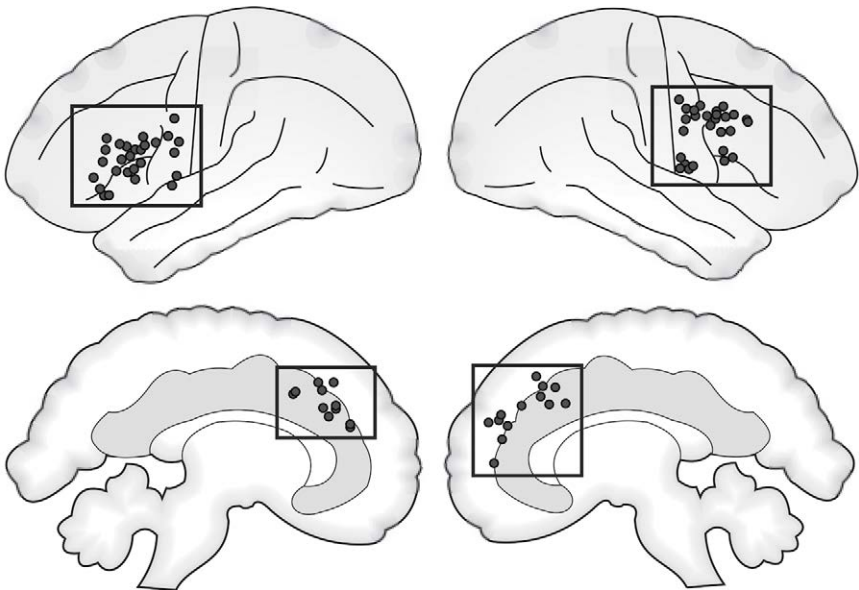
Einen gänzlich anderen Standpunkt vertreten Duncan und Owen (2000). Sie untersuchten 20 fMRT-Studien, die recht disparate Prozessanforderungen hatten. Die gefundenen frontalen Aktivierungen gruppieren sich lateral um den Sulcus frontalis inferior sowie medial im Bereich des posterioren frontomedianen Cortex (Abb. 2.3.4). Entlang des Sulcus frontalis inferior erstreckten sich die Aktivierungen etwa über das posteriore und mittlere Drittel. Innerhalb dieser Areale wurde keine funktionelle Differenzierung gefunden.



Zu dieser Studie kann man einige kritische Anmerkungen machen. Zum einen handelt es sich um eine Post-hoc-Analyse von Studien, die ursprünglich zur Untersuchung anderer Fragestellungen entwickelt wurden. Weiterhin sind die Auswahlkriterien schwer nachvollziehbar. Dass mit gezieltem hypothesengeleiteten Vorgehen feinere Prozessunterschiede und damit assoziierte Unterschiede der funktionellen Neuroanatomie gefunden werden können, belegen die oben beschriebenen Studien zu Fehler-Monitoring und Fehlerkontrolle sowie die Metaanalysen. Dennoch ist die Studie von Duncan und Owen nicht uninteressant. Sie zeigt zumindest, dass sich die Aktivierungen nicht gleichmäßig über den gesamten Präfrontalcortex verteilen. Sie treten gehäuft in bestimmten präfrontalen Arealen auf, obwohl die untersuchten Aufgaben recht unterschiedlich waren.

### fmRT-Aktivierung und Aufgabenspezifität

Ähnliche fmRT-Aktivierungen für verschiedene Aufgaben sind noch kein Beleg dafür, dass die Neurone in dem aktivierten Gebiet in beiden Aufgaben die gleiche Funktion unterstützen. Ein Beispiel: Wir haben gesehen, dass der primäre visuelle Cortex Neurone enthält, die selektiv auf Bewegung, andere, die selektiv auf Wellenlängenunterschiede reagieren (Kap. 1.1 und 1.3). Sowohl bewegte Reize wie Wellenlängenänderungen können aufgrund der geringeren räumlichen Auflösung der fmRT zu ununterscheidbaren V1-Aktivierungen führen.



**Abb. 2.3.4:** Gemeinsame präfrontale Aktivierungen in Aufgaben mit unterschiedlichen Anforderungen (nach Duncan/Owen 2000, bearbeitet)

Verhält es sich im Präfrontalcortex vielleicht auch so, dass überlappende Aktivierungen in verschiedenen Studien dadurch zustande kommen, dass der Präfrontalcortex verschiedene Funktionen räumlich so dicht beieinander unterstützt, dass die Unterschiede mit der begrenzten Auflösung nichtinvasiver Bildgebungsverfahren nicht sichtbar werden? Dagegen spricht, dass Ableitungen von einzelnen präfrontalen Neuronen häufig zeigen, dass einzelne Neurone auf verschiedene Anforderungen reagieren. Hierbei handelt es sich nicht einfach um unspezifische Reaktionen, wie eine Studie von Freedman und Kollegen (2001) zeigt.

In diesem Experiment wurden Affen Bilder von Tieren gezeigt, die sie als Hunde und Katzen kategorisieren sollten. Neben eindeutigen Vertretern der jeweiligen Kategorie wurden auch Bilder gezeigt, die „Morphs“ aus beiden Kategorien waren, etwa 60/40% Hund/Katze. Die Ableitungen wurden in zwei Hirnarealen durchgeführt, im inferotemporalen Cortex (IT) und im lateralen Präfrontalcortex (IPFC). Die Hypothese von Freedman und Kollegen war, dass die inferotemporalen Neurone selektiv auf bestimmte Tierbilder reagieren würden (wobei manche Neurone eher auf Merkmale der Katzen, andere auf bestimmte Hundemerkmale reagieren würden), aber nicht auf bestimmte Kategorien. Dagegen würden die lateral-präfrontalen Neurone die Kategorien abbilden. Die Hypothese wurde bestätigt – die inferotemporalen Neurone zeigten ein Kontinuum von Reaktionen, das dem Kontinuum der gezeigten Tierbilder entsprach. Die Reaktionen der lateral-präfrontalen Neurone hingegen zeigten eine deutliche Kategoriengrenze. Manche Neurone reagierten stärker auf Hunde als auf Katzen, andere umgekehrt stärker auf Katzen als auf Hunde. Dabei war die Varianz der Reaktionen auf Bilder innerhalb der Kategorie sehr viel geringer als zwischen den Kategorien.

Für die Funktionsweise der lateral-präfrontalen Neurone war folgender Befund von besonderer Bedeutung: Nachdem die Affen die Hund/Katze-Unterscheidung gelernt hatten, wurde ihnen eine andere Kategorisierung antrainiert. Die gleichen Tierbilder sollten jetzt nach neuen Kategorien gruppiert werden, wobei gleich viele „Hunde“ wie „Katzen“ in die neuen Kategorien fielen (die neuen Kategorien waren orthogonal zu den alten Kategorien). Die gleichen lateral-präfrontalen Neurone, deren Reaktionen zuvor die Hund/Katze-Kategorien repräsentiert hatten, repräsentierten jetzt die neuen Kategorien. Die inferotemporalen Neurone dagegen reagierten nach wie vor auf die gleichen individuellen Tierbilder, auf die sie auch zuvor reagiert hatten. Die Autoren schlossen daraus, dass die lateral-präfrontalen Neurone in der Lage waren, unterschiedliche Klassifikationsgrenzen zu erlernen, während dies bei den inferotemporalen Neuronen nicht der Fall war.

Ähnliche Befunde stammen aus der Literatur zu konditionalem Assoziationslernen. Bei dieser Lernform (s. a. Kap. 3.5–3.7) werden nicht einfach Assoziationen zwischen Reiz und Reaktion erlernt, sondern kontextabhängige, bedingte Assoziationen zwischen Reiz und Reaktion. So signalisiert etwa ein bestimmter Ton nur dann Futter, wenn zuvor eine Lampe aufleuchtet. Viele Experimente haben gezeigt, dass konditionales Assoziationslernen nach präfrontalen Läsionen gestört ist (Miller et al. 2002). Dabei lernen gesunde Affen diese kontextabhängigen Zusammenhänge sehr schnell. In einer Studie etwa wechselten täglich die Assoziationen: Reize, auf die zu reagieren an einem Tag belohnt



**konditionales  
Assoziationslernen**

wurde, waren am nächsten Tag Ablenkerreize, auf die keine Belohnung erfolgte (Bichot/Schall 1999).

In einem weiteren Experiment lernten Affen innerhalb von 5–15 Versuchsdurchgängen, auf welche Reize sie reagieren mussten, um eine Belohnung zu erhalten. Ihre PFC-Neurone zeigten während dieser Durchgänge eine mit der korrekten Reaktion assoziierte Aktivierung: Sie trat zunächst nur unmittelbar vor der Reaktion auf, dann aber immer früher, als wenn die Neurone eine Erwartung repräsentieren würden (mehr zur Kodierung von Erwartung in Kap. 4.4). Präfrontale Neurone des Affen kodieren darüber hinaus auch verschiedene Aufgabeninstruktionen in Aufgabenwechsexperimenten (Hoshi et al. 1998; White/Wise 1999; Asaad et al. 2000).

#### adaptive Kodierung

Aus solcherart Experimenten entstand die Vorstellung einer adaptiven Kodierung im Präfrontalcortex (Duncan 2001; Miller et al. 2002). Danach sind präfrontale Neurone in der Lage, im Gegensatz zu der Verarbeitung in posterioren Hirnarealen, sich an verschiedene Aufgabenanforderungen anzupassen und die verschiedensten Aufgabenanforderungen zu kodieren.

Bedeutet diese Adaptivität des Präfrontalcortex, dass es keinerlei Unterschied in der neuronalen Kodierung verschiedener exekutiver Prozesse gibt? Dies wäre ein voreiliger Schluss. Der große Vorteil der Einzelzelleableitungen beim Affen, die große räumliche Auflösung, wird mit einem Nachteil erkaufte, dass nur ein kleines Areal (oder wenige Areale) des Gehirns untersucht werden kann. Für die Frage, ob es doch bestimmte Areale des, insbesondere lateralen, PFC gibt, die mit spezifischen Klassen von Aufgabenanforderungen assoziiert sind, wenden wir uns wieder den bildgebenden Studien zu.

#### hierarchisches Kontrollmodell

Wir haben eine Vielzahl kognitiver Kontrollprozesse kennengelernt. Weiterhin haben wir gesehen, dass diese Kontrollprozesse mit einer Reihe verschiedener Hirnaktivierungsmuster einhergehen. In diesen sind zwar einige Konstanten erkennbar, wie etwa die Involvierung des medialen frontomedianen Cortex in das Fehler-Monitoring oder des lateralen inferioren frontalen Knotenpunkts bei Aufgabenwechselprozessen. Dennoch stellt sich die Frage, ob es eine übergreifende Organisation exekutiver Kontrollprozesse gibt, die es erlaubt, Klassen von Aufgaben (und von ihnen geforderter Kontrollprozesse) zu unterscheiden, die dann auch ein zugehöriges neuronales Korrelat haben. Ein interessanter Vorschlag in dieser Richtung (Koechlin et al. 2003; Koechlin/Summerfield 2007) unterscheidet drei Arten von Prozessen:

- (1) Reaktionen auf einen Stimulus,
- (2) Reaktionen auf einen Stimulus, die vom Aufgabenkontext (*task set*) abhängen, und
- (3) die episodische Kontrolle dieser *task sets*.

Damit ist gemeint, dass, wenn der gleiche Reiz in Abhängigkeit vom Aufgabenkontext verschiedene Reaktionen verlangt, stets die aktuelle Aufgabenkonfiguration beibehalten und andere, zuvor gültige Aufgabenkonfigurationen unterdrückt werden müssen (zum Begriff „episodisches Gedächtnis“ s. Kap. 3.3, Kasten „Amnesien“).

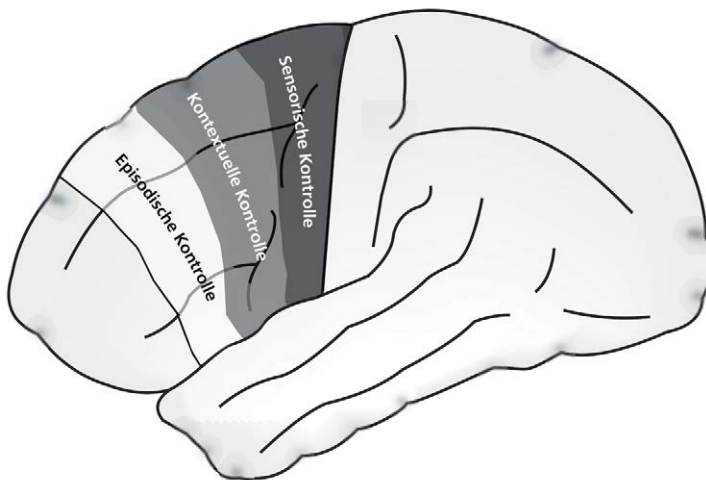
Am Beispiel der Stroop-Aufgabe veranschaulicht, bedeutet das:

**B**

- (1) Lies das Wort (stimulusabhängige Reaktion),
- (2) lies das Wort oder benenne die Farbe, abhängig vom Aufgaben-Cue (kontextuelle Kontrolle), und
- (3) inhibiere das (zuvor verlangte) Lesen des Worts zugunsten der Farbbenennung (wenn aktuell die Benennung gefordert ist).

In einem Experiment konnten Koechlin und Kollegen (2003) zeigen, dass diese Verarbeitungsstufen mit einer ebenfalls gestuften Aktivierung des lateralen Frontalcortex einhergehen (Abb. 2.3.5). Einfache stimulusabhängige Reaktionen führten zu einer Aktivierung prämotorischer Areale (an der posterioren Grenze des Präfrontalcortex), kontextabhängige Reaktionen führten zur zusätzlichen Aktivierung des posterioren Präfrontalcortex und episodische Kontrolle zur wiederum zusätzlichen Aktivierung des anterioren Präfrontalcortex.

Das hierarchische Modell passt zu der bereits vorgestellten Hypothese, dass der posteriore IPFC eine bedeutsame Rolle bei der Aufgabenkonfigurierung spielt. Es bleibt abzuwarten, ob dieses Konzept einer hierarchischen Repräsentation exekutiver Kontrollprozesse im Frontalcortex in weiteren Studien, insbesondere unter Verwendung anderer experimenteller Paradigmen, repliziert werden wird. Solange dies nicht geschehen ist, bleibt der Anwendungsbereich des hierarchischen Modells unklar. Es bildet aber in jedem Fall eines der interessantesten Konzepte für die funktionelle Organisation des Präfrontalcortex.



**Abb. 2.3.5:** Das hierarchische Kontrollmodell von Koechlin et al. (2003)



## Fragen zu Kapitel 2.3

### Überprüfen Sie Ihr Wissen!

91. In welchen Situationen tritt die *error-related negativity* auf?
92. Nennen Sie einige neuroanatomische Strukturen des frontomedianen Cortex und skizzieren Sie ihre Lage.
93. Welche Bedeutung wird dem Botenstoff Dopamin für die Fehlerverarbeitung nach der Theorie von Holroyd und Coles zugesprochen?
94. Was unterscheidet die Fehler-Monitoring-Theorie von der Vorstellung, Neurone im anterioren cingulären Cortex detektierten Fehler?
95. Welche Belege gibt es für eine Arbeitsteilung zwischen frontomedianem und lateralem präfrontalen Cortex bei der Reaktion auf Fehler?
96. Welche Belege sprechen für oder gegen eine räumliche Trennung von Arbeitsgedächtnisfunktionen im lateralen Präfrontalcortex?
97. Was besagt das Konzept der adaptiven Kodierung?
98. Was ist konditionales Assoziationslernen? Welche neuronalen Korrelate hat es?
99. Skizzieren Sie das Modell hierarchischer Kontrollprozesse im Präfrontalcortex.
100. Entwerfen Sie ein Experiment, mit dem Sie eine vermutete Einschränkung der Fehlerkontrolle in einer Patientenpopulation untersuchen könnten.

## 2.4 Problemlösen

In den Jahren 1913–1920 leitete der Psychologe Wolfgang Köhler die Anthropoiden-Forschungsstation der Preußischen Akademie der Wissenschaften auf Teneriffa. In dieser Zeit führte er Experimente mit Schimpansen durch, die zum Ziel hatten, „intelligentes Verhalten von der Art des am Menschen bekannten“ zu untersuchen (Köhler 1921/1963, 1). Dies war zu der Zeit durchaus unüblich, da die vorherrschende Betrachtungsweise tierischen Verhaltens durch die Arbeiten von Pawlow und Thorndike geprägt waren. Nach diesen wurden tierische Problemlöseleistungen als Verkettung einfacher Handlungen und Reizsituationen mit nachfolgender Belohnung verstanden (Kap. 3.1).

Thorndike etwa beobachtete, wie sich Katzen aus Käfigen befreiten: Sie öffneten zunächst durch scheinbar zufälliges Probieren eine Reihe von Verschlussmechanismen und lernten erst im Laufe vieler Wiederholungen, die Verschlüsse zu öffnen, um sich zu befreien. Köhler machte bei seinen Schimpansen andere Beobachtungen. Der Schimpanse „Sultan“ etwa benötigte ca. eine Stunde, um verschiedene Stöcke zusammenzustecken, die sich in seinem Käfig befanden. Nachdem ihm dies gelungen war, benutzte er den langen Stock sofort, um eine Banane zu erreichen, die sich außerhalb des Käfigs befand. Andere Affen, vor die Aufgabe gestellt, eine über ihren Köpfen hängende Banane zu erreichen, bewegten sich zunächst scheinbar ziellos in ihrem Käfig, türmten dann aber plötzlich mehrere Kisten aufeinander, um auf diese zu klettern und schließlich die Banane zu erreichen.



Köhler argumentierte, dass der zeitliche Ablauf des Verhaltens seiner Affen nicht durch graduelles Versuch-und-Irrtum-Lernen zu erklären sei. Er zeige, dass die Affen „Einsicht“ zeigten.

### 2.4.1 Problemeterminanten

Das Beispiel der problemlösenden Affen zeigt einige Charakteristika, die auch für das menschliche Problemlösen gelten. Der Problemlöser befindet sich in einer „Start“-Position, er möchte ein Ziel erreichen. Um vom Start zum Ziel zu gelangen, müssen jedoch (gedankliche) Barrieren überwunden werden. Oft gelingt die Überwindung der Barrieren erst nach einiger Zeit, dann jedoch einer plötzlichen Eingebung folgend.

Von der Gestaltpsychologie, einer Richtung der deutschen Psychologie, zu deren Begründern auch Wolfgang Köhler gehörte, wurde der Problemlöseprozess als eine Abfolge von Phasen beschrieben: zunächst eine Vorbereitungsphase, in der man sich mit dem Problem vertraut macht, sodann eine Inkubationsphase, in der mögliche Lösungen des Problems heranreifen, gefolgt von einer Illumination (Aha-Erlebnis) und der anschließenden Verifikationsphase, in der die Brauchbarkeit der Lösungsidee überprüft wird (Wallas 1926).

**Gestaltpsychologie**

Ein zentrales Postulat der Gestaltpsychologie war die Bedeutung „produktiven Denkens“. Danach vollzieht sich erfolgreiche Problemlösung nicht primär durch die Reproduktion bereits bekannter Lösungswege in neuen Situationen, sondern durch die Schaffung neuer Lösungswege. Umgekehrt behindert uns unser Wissen um Lösungsstrategien, die in anderen Situationen erfolgreich waren, manchmal bei der Lösung neuer Probleme.

**produktives Denken**

Ein frühes Beispiel für solch eine Beschränkung stammt von dem deutschen Psychologen Karl Duncker, ebenfalls ein Vertreter der Gestaltpsychologie. Duncker (1945) stellte seine Probanden vor die Aufgabe, eine Kerze so an der Wand anzubringen, dass sie aufrecht steht und angezündet werden kann. Als Hilfsmittel fanden die Probanden neben der Kerze eine Schachtel mit Reißzwecken und ein Streichholzheftchen.



■ Überlegen Sie zunächst einmal selbst, wie Sie das Problem lösen könnten.

Nur wenige kamen auf die Idee, die Schachtel zu leeren und als Podest für die Kerze an die Wand zu heften. Duncker sah den Grund für die Schwierigkeit, diese Lösung zu finden, in der „funktionellen Gebundenheit“. Eine Schachtel ist zunächst ein Behälter. Es bereitet uns Schwierigkeiten, von dieser Funktion zu abstrahieren und mögliche andere Nutzungen zu finden.

Auf systematischere Weise wurde der Einfluss von Vorerfahrung durch Luchins (1942; Luchins/Luchins 1959) untersucht. Hierbei wurde die Vorerfahrung der Probanden durch die Art der Aufgaben direkt variiert. Das Problem bestand darin, in einem Krug eine bestimmte Menge Wasser herzustellen. Dazu standen Krüge verschiedener Größe bereit.



**Tab. 2.4.1:** Beispiel für eine Umfüllaufgabe nach Luchins (1942)

Problem	Größe der Krüge			Ziel
1.	29	3		20
2.	21	127	3	100
3.	14	163	25	99
4.	18	43	10	5
5.	9	42	6	21
6.	20	59	4	31
7.	23	49	3	20
8.	15	39	3	18
9.	28	76	3	25
10.	18	48	4	22
11.	14	36	8	6

Versuchen Sie einmal selbst, Problem 1 aus Tabelle 2.4.1 zu lösen, bevor Sie weiterlesen. Die Lösung ist, zunächst den Krug, der 29 Liter fasst, zu füllen und dann dreimal 3 Liter mit dem kleinen Krug abzuschöpfen. Bearbeiten Sie jetzt bitte die restlichen Umfüllaufgaben aus der Tabelle.

Wenn Sie die Aufgaben bearbeitet haben, werden Sie schnell bemerkt haben, dass sie sich nach einem bestimmten Schema lösen lassen, nämlich den großen Krug B zu füllen, dann einmal mit Krug A abzuschöpfen, gefolgt von zweimaligem Abschöpfen mit Krug C. Ist Ihnen auch aufgefallen, dass es ab dem 7. Problem auch eine einfachere Lösungsmöglichkeit gibt, nämlich durch einmaliges Schöpfen bzw. Umgießen? Wenn Sie die einfachere Lösung gefunden haben, ist Ihnen dies bereits bei Problem 7 oder 8 gelungen oder erst bei Problem 9? Problem 9 ist so konstruiert, dass die ursprüngliche Lösung (Krug B – Krug A – 2 x Krug C) nicht mehr aufgeht.

Damit sollten die Probanden angeregt werden, neue Lösungswege zu suchen. Luchins und Luchins berichteten, dass nur ein Viertel ihrer Probanden die einfachere Lösung fanden, wenn auch die Einstellungslösung gültig war. Auch das Einstreuen von Problemen, für die die Einstellungslösung nicht galt (wie Problem 9), führte selten zu einer Änderung der Strategie. Im Vergleich dazu wurde die einfachere Lösung in einer Kontrollgruppe zu 100 % gefunden. Diese Gruppe bearbeitete Probleme, die von Anfang an die einfache Lösung neben der komplexeren Lösung ermöglichten.

Versuchen Sie einmal, Ihr bisheriges Wissen über erfolgreiche Problemlösestrategien auf folgendes Problem anzuwenden. In Abbildung 2.4.1 sehen Sie Rechenaufgaben, die mit Streichhölzern dargestellt sind. In der dargestellten Form gehen die Gleichungen nicht auf. Sie sollen nun durch Umlegen nur eines

Streichholzes eine gültige Gleichung herstellen. Die Gleichungen dürfen nur römische Zahlen, Plus-, Minus- und Gleichheitszeichen enthalten (also z. B. keine Ungleichung).

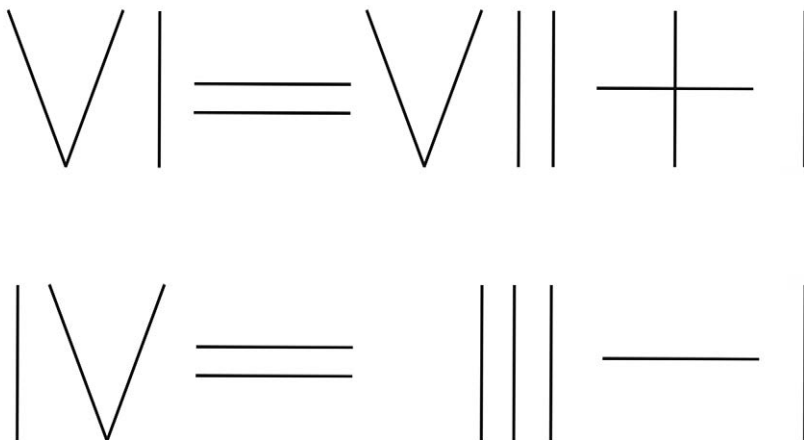
Problem A wurde in einer Studie von etwa 75 % der Probanden innerhalb einer Minute gelöst, während dies bei Problem B nur etwa 5 % der Teilnehmer schafften. Die beiden Probleme unterscheiden sich darin, dass Problem A durch Veränderung der Zahlenwerte gelöst werden kann ( $7 = 6 + 1$ ), während das für Problem B nicht gilt. Zur Lösung von Problem B müssen die Operatoren verändert werden ( $4 - 3 = 1$ ). Warum fällt uns das schwerer als eine Veränderung der Zahlenwerte? Knoblich und Kollegen argumentierten, dass wir häufiger damit konfrontiert werden, dass strukturell gleiche Aufgaben mit variablen Werten gelöst werden sollen und daher die Zahlen eher als die Operatoren als variabel ansehen. Blickmessungen während der Aufgabenbearbeitung zeigten denn auch, dass die Probanden zunächst fast ausschließlich die Zahlen betrachteten (Knoblich et al. 1999). Auch hier hängt die erfolgreiche Problemlösung also davon ab, sich von mentalen Einstellungen zu lösen, die in der Vergangenheit zur Aufgabenstrukturierung beigetragen haben, im konkreten Fall aber die Problemlösung behindern.



Es liegt in der Natur des Problemlösens, dass die Einsicht in die Problemstruktur oft auf sich warten lässt und ihr Eintreten kaum planbar ist. Das ist insbesondere ein Problem für die Untersuchung neuronaler Korrelate des Problemlösens, da die Analyse bildgebender Daten auf eine genaue Kenntnis des Zeitverlaufs kognitiver Prozesse angewiesen ist. Ein Ansatz, dieses Problem in den Griff zu bekommen, ist die Verwendung von Hinweisreizen, die die „Einsicht“ erleichtern (und beschleunigen) sollen.

**Hinweisreize**

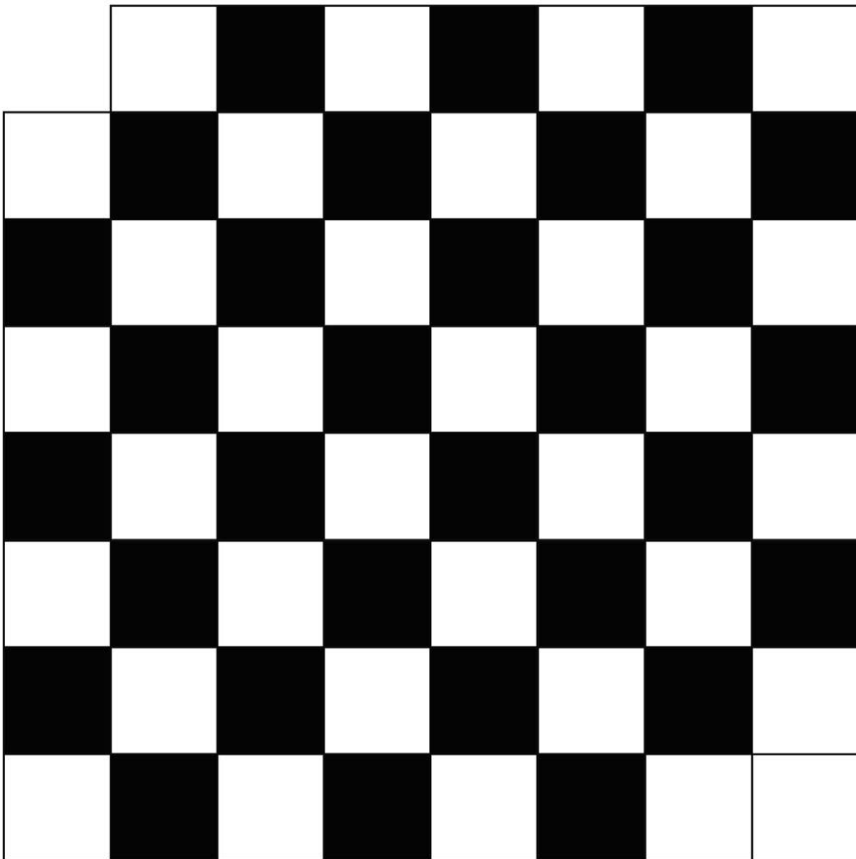
In einer solchen Studie wurden den Probanden Sätze vorgegeben, die zunächst keinen Sinn zu ergeben schienen, wie: „Der Heuhaufen war wichtig, weil das Tuch riss.“ Sodann wurde ein Hinweisreiz präsentiert, der das Verständnis des Satzes



**Abb. 2.4.1:** Streichholz-Arithmetikprobleme nach Knoblich et al. (1999). Bilden Sie durch Umlegen nur eines Hölzchens eine gültige Gleichung!

ermöglichen sollte: „Fallschirm“ (Luo et al. 2004). Die meisten Probanden erfassten zunächst die Bedeutung des Satzes nicht, weil sie mit „Tuch“ ein Kleidungsstück assoziierten. Der Hinweisreiz führte jedoch meist zu einem Verständnis des Zusammenhangs zwischen zerrissenem Fallschirm und der Bedeutung des Heuhaufens.

Als Kontrollbedingung wurden leicht verständliche Sätze präsentiert wie: „Die Zugabe des Pulvers verstaubte den Kaffee“ – „Zucker.“ Der Vergleich der beiden Bedingungen ergab eine erhöhte Aktivierung des anterioren cingulären Cortex und des linken lateralen Präfrontalcortex. Wir hatten in Kapitel 2.2 gesehen, wie diese beiden Hirnareale in der Signalisierung von kognitivem Kontrollbedarf und der Umsetzung kognitiver Kontrolle zusammenwirken. Aktivität im ACC signalisierte den Bedarf für erhöhte kognitive Kontrolle, etwa, nachdem ein Fehler aufgetreten war. Die Aktivierung im lateralen Präfrontalcortex korrelierte dann mit dem Grad der kognitiven Kontrolle. Bei plötzlicher Einsicht in die Problemstruktur sind wir in einer ähnlichen Situation. Die bisherigen Lösungsversuche haben



**Abb. 2.4.2:** Das Problem des unvollständigen Schachbretts. Können die 62 Felder mit 31 Dominosteinen vollständig bedeckt werden?

sich als unzureichend erwiesen, mit der Einsicht geht die Implementierung eines neuen Lösungsansatzes einher, die zunächst kognitive Kontrolle erfordert.

## 2.4.2 Problemrepräsentation

Oft ist es für eine erfolgreiche Problemlösung entscheidend, wie das Problem mental repräsentiert wird.

Versuchen Sie folgendes Problem zu lösen: In Abbildung 2.4.2 sehen Sie ein Schachbrett, in dem zwei Felder fehlen, in der linken oberen und der rechten unteren Ecke. Können Sie die 62 Felder mit 31 Dominosteinen (die jeweils zwei Felder abdecken) bedecken? Begründen Sie Ihre Antwort.

Manche Probanden sollen tagelang nach der Lösung gesucht haben, was auch nicht verwunderlich ist, da es 758.148 mögliche Permutationen der Dominosteine gibt. Durch mentales Legen der Dominosteine eine Lösung zu finden ist daher aussichtslos. Das Problem wird erheblich einfacher, wenn man sich vor Augen führt, dass jeder Dominostein, egal wie er verlegt wird, jeweils ein weißes und ein schwarzes Feld bedeckt. Das unvollständige Schachbrett enthält 32 weiße, aber nur 30 schwarze Felder. Es ist daher nicht möglich, alle Felder des unvollständigen Schachbretts mit 31 Dominosteinen zu bedecken.

Die Frage der Repräsentation wurde insbesondere von Forschern aufgegriffen, die Computermodelle des Problemlösens entwickelt haben. Hier sind insbesondere Allen Newell und Herbert Simon zu nennen, die seit den 1950er Jahren an solchen Computermodellen gearbeitet haben und mit dem *general problem solver* (1972) ein allgemeines, auf Computern implementierbares Modell des Problemlösens vorgelegt haben. Für dieses Modell entwickelten sie das Konzept des Problemraums. Der Problemraum umfasst den Anfangs- und den Zielzustand eines Problems sowie alle Zwischenschritte, die mit den verfügbaren mentalen Operatoren erreicht werden können.

**Problemraum**

Das Konzept des Problemraums lässt sich am besten an gut definierten Problemen wie dem „Turm von Hanoi“ illustrieren. Dabei handelt es sich um ein Spiel, bei dem eine Reihe von Scheiben der Größe nach geordnet auf einem Stab aufgereiht sind und auf einen anderen Stab bewegt werden müssen, so dass sie am Ende wiederum nach der Größe geordnet auf diesem Zielstab liegen. Dabei darf jeweils nur eine Scheibe bewegt werden und es darf nie eine größere auf eine kleinere Scheibe gelegt werden (Abb. 2.4.3). Das Vorgehen eines Problemlösers kann damit durch die Operation beschrieben werden, die er gerade ausgeführt hat und durch den Zustand, den er damit erreicht hat (die Verteilung der Scheiben auf den drei Stäben).

**B**

**Turm von Hanoi**

Nach Newell und Simon besteht eine allgemeingültige Beschreibung des Problemlösens in der Anwendung von Algorithmen und Heuristiken. **Algorithmen** sind Prozesse, die mit Sicherheit zu einem bestimmten Ergebnis führen. **Heuristiken** dagegen sind Daumenregeln.



Eine solche Heuristik ist die Mittel-Ziel-Analyse. Diese besteht aus einer Abfolge von drei Schritten: (1.) Beschreibe die Differenz zwischen dem jetzigen Zustand und

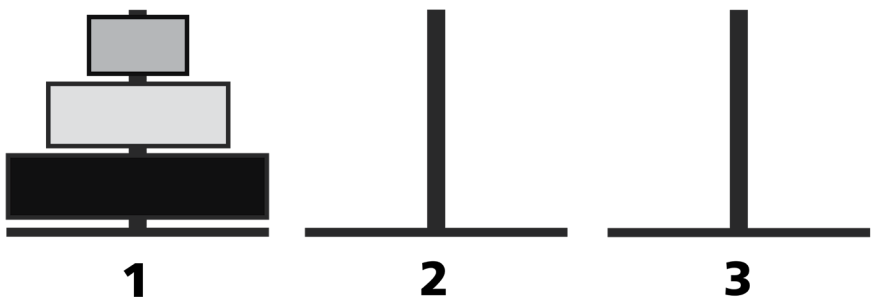
**Mittel-Ziel-Analyse**

## hill climbing

dem Zielzustand. (2.) Formuliere ein Zwischenziel, das die Differenz zwischen dem Jetzzustand und dem Zielzustand verringert. (3.) Wähle einen mentalen Operator aus, der die Erreichung dieses Zwischenziels erreicht. Diese Vorgehensweise wird dann so lange wiederholt, bis der Zielzustand erreicht ist (sofern das möglich ist).

Eine andere Heuristik heißt im Englischen *hill climbing*. Sie besagt, wenn man einen Berg besteigen will und den Weg nicht kennt, so sollte man einen Weg wählen, bei dem es aufwärtsgeht. Dieses Beispiel zeigt deutlich den Unterschied zwischen einem Algorithmus, der immer zum Ziel führt, und einer Heuristik. Es ist nicht sicher, dass uns ein ansteigender Weg zum gewünschten Gipfel führt, der Weg könnte zu einem anderen Gipfel führen, von dem wir erst wieder absteigen müssen, um zum gewünschten Gipfel zu gelangen. Dennoch ist die *hill-climbing*-Methode ein vernünftiger Ansatz zur Problemlösung, wenn wir keine weiteren Informationen über den richtigen Weg haben.

Der Informationsverarbeitungsansatz des Problemlösens kann recht gut auf einige wohldefinierte Probleme, wie den Turm von Hanoi, angewendet werden. Ein Vorteil ist, dass eine formale Problemanalyse zunächst einmal definiert, was der optimale Lösungsweg ist, woran dann menschliche Problemlösestrategien gemessen werden können. Es wurden aber auch Unterschiede zwischen dem Vorgehen des *general problem solver* (Newell/Simon 1972; 1961/1995), einem Problemlöseprogramm, das die Mittel-Ziel-Analyse und das Problemraumkonzept enthält, und menschlichem Problemlösen gefunden. Zum einen vergessen Menschen manchmal vorherige Züge und wiederholen diese. In einigen Untersuchungen wurde gefunden, dass Strategien zur Vermeidung solcher Wiederholungen einigen Aufwand beanspruchen (Anzai/Simon 1979). Zum anderen planen Menschen meist weiter als nur einen Zug in die Zukunft (Greeno 1974), im Unterschied zur Konzeption der Mittel-Ziel-Analyse. Vor allem aber ist die Anwendbarkeit doch recht eingeschränkt, insofern als viele Probleme des Alltags nur schlecht definiert sind und sich damit einer formalen Problemraumanalyse weitgehend entziehen. Das Konzept der Teilzielbildung ist auch nicht auf alle Probleme gleich gut anwendbar, man denke an die oben beschriebenen „Einsichts“-Probleme.



**Abb. 2.4.3:** Der Turm von Hanoi. Die Scheiben müssen von Stab 1 auf Stab 3 versetzt werden, so dass sie dort wieder „pyramidenförmig“ aufeinanderliegen. Dabei darf immer nur eine Scheibe versetzt werden, und es darf nie eine größere Scheibe auf einer kleineren liegen.

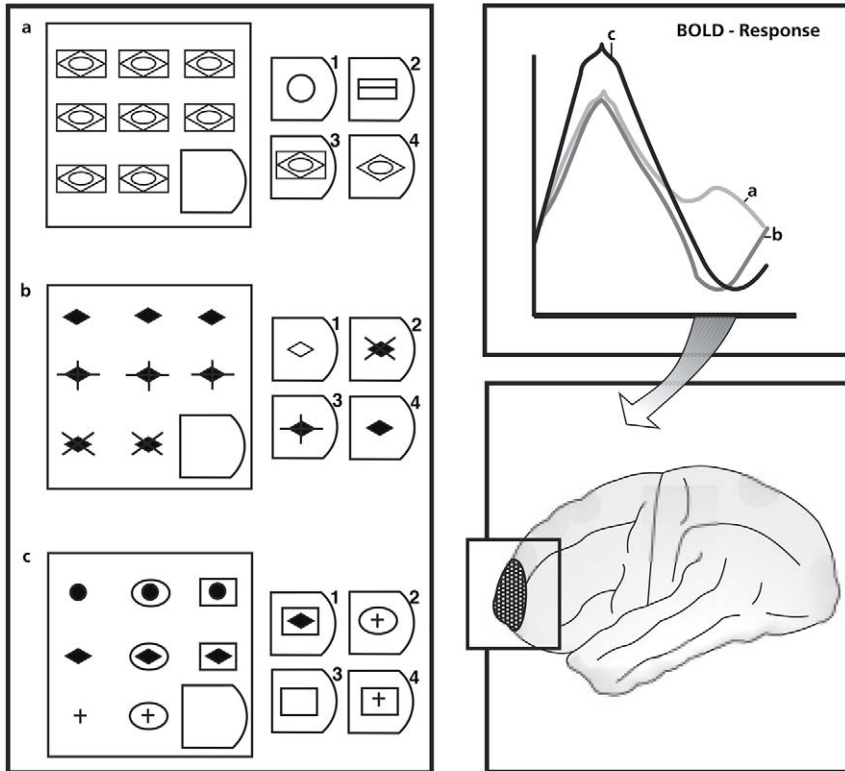
### 2.4.3 Präfrontale Funktionen

Planungsprozesse sind oft bei hirngeschädigten Patienten mit präfrontalen Läsionen schwer gestört (Damasio/Anderson 1993). Eine Studie zeigte, dass linkspräfrontale Läsionen zu deutlichen Einbußen im Turm von London (einer Variante des Turms von Hanoi) führten (Shallice 1982). Während die Läsionsstudien nur eingeschränkte Funktionslokalisationen innerhalb des Präfrontalcortex zuließen, ergaben neuere bildgebende Untersuchungen hier Fortschritte. Bearbeitung des Turms von Hanoi ging einher mit Aktivierungen in einem weiten Netzwerk von Hirnarealen.

**präfrontale Läsionen**

Während jedoch die meisten dieser Areale auch durch Arbeitsgedächtnisaufgaben ohne spezifische Planungsanforderungen aktiviert wurden, so war ein Areal, der rostrale Präfrontalcortex, spezifisch in der Turm-von-Hanoi-Aufgabe aktiviert (Baker et al. 1996). Die rostral-präfrontale Aktivierung stieg zudem mit zunehmender

**rostraler Präfrontalcortex**



**Abb. 2.4.4:** Rostral-präfrontale Aktivierung bei der Integration mehrdimensionaler Information. Links: Beispiele aus den Raven-Matrizen, a) 0-relational; b) 1-relational; c) 2-relational. Rechts: Rostral-präfrontale Aktivierung in der gleichen Studie, oben: Zeitverlauf des fMRT-Signals; unten: Lage des frontopolaren Cortex (nach Christoff et al. 2001, bearbeitet)

mender Zahl vorauszuplanender Züge an. Spätere Untersuchungen haben den rostralen Präfrontalcortex in Verbindung mit der Bildung von Unterzielen gebracht (Braver/Bongiolatti 2002). Die genaue Funktion (oder die Funktionen) dieses Teils des Präfrontalcortex ist jedoch noch nicht abschließend geklärt.

### Raven-Matrizen

Eine direkte Beteiligung des rostralen Präfrontalcortex an Problemlöseprozessen wurde in einer Studie nachgewiesen, die verschiedene Varianten der Raven-Matrizen untersucht hat (Abb. 2.4.4; Christoff et al. 2001). Die Raven-Matrizen (Raven 1938) gehören zu einem Intelligenztest. Bei diesem geht es darum, Regelmäßigkeiten in graphischen Displays zu erkennen, um anhand dieser Reguliaritäten dann ein fehlendes Element der Matrix zu ergänzen.

In der obersten Matrix in Abbildung 2.4.4 links variieren die Elemente der Matrix weder entlang der Zeilen noch der Spalten (0-relational). In der mittleren Matrix muss die Variation in den Spalten berücksichtigt werden (1-relational). In der unteren Matrix variieren die Elemente sowohl über die Zeilen als auch die Spalten und müssen für die Lösung integriert werden (2-relational). Im linken rostralen Präfrontalcortex war die Aktivierung selektiv in der 2-relationalen Bedingung erhöht. Dies könnte möglicherweise aber mit der erhöhten Schwierigkeit dieser Bedingung zusammenhängen und nicht spezifisch mit der Beachtung und Integration zweier Stimulusdimensionen. Es zeigte sich aber, dass die selektiv erhöhte Aktivierung auch dann noch Bestand hatte, wenn nur Versuchsdurchgänge ausgewertet wurden, in denen die mittlere Reaktionszeit nicht höher war als in den 1- oder 0-relationalen Bedingungen. Damit konnte ausgeschlossen werden, dass andere Faktoren, wie etwa visuelle Komplexität der Reize, zu der erhöhten rostralen Aktivität beitrugen.

## 2.4.4 Analogiebildung und Expertise

### Analogiebildung

Im Laufe des Kapitels haben wir viele Beispiele kennengelernt, bei der die Vorerfahrung der Probanden die Problemlösung behinderte. In der Fachsprache wird dies als „negativer Transfer“ bezeichnet. Gibt es nicht auch Beispiele für positiven Transfer? Schließlich sollte es doch möglich sein, eine einmal erfolgreiche Problemlösung auf ähnlich gelagerte Probleme zu übertragen, im Sinne einer Analogiebildung. Ein klassisches Beispiel dafür ist das Duncker'sche Tumorproblem.

Stellen Sie sich vor, Sie seien ein Arzt und wollten eine Strahlentherapie zur Tumorbehandlung durchführen. Das Problem liegt darin, dass der Tumor von gesundem Gewebe umgeben ist und die Strahlendosis, die benötigt wird, um den Tumor zu zerstören, auch das gesunde Gewebe zerstören würde. Finden Sie einen Weg, eine erfolgreiche Behandlung durchzuführen? Denken Sie zunächst einmal darüber nach, bevor Sie weiterlesen.

Wenn Ihnen noch keine Lösung eingefallen ist, lesen Sie zunächst einmal die Geschichte im Kasten „Problemlösen über Analogien“.

## Problemlösen über Analogien

„Eine Festung befand sich mitten im Land. Viele Wege gingen sternförmig von der Festung aus. Ein General wollte die Festung mit seiner Armee erobern. Der General wollte aber vermeiden, dass Minen auf den Straßen seine Armee und die umliegenden Dörfer zerstörten. Deshalb konnte nicht die gesamte Armee über eine Straße angreifen. Der General benötigte aber die gesamte Armee, um die Festung zu erobern. Der Angriff einer kleinen Gruppe von Soldaten würde nicht ausreichen. Der General teilte seine Armee daher in mehrere Gruppen auf. Er postierte die Gruppen an den Anfang mehrerer Straßen. Die Gruppen stürmten dann gleichzeitig die Festung. Auf diese Weise gelang es ihm, die Festung einzunehmen.“ (nach Gick/Holyoak 1980)

Gick und Holyoak (1980) fanden, dass von ihren Probanden zunächst nur etwa 10 % das Tumorproblem lösen konnten. Wenn ihnen jedoch gesagt wurde, dass der Belagerungstext für die Problemlösung von Bedeutung sei, dann fanden 80 % der Probanden die Lösung des Tumorproblems: nämlich Strahlen geringer Dosierung von mehreren Seiten auf den Tumor zu richten, so dass die Strahlendosis nur im Treffpunkt der Strahlen, also im Tumorgewebe, die nötige zerstörerische Wirkung entfaltet. Einer weiteren Gruppe von Probanden wurde zwar der Belagerungstext zu lesen gegeben, es wurde aber nicht gesagt, dass der Text für die Lösung des Tumorproblems von Bedeutung sei (wie im vorliegenden Buch). In dieser Gruppe fanden nur etwa 40 % die Lösung. An dieser Studie zeigen sich exemplarisch mehrere Aspekte des Problemlösens per Analogie: Analogien können hilfreich sein, werden aber nicht immer genutzt. Einer Nutzung im Wege stehen kann semantische Unähnlichkeit des Analogieproblems (Keane 1987). Fördernd dagegen wirkt, wenn die Analogie eher unter strukturellen Aspekten gelesen wird als unter der Instruktion, möglichst viele Details zu memorieren.

Anders als die bisher behandelten Probleme erfordern manche Probleme beträchtliches Vorwissen. Die Rolle von Expertise beim Problemlösen wurde insbesondere an Schachproblemen studiert. Worin unterscheiden sich Schachgroßmeister von Anfängern?

In einer frühen Studie untersuchte de Groot (1965), wie viele Figuren Großmeister und Anfänger korrekt nachstellen konnten, nachdem sie ein Schachbrett mit einer Spielposition wenige Sekunden gesehen hatten. Er fand, dass die Experten mehr als doppelt so viele Positionen nachstellen konnten. Für dieses Ergebnis sind nun mehrere Erklärungen denkbar. Vielleicht haben Schachexperten generell ein größeres Arbeitsgedächtnis? Dies scheint nicht der Fall zu sein – der Vorsprung der Experten schrumpft deutlich dahin, wenn nicht tatsächliche Spielsituationen nachgestellt werden sollen, sondern zufällige Figurenanordnungen (Gobet/Simon 1996). Der verbleibende Vorteil der Schachexperten ist wahrscheinlich auch kein Indiz für ein größeres Arbeitsgedächtnis, sondern dafür, dass auch Zufallskombinationen in einer kleinen Prozentzahl realen Spielkonstellationen ähneln können. (Gobet/Waters 2003). Weitere Untersuchungen zeigten, dass es weniger ein aus-



### Expertise



geprägtes Gedächtnis für die Position der Figuren ist als vielmehr die Evaluation von Figurenkonstellationen wie Angriff, Verteidigung oder Bedrohung. Die Schachexperten merkten weit eher, wenn eine Figur aus einer solchen Konstellation verändert wurde – wobei die Angriffs- oder Verteidigungsqualität der Konstellation verändert wurde –, als wenn die gesamte Szene um ein Feld verschoben wurde (McGregor/Howes 2002).

Schachexpertise scheint also zumindest z. T. darin zu bestehen, schnell für das Spiel bedeutende Figurenkonstellationen zu erkennen. Dabei geschieht dies vermutlich über einen Abgleich mit im Langzeitgedächtnis (s. Kap. 3) gespeicherten Spielsituationen. Auf diese Weise sind Experten viel eher als Anfänger in der Lage, unter Zeitdruck oder im Simultanspiel gegen mehrere Gegner optimale Züge zu finden. Vermutlich wirken sich diese Vorteile vor allem in Routinesituationen aus, in denen auf bekannte Situationen reagiert werden muss.



## Fragen zu Kapitel 2.4

### Überprüfen Sie Ihr Wissen!

101. Nennen Sie einige Beiträge der Gestaltpsychologie zur Problemlöseforschung.
102. Was enthält der „Problemraum“?
103. Definieren Sie die Begriffe „Algorithmus“ und „Heuristik“.
104. Aus welchen Schritten besteht die Technik der Mittel-Ziel-Analyse?
105. Nennen Sie Vor- und Nachteile der Simulation menschlicher Problemlöseprozesse mit Programmen wie dem *general problem solver*.
106. Welchen Problemlöseprozess unterstützt der rostrale Präfrontalcortex?
107. Welche Bedingungen fördern Problemlösung durch Analogiebildung?
108. Wenn Sie als Berater in ein Unternehmen gerufen würden, welche Rahmenbedingungen würden Sie herstellen, um mit den Experten des Unternehmens zu einer möglichst guten Problemlösung zu gelangen?
109. Welche Aspekte von Expertise fördern die Problemlösung? Welche können sie hemmen?
110. Lösen Tiere Probleme nur durch Versuch und Irrtum?

## 2.5 Sprache I

### 2.5.1 Wortverständnis und -produktion

Ein erwachsener Sprecher des Deutschen mit akademischer Bildung hat im Laufe der Sprachentwicklung einen Wortschatz von 100.000–200.000 Einträgen erworben, von denen allerdings i. d. R. nur 30.000–50.000 Wörter aktiv genutzt werden (Zwitserlood/Bölte 2002). Natürlich hängen diese Zahlen stark vom Bildungsgrad ab. Um diese Wörter nutzen zu können, müssen mindestens zwei Aspekte erfüllt sein: Zum einen müssen wir die Bedeutung eines Wortes kennen. Zum anderen müssen wir aber auch wissen, wie ein Wort im Satzzusammenhang benutzt

wird (etwa als Substantiv, Verb etc.) und wie die Wortform angepasst werden muss, um einen wohlgeformten Satz zu bilden. Beide Aspekte, semantische Bedeutung und syntaktische Struktur, sind dauerhaft im Langzeitgedächtnis repräsentiert. Wir werden aber sehen, dass es viele Hinweise darauf gibt, dass der Zugriff auf Semantik und Syntax zumindest zu einem gewissen Grad voneinander unabhängig sind. Der Teil des Langzeitgedächtnisses, in dem die linguistischen Aspekte der Wörter gespeichert sind, wird mentales Lexikon genannt.

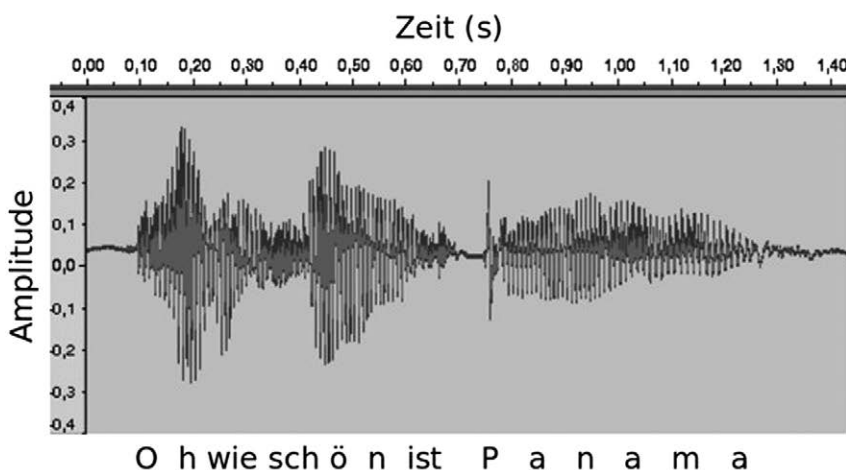
Das mentale Lexikon enthält die phonologischen und die visuellen Wortformen, die uns das Verständnis und die Produktion gesprochener und geschriebener Sprache ermöglichen. Die Trennung von Wortbedeutung – repräsentiert im Langzeitgedächtnis – und Wortform – im mentalen Lexikon – folgt der Tatsache, dass Konzepte unabhängig von Sprache existieren können. Sicherlich ist die Entwicklung besonders abstrakter Konzepte in Abwesenheit von Sprache stark eingeschränkt, allerdings verlieren Menschen, die aufgrund einer Hirnschädigung eine Aphasie erlitten haben, nicht die Verfügbarkeit über semantische Konzepte. So konnte bei Patienten mit schwerer Aphasie (Sprachstörung, s. u.) nachgewiesen werden, dass sie noch über die Fähigkeit verfügen, kausale Zusammenhänge zu verstehen und sich in das Denken anderer (s. kognitive Empathie, Kap. 4.6) hineinzuversetzen (Varley/Siegal 2000).

Beim Sprachverstehen stehen wir vor der Aufgabe, Wortformen und deren strukturelle Eigenschaften mit semantischen Konzepten zu verknüpfen. Bei der Sprachproduktion müssen wir umgekehrt Konzepte in Wortformen mit adäquaten strukturellen Eigenschaften umsetzen. Die psycholinguistische Forschung interessiert, neben der Analyse der einzelnen Verarbeitungsebenen, in welcher Reihenfolge diese Prozesse ablaufen. Prinzipiell besteht die Möglichkeit, dass eine streng serielle Prozessabfolge vorliegt, dass sich die Prozesse teilweise überlappen oder dass sogar eine parallele Verarbeitung erfolgt.

Auf der Ebene der phonologischen Worterkennung gibt es zwei grundsätzliche Probleme, das Segmentierungs- und das Variabilitätsproblem. Die Mühelosigkeit,

**Konzepte und Wortformen**

**phonologische Worterkennung**



**Abb. 2.5.1:** Das phonologische Segmentierungsproblem, illustriert an einem Beispielsatz

**Tab. 2.5.1:** Sprachliche Einheiten

Phonem	Kleinste bedeutungsunterscheidende lautliche Spracheinheit.
Morphem	Kleinste bedeutungstragende Spracheinheit.
Lemma	Die strukturell-syntaktischen Merkmale eines Wortes.
Proposition	Kleinste Spracheinheit, deren Wahrheitswert man überprüfen kann.

mit der wir sprachliche Äußerungen in unserer Muttersprache als eine Abfolge von Wörtern erkennen, steht im Widerspruch zu der Schwierigkeit, objektive phonologische Wortgrenzen zu bestimmen. Eine akustische Analyse eines gesprochenen Satzes lässt keine Wortgrenzen erkennen (Abb. 2.5.1).

**Wortsegmentierung**

Die phonologische Wortsegmentierung hängt von unserem sprachlichen Vorwissen ab oder anders ausgedrückt von den phonologischen Wortformen, die uns zum Vergleich mit dem auditiven Reizangebot zur Verfügung stehen. Dieser Prozess muss sehr schnell sein. Allerdings stehen uns auch Segmentierungsstrategien zur Verfügung, die unabhängig von der individuellen Worterkennung sprachliche Regelmäßigkeiten nutzen. So beginnt die Wortsegmentierung im Englischen vorzugsweise mit Silben mit vollem Vokal (z. B. *woman*), während dies im Französischen nicht der Fall ist (Zwitserslood/Bölte 2002, 561). Interessanterweise werden Zweitsprachen wie die Muttersprache segmentiert, was darauf hinweist, dass die Segmentierungsstrategie in der frühen Sprachentwicklung erworben wird und später relativ invariant ist.

**Variabilitätsproblem**

Das Variabilitätsproblem bezeichnet den Umstand, dass ein und dasselbe Wort sehr unterschiedlich ausgesprochen werden kann, abhängig von der regionalen Herkunft des Sprechers, seinem Geschlecht, seinem aktuellen Gemütszustand und vielen weiteren Faktoren, wie etwa auch technischen Übertragungseinschränkungen (z. B. Telefon).

**Koartikulation**

Ein spezifisches Problem ist die Koartikulation: Die Artikulation eines Phonems wird durch das vorhergehende und auch das nachfolgende Phonem beeinflusst (Tab. 2.5.1).

Das Variabilitätsproblem besteht also darin, dass mehrere Ausprägungen eines Sprachsignals korrekt mit derselben lexikalischen Repräsentation verknüpft werden müssen. Andererseits müssen wir aber auch „minimale Paare“ unterscheiden können. Minimale Paare sind Äußerungen, die bis auf ein Phonem gleich sind, aber unterschiedliche Wortbedeutungen tragen (z. B. *laufen/raufen*).

**Phonem-diskrimination**

Das Beispiel macht deutlich, dass eine optimale Segmentierung die Trennung aller Phoneme einer Sprache ermöglicht, während sie Variabilität, die nicht zu einer Phonemunterscheidung führt, vernachlässigt. Dies scheinen wir auch tatsächlich in der Sprachentwicklung zu lernen. Neugeborene haben noch die Fähigkeit, Phoneme unterschiedlicher Sprachen zu differenzieren. Dagegen geht diese Differenzierungsfähigkeit in der späteren Entwicklung für Phoneme, die nicht der Muttersprache angehören, verloren (Goto 1971; Eimas 1975; Miyawaki et al. 1975; Werker/Tees 1984a, b).

Eine Studie mit finnischen und estischen Probanden belegt diesen Verlust ein-drucksvoll (Näätänen et al. 1997). Beiden Probandengruppen wurden die gleichen Sprachstimuli vorgespielt, dabei wurde die *mismatch-negativity* (MMN) untersucht. Dieses ereigniskorrelierte Potenzial tritt auf, wenn in einer Reihe gleicher Stimuli ein abweichender Reiz präsentiert wird. Es zeigte sich nun, dass physikalisch abweichende Reize nur dann eine MMN auslösten, wenn die Abweichung ein Phonem der jeweiligen Sprache war. In anderen Worten, die MMN trat bei demselben Reiz nur bei den finnischen oder den estischen Probanden auf, je nachdem, ob die Abweichung einen phonematischen Unterschied zu den Standardreizen in der jeweiligen Sprache darstellte oder nicht.

Diese Zusammenhänge sind auch von Bedeutung für das Erlernen von Fremdsprachen. Korrekte, akzentfreie Aussprache kann am besten in frühen Lebensjahren erlernt werden, bevor die Anpassung an die verwendete Phonemstruktur abgeschlossen ist. Allerdings wurde eine reduzierte Sensitivität für nicht genutzte Phonemunterschiede bereits nach dem ersten Lebensjahr beobachtet (Werker/Tees 1984a), so dass eine direkt nach der Geburt beginnende bilinguale Erziehung in dieser Hinsicht wohl optimal ist.

Es gibt neuronale Netzwerkmodelle, die versuchen, die Wortsegmentierung abzubilden. Eines dieser Modelle, das Trace-Modell (McClelland/Elman 1986), besteht aus drei Ebenen, in denen jeweils phonologische Merkmale, Phoneme und Wörter durch verteilte Aktivationsmuster in neuronalen Netzen repräsentiert werden. Die Aktivationsmuster entstehen in einem Lernprozess, in dem das Modell zunächst trainiert wird, Wörter zu unterscheiden. Dabei stehen die Knotenpunkte in einem Netz (als vereinfachtem Modell der neuronalen Konnektivität) über laterale Verbindungen mit den anderen Knoten der gleichen Ebene sowie über horizontale Verbindungen mit den über- bzw. untergeordneten Ebenen in Verbindung.



**Fremdsprachenerlernen**

**Segmentierungsmodelle**

## 2.5.2 Lesen

Das Lesen nimmt eine besondere Stellung ein, weil es sich sowohl phylogenetisch später entwickelt hat als die gesprochene Sprache als auch ontogenetisch, in der individuellen Entwicklung später, im Grundschulalter, erlernt wird.

Großen Anteil an unserem Verständnis der Leseprozesse haben neuropsychologische Untersuchungen von Lesestörungen in Patienten mit Hirnläsionen. Nach einem Vorschlag von Shallice und Warrington (1980) können zentrale und periphere Dyslexien unterschieden werden, je nachdem, ob zentrale Leseprozesse oder periphere Eingabe und Ausgabeprozesse gestört sind.

### Periphere Dyslexien

Die **reine Alexie** ist die bekannteste periphere Lesestörung. Mit **peripher** ist gemeint, dass diese Störung nicht zentrale sprachliche Prozesse betrifft, sondern die Wahrnehmung visuell präsentierter Wörter. Die Kernsymptomatik der reinen Alexie ist das *letter-by-letter-reading*. Die Patienten sind nicht in der Lage, Wörter



**reine Alexie**

als Ganzes zu lesen, sondern können Texte nur mühsam Buchstabe für Buchstabe lesen und bemühen sich dann, diese zu Wörtern und Sätzen zu verketteten. Das Lesen ist dementsprechend langsam und fehleranfällig. Die Fehlerzahl steigt mit der Wortlänge, was bei der geschilderten Symptomatik nicht verwunderlich ist. Die Lesefehler zeigen aber keine Abhängigkeit von semantischen oder linguistischen Wortmerkmalen. Weiterhin ist das auditive Wortverständnis der Patienten intakt. All dies sind also deutliche Indizien, dass es sich bei der reinen Alexie um eine isolierte Störung in der Analyse des visuellen Inputs handelt, bei intakter zentraler sprachlicher Verarbeitung.

## B

### Alexie mit Agraphie

Die funktionell-neuroanatomische Ursache der reinen Alexie ist recht gut bekannt. Der französische Neurologe Joseph Jules Déjerine beschrieb 1892 zwei Patienten. Einer der Patienten wies nach einer Läsion des linken Gyrus angularis eine kombinierte Lese- und Schreibstörung auf (Alexie mit Agraphie). Im Unterschied dazu zeigte der andere Patient eine isolierte Lesestörung, bei erhaltener Fähigkeit zu schreiben (Alexie ohne Agraphie). Letzterer Patient hatte Läsionen im linken Occipitallappen und im Splenium des Corpus callosum. Déjerine interpretierte seine Fallbeschreibungen dahingehend, dass der linke Gyrus angularis ein optisches Bild (heute würden wir wohl sagen, eine visuelle Repräsentation) der Schrift enthalte, auf die sowohl beim Lesen wie beim Schreiben zurückgegriffen werde. Nach einer Läsion des Gyrus angularis wären dementsprechend Lesen und Schreiben gestört.

### Alexie ohne Agraphie

Die Alexie ohne Agraphie hingegen interpretierte Déjerine als Diskonnektionsstörung, bei der die Faserverbindungen zwischen dem visuellen Cortex und dem Gyrus angularis unterbrochen sind und somit eine isolierte Lesestörung bedingen. Die Vorstellung Déjerines von der reinen Alexie als einem Diskonnektionssyndrom wurde in den 1960er Jahren von dem amerikanischen Neurologen Norman Geschwind wiederaufgegriffen (Geschwind 1965a, b) und in der Folge präzisiert. Heute wissen wir, dass verschiedene Schädigungen der weißen Substanz (also der Nervenfasern) im Bereich des linken Occipitallappens und/oder des Spleniums zu einer reinen Alexie führen können (Damasio/Damasio 1983; Binder/Mohr 1992).

### Diskonnektion

Läsionen, die den linken Occipitallappen betreffen, führen dabei entweder direkt zu einer Unterbrechung der visuellen Verarbeitung oder zu einer Unterbrechung der Reizweiterleitung. Greift die Läsion auf die Kommissurenfasern über, die die visuellen Areale der rechten Hemisphäre mit der linken Hemisphäre verbinden (insbesondere das Splenium), so ist die Diskonnektion der visuellen Areale von den weiter anterior gelegenen linkshemisphärischen Spracharealen komplett. (Im Prinzip könnte eine reine Alexie auch durch eine bilaterale Läsion visueller Areale entstehen, nur ist die Wahrscheinlichkeit glücklicherweise gering, zwei unabhängige Läsionen in homologen Arealen der linken und rechten Hemisphäre zu erleiden.)

### halbseitige reine Alexie

Die reine Alexie kann auch als halbseitige Lesestörung auftreten, wenn nur das Splenium von einer Läsion betroffen ist (Suzuki et al. 1998).

Überlegen Sie einmal zur Übung, in welcher Gesichtsfeldhälfte die Lesestörung dann auftritt (Berücksichtigen Sie dazu die Retinotopie der visuellen Areale, Kap. 1.3; Auflösung am Ende des Kapitels).

Die reine Alexie ist ein klassisches Beispiel für ein Diskonnektionssyndrom, an dem man sehr gut die Logik der Interpretation neuropsychologischer Patientenstudien nachvollziehen kann. Allerdings ist die bisherige Darstellung noch etwas zu schematisch. Die Diskonnektion zwischen visuellem System und sprachverarbeitenden Arealen kann nicht vollständig sein – schließlich können die Patienten ja i. d. R. noch Buchstaben lesen und diese, wenn auch mühsam, zu Wörtern zusammenfügen. Was ihnen allerdings fehlt, ist die Fähigkeit, Wörter als Ganzes zu erfassen.

Es war daher naheliegend, nach einem Hirnareal zu suchen, das den Zugriff auf ganzheitliche visuelle Wortformen ermöglicht. Nach den Läsionsstudien muss dieses Areal in der linken Hemisphäre liegen, da es sonst nach einer rechtshemisphärischen oder splenialen Läsion zu einer reinen Alexie in beiden Halbfeldern kommen müsste. Weiterhin suchen wir nach einem „höheren“ Areal in der visuellen Verarbeitungskette, das auf komplexere Reize reagiert als die frühen visuellen Areale, die primär auf visuelle Kanten bestimmter Vorzugsrichtungen reagieren (Kap. 1.1) und damit nur Merkmale einzelner Buchstaben repräsentieren können.

Tatsächlich haben bildgebende Untersuchungen wiederholt Aktivierungen im linken ventralen Occipitalcortex, genauer im Gyrus fusiformis, gefunden, die bei der passiven Betrachtung von Wörtern stärker ausfielen als bei der Präsentation zufälliger Buchstabenketten (Cohen et al. 2000). Eine Besonderheit dieses Areals ist, dass es von Wörtern im linken wie im rechten Halbfeld aktiviert wird, im Gegensatz zu anderen occipitalen Arealen, die nur durch contralaterale Wortpräsentation aktiviert werden. Die Aktivierung durch ipsi- wie contralaterale Wörter spricht dafür, dass der linke Gyrus fusiformis eine zentrale Funktion für die Wortverarbeitung ausfüllt, die nicht von einem homologen rechtshemisphärischen Areal übernommen werden kann. Diese Aktivierung ist von der physikalischen Form der Buchstaben (wie Groß- und Kleinschreibung) weitgehend unabhängig und kann selbst bei maskierter Präsentation hervorgerufen werden, die keine bewusste Wahrnehmung der Wörter zulässt. Andererseits kommt es in diesem Areal nicht zu einer Aktivierung durch gesprochene Wörter. Zusammengenommen ergeben diese Befunde recht starke Evidenz dafür, dass es sich bei diesem Areal im linken Gyrus fusiformis um das gesuchte visuelle Wortformareal (VWFA) handelt, welches spezifisch den automatischen Abruf visueller Wortformen ermöglicht (Cohen et al. 2000; McCandliss et al. 2003; Abb. 2.5.2).

Zu einer reinen Alexie kommt es demnach, wenn dieses Areal selbst durch eine Läsion zerstört wird oder wenn es durch die Zerstörung von Faserverbindungen von den vorgeschalteten visuellen Arealen der linken und/oder rechten Hemisphäre getrennt wird (Molko et al. 2002).

Es ist zunächst naheliegend anzunehmen, dass die Wortverarbeitung sequenziell abläuft, indem zunächst Buchstaben identifiziert werden und danach die Buchstaben zu Wörtern zusammengesetzt werden. Diese Vorstellung ist aber zu einfach. Zwar haben wir gesehen, dass Patienten mit einer reinen Alexie noch Buchstaben lesen können, auch gibt es visuelle Areale, die selektiv durch Buchstaben aktiviert werden (Gauthier et al. 2000; Polk et al. 2002; Puce et al. 1996). Im intakten Gehirn ist die Erkennung von Buchstaben aber erleichtert, wenn diese

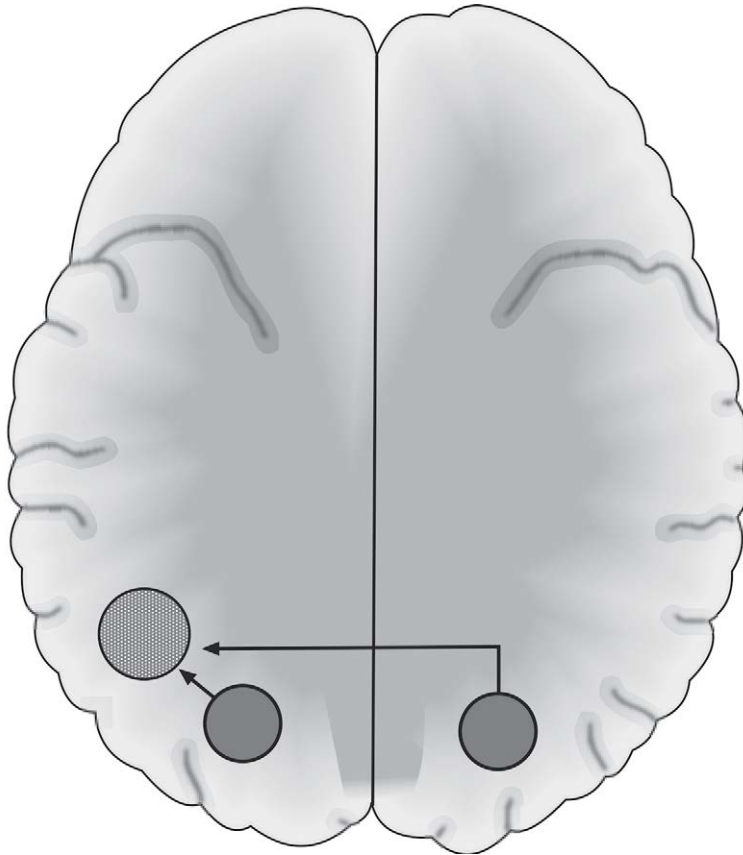
**visuelles Wortformareal (VWFA)**



**word superiority effect**

innerhalb eines Wortes präsentiert werden, im Vergleich zu Buchstaben aus einer Buchstabenkette, die ein nicht aussprechbares Nichtwort ergibt.

Dieser *word superiority effect* wurde beschrieben, wenn Probanden angeben sollten, welcher Buchstabe an einer bestimmten Position (z. B. dritter Buchstabe von links) einer kurzzeitig präsentierten und anschließend maskierten Buchstabenkette (Wort oder Nichtwort) präsentiert wurde (Reicher 1969). Die Buchstaben wurden auch besser entdeckt, wenn aussprechbare mit nicht aussprechbaren Nichtwörtern verglichen wurden (Carr et al. 1978). Beide Befunde sprechen dafür,



**Abb. 2.5.2:** Das visuelle Wortformareal (VWFA). Schematische Darstellung der Bahnen, über die visuelle Reize (geschriebene Sprache) aus der linken und rechten Gesichtsfeldhälfte das VWFA erreichen. Die dunkelgrauen Kreise stehen für frühe visuelle Verarbeitungsareale (Kantendetektion in V1 etc., s. Kap. 1.1). Der hellgraue Kreis steht für das linkshemisphärische visuelle Wortformareal. Schrift aus der rechten Gesichtsfeldhälfte erreicht das VWFA über die vorgeschalteten linkshemisphärischen visuellen Areale (Kap. 1.3). Schrift aus der linken Gesichtsfeldhälfte wird zunächst im rechten visuellen Cortex verarbeitet und muss über das Splenium des Corpus callosum kreuzen, um das VWFA zu erreichen.

dass beim Lesen Bottom-up- und Top-down-Prozesse zwischen den Ebenen der Buchstaben- und Wortverarbeitung miteinander interagieren, ähnlich, wie dies auch für nonverbale visuelle Verarbeitung gefunden wurde (Kap. 1.2).

## Zentrale Dyslexien

**Zentrale Dyslexien** sind Lesestörungen, denen im Gegensatz zu peripheren Dyslexien – als deren Hauptvertreter wir die reine Alexie kennengelernt haben – zentrale Prozesse der Transformation des orthographischen Inputs in die phonologische und semantische Wortrepräsentation zugrunde liegen.

Die frühen neurologischen Modelle der Dyslexie hatten es sich zum Ziel gesetzt, ein funktionell-neuroanatomisches Bild des Lesens (und Schreibens) zu erstellen. Eine andere Betrachtungsweise der Dyslexien versucht von der Art der Lesefehler auf zugrundeliegende prozessuale Störungen zu schließen.

Marshall und Newcombe (1966; 1973) beschrieben auffällige systematische Unterschiede in der Art der Lesefehler, die sie bei ihren Dyslexie-Patienten beobachteten. Beim Lesen einzelner Wörter traten in einem Patienten (J. C.) vor allem Paralexien (Fehlbenennungen) auf, die auf phonologischen oder visuellen Verwechslungen beruhten. Ein anderer Patient (G. B.) hingegen produzierte semantische Paralexien, d. h. Wörter, die mit dem zu lesenden Wort semantisch verwandt waren. Weiterhin hatte er auffällige Schwierigkeiten im Lesen bedeutungsleerer, wenn auch aussprechbarer Buchstabenfolgen (sogenannte Nichtwörter wie „Gupo“).

Marshall und Newcombe interpretierten diese Fehlermuster als Ausdruck einer Störung der oberflächlichen orthographisch-phonologischen Verarbeitung bei J. C., im Gegensatz zu einer Störung tieferer semantischer Verarbeitungsschritte bei G. B. Dies führte zu den Begriffen Oberflächen- und Tiefendyslexie (*surface dyslexia*, *deep dyslexia*). Diese Interpretation ging über die Vorstellung hinaus, Lesen könne als einfacher Graphem-Phonem-Konversionsprozess verstanden werden.

Kognitive Modelle des Lesens fallen in zwei grobe Kategorien: Dual-Route- und Single-Route-Modelle. Am weitesten verbreitet sind die Dual-Route-Modelle (Coltheart et al. 2001). Die Grundannahme dieser Modelle ist, dass es zwei grundlegend verschiedene Wege von der Wahrnehmung des geschriebenen Wortes bis zum Wortverständnis gibt (Abb. 2.5.3).

Ein Weg, der lexikalische, führt von einem orthographischen Eingabelexikon (der VWFA), in dem Repräsentationen aller (dem Individuum bekannten) geschriebenen Worte enthalten sind, über eindeutige Verbindungen zu einem semantischen System sowie, unabhängig von dem semantischen Pfad, zu einem phonologischen Ausgabelexikon. Damit kann die phonologische Form eines Wortes direkt von seiner orthographischen Form „adressiert“ werden. Dual-Route-Modelle nehmen oft jedoch noch einen weiteren, eigentlich dritten, Weg an, nämlich vom orthographischen Eingabelexikon über das semantische System zum phonologischen Ausgabelexikon.

Neben dem lexikalischen Weg postulieren Dual-Route-Modelle einen zweiten Weg über einen vom jeweils gelesenen Wort unabhängigen, allgemeinen Mechanismus der Graphem-Phonem-Konversion. Mit Hilfe dieses Weges können



**kognitive Dyslexie-Modelle**

**Oberflächen- und Tiefendyslexie**

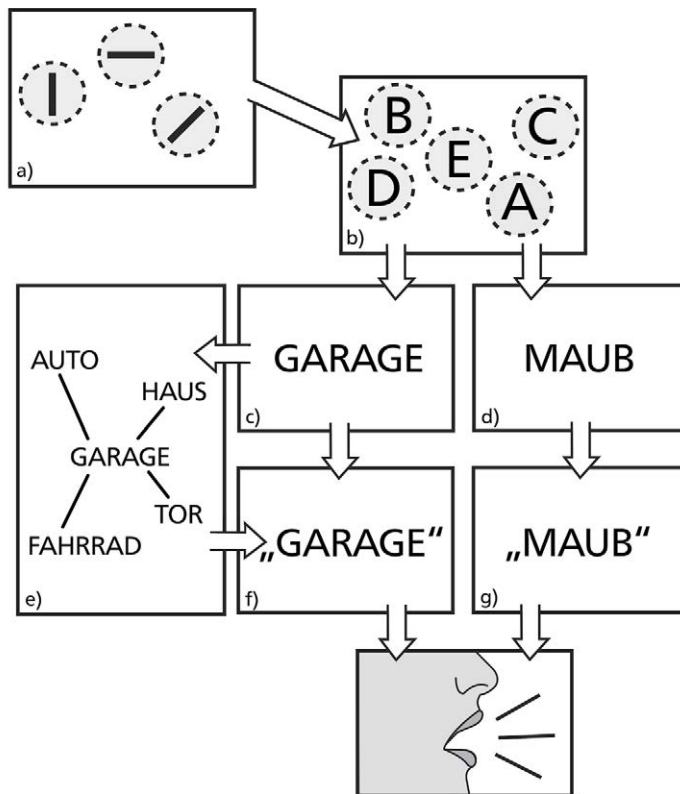
**Dual-Route-Modelle**

**lexikalische Route**

**nichtlexikalische Route**

reguläre, d.h. den Standardregeln der Aussprache gehorchende Wörter (Haus, Baum) sowie auch unbekannte Wörter oder aussprechbare Nichtwörter (Homd) gelesen werden. Irreguläre Wörter (Garage, Spaghetti) können jedoch nur über den lexikalischen Weg korrekt ausgesprochen werden. Das Dual-Route-Modell entstand u. a. als Erklärungsversuch für die unterschiedlichen Fehlermuster, die in zentralen Dyslexien gefunden wurden.

**Tiefendyslexie:** Zu den zentralen Dyslexien gehört die Tiefendyslexie (*deep dyslexia*). Patienten mit einer Tiefendyslexie haben schwere Störungen im Lesen von Nichtwörtern und zeigen beim Lesen von Wörtern charakteristische Fehler:



**Abb. 2.5.3:** Dual-Route-Modell des Lesens. Nach anfänglicher visueller Vorverarbeitung, etwa von Kanten (a) oder ganzen Buchstaben (b) können bekannte Wörter im orthographischen Eingabelexikon (c) Einträge ganzer Wörter aktivieren, die dann direkt, oder über den semantischen Eintrag im Langzeitgedächtnis (e) die Aussprache im phonologischen Ausgabelexikon (f) aktivieren. Dieser lexikalische Weg ist insbesondere für unregelmäßig ausgesprochene Wörter essentiell. Unbekannte Wörter (und Kunstwörter, (d)), für die es keinen Eintrag in (c) gibt, können über Graphem-Phonem-Konversion (g) ausgesprochen werden.

- Semantische Fehler: Semantisch assoziierte Wörter werden genannt.
- Visuelle Fehler: Visuell ähnliche Wörter werden produziert.
- Visuelle und semantische Fehler können auch gemeinsam auftreten.
- Ableitungsfehler: morphologisch ähnliche Wörter, falsche Verbformen.

Konkrete Wörter werden besser als abstrakte gelesen, Substantive besser als Adjektive, Adjektive besser als Verben und Funktionswörter (und, auch für etc.).

Die Tiefendyslexie ist meist mit großen linkshemisphärischen Läsionen verbunden, die zu einer Störung der nichtlexikalischen (Nichtwörter) und lexikalisch-semantischen (semantische Fehler) Lesepfade führen. Die Tiefendyslexie geht im Allgemeinen mit einer nichtflüssigen Aphasie (s. Kap. 2.6) einher. Semantische Fehler treten nur auf, wenn der nichtlexikalische Lesepfad (Graphem-Phonem-Konversion) nachhaltig gestört ist. Sie treten auch eher in Sprachen mit „tiefer“ Orthographie (d. h. vielen unregelmäßig ausgesprochenen Wörtern) auf, wie Englisch, dagegen selten in Sprachen mit überwiegend regelmäßiger Aussprache, wie Italienisch, Spanisch, Serbokroatisch oder Deutsch.

**Direkte Dyslexie:** Von einer direkten Dyslexie spricht man bei Patienten, die sowohl reguläre wie irreguläre Wörter korrekt lesen können, aber ihre Bedeutung nicht verstehen. Über Graphem-Phonem-Konversion können zwar reguläre, aber keine irregulären Wörter gelesen werden. Daher spricht die direkte Dyslexie für die Existenz eines direkten lexikalischen Pfades von der Orthographie zur Phonologie, ohne den Umweg über die Semantik, die bei diesen Patienten ja gestört ist.

**Phonologische Dyslexie:** Das Merkmal der phonologischen Dyslexie ist eine Beeinträchtigung des Lesens von Nichtwörtern, bei erhaltenem Lesen von Wörtern. Als Ursache wird daher eine Störung des nichtlexikalischen Pfades angenommen. Die Fähigkeit zum Wortlesen kann individuell stark variieren. Das Lesen von Nichtwörtern wird durch ihre graphemische Komplexität und ihre Homophonie zu realen Wörtern beeinflusst.

**Graphemische Komplexität** bedeutet, dass ein Phonem durch eine längere Kette von Buchstaben repräsentiert wird. **Homophonie** liegt vor, wenn ein Nichtwort wie ein reales Wort ausgesprochen wird.



**Oberflächendyslexie:** Eine Oberflächendyslexie ist charakterisiert durch Folgendes:

- Intaktes Lesen einzelner Buchstaben.
- Das Lesen regulärer Wörter und Nichtwörter ist deutlich besser als das Lesen irregulärer Wörter.
- Irreguläre Wörter werden wie reguläre Wörter ausgesprochen.
- Nicht homographische Homophone werden verwechselt.

Die Oberflächendyslexie ist im Allgemeinen mit einer flüssigen Aphasie und einer lexikalischen Agraphie assoziiert. Insbesondere die Regularisierungsfehler werden als symptomatisch für die Oberflächendyslexie angesehen. Sie werden dahin-

## Single-Route-Modelle

gehend interpretiert, dass die Patienten auf die nichtlexikalische Graphem-Phonem-Konversion angewiesen sind. Oberflächendyslexien werden besonders in Sprachen mit tiefer Orthographie beobachtet.

Trotz der dominanten Stellung der Dual-Route-Modelle soll nicht verschwiegen werden, dass es auch Modelle gibt, die ohne die Aufteilung in einen lexikalischen und einen nichtlexikalischen Pfad auskommen. Schon vor dem Dual-Route-Modell von Coltheart und Kollegen (2001) hatten Plaut und Kollegen (1996) ein solches Single-Route-Modell vorgestellt. Es besteht aus einer neuronalen Netzwerkarchitektur mit drei Ebenen. Eine Ebene enthält „Phonem-Knoten“, eine weitere „Graphem-Knoten“. Zwischen beiden ist eine weitere, vermittelnde, Ebene mit versteckten Knoten (*hidden layer*) angesiedelt, die mit allen Knoten der Phonem- und Graphem-Ebene verknüpft sind. Zunächst muss das Netzwerk lernen, dem graphemischen Input den korrekten phonematischen Output zuzuordnen. Dies geschieht über *back-propagation*, eine Rückmeldungstechnik, bei der der aktuelle System-Output mit dem gewünschten Output verglichen wird. Bei Abweichungen werden die Gewichte der Knoten im *hidden layer* in vielen Lerndurchgängen so lange verändert, bis der gewünschte Output erreicht ist. Die Information über die korrekte Graphem-Phonem-Konversion ist dann als verteiltes Muster in den Gewichtungen aller Knoten des *hidden layer* gespeichert.

Plaut und Kollegen trainierten das Netzwerk mit annähernd 300 Wörtern. Sie nahmen an, dass diese Form des Lernens dem natürlichen Spracherwerb ähnelte und insbesondere zwei Aspekte realisierte: Zum einen basiert die Aussprache eines Wortes (oder auch eines Nichtwortes) stark auf der Aussprache ähnlicher Wörter, und zum anderen beeinflussen häufige Wörter die Aussprache mehr als seltene Wörter. Nach der Lernphase simulierte das Netzwerk einige Eigenschaften menschlicher Leser. Unregelmäßige, genauso wie seltene Wörter benötigten mehr Zeit, um korrekt „ausgesprochen“ zu werden. Dabei fiel unregelmäßige Aussprache bei seltenen Wörtern mehr ins Gewicht als bei häufigen Wörtern. Das Netzwerk konnte darüber hinaus auch in etwa 90 % der angebotenen Nichtwörter den korrekten Phonemen zuordnen, vergleichbar mit der Leistung menschlicher Probanden. Varianten des Modells konnten die Hauptsymptome der Oberflächen- und Tiefendyslexie simulieren.

In der Abwägung ist das Dual-Route-Modell in seinen Vorhersagen präziser als das Single-Route-Modell. Das Single-Route-Modell kommt dagegen mit nur sehr wenigen Annahmen aus. Zwei bedeutende Einschränkungen sind jedoch, dass nur einsilbige Wörter simuliert wurden und dass die Grapheme, die den Input in das Modell darstellen, bereits vorstrukturiert sein müssen (Eysenck/Keane 2005, 336).



## Fragen zu Kapitel 2.5

### Überprüfen Sie Ihr Wissen!

111. Wie sind Wortformen und semantische Konzepte repräsentiert?
112. Was ist das phonologische Segmentierungsproblem? Was das Variabilitätsproblem?

113. Was ist der Unterschied zwischen einem Phonem und einem Morphem?
114. Warum können wir die Phoneme einer Fremdsprache nicht so gut unterscheiden wie die unserer Muttersprache? Was folgt daraus für das Sprachenlernen?
115. Woran erkennt man eine reine Alexie?
116. Welche Eigenschaften definieren das visuelle Wortformareal?
117. Durch welche Läsionen kann eine reine Hemialexie im a) linken und b) rechten visuellen Halbfeld entstehen?
118. Was ist der *word superiority effect*, wie wird er geprüft?
119. Nennen Sie die Symptome, die für eine Störung der a) lexikalischen und b) nicht-lexikalischen Route sprechen.
120. Was sind die Symptome einer direkten Dyslexie, was kann man daraus über die Lesepfade schließen?

Auflösung der Frage von S. 144: Nach einer isolierten Schädigung des Spleniums wurde eine Hemialexie in der linken Gesichtsfeldhälfte beobachtet.

## 2.6 Sprache II

### 2.6.1 Satzverständnis

Im letzten Kapitel haben wir uns mit den Prozessen beschäftigt, die ein Verständnis einzelner Wörter ermöglichen. Meistens verwenden wir Wörter jedoch in größeren Zusammenhängen, in Sätzen oder längeren Texten. Um einen bestimmten Bedeutungszusammenhang in einem Satz auszudrücken, kommt es nicht nur darauf an, geeignete Wörter zu verwenden, sondern auch darauf, diese in einer bestimmten Weise miteinander zu verbinden. Dabei können Änderungen in der Wortreihenfolge, der Wortendungen usw. zu einem veränderten Sinnzusammenhang führen.

Weiterhin hat jede Sprache gewisse grammatische Regeln, die korrekte und inkorrekte Sätze unterscheiden. Diese Regeln können von Sprache zu Sprache sehr unterschiedlich sein. So werden im Deutschen Zusammenhänge häufig über Wortendungen signalisiert, die im Englischen über die Wortreihenfolge indiziert werden. Während im Englischen wie im Deutschen das Tempus über entsprechende Verbformen signalisiert wird, wird es im Chinesischen nur über Begriffe wie „Heute“, „Gestern“ etc. angezeigt. Inwieweit sind diese unterschiedlichen Grammatiken auf eine gemeinsame Grundlage zurückführbar? Sind die Unterschiede in den Grammatiken verschiedener Sprachen nur oberflächliche Unterschiede, die sich zumindest im Kern auf eine gemeinsame Tiefenstruktur abbilden lassen (Chomsky 1965)?

**Grammatik**

Wir sind aus der Mathematik oder den Naturwissenschaften gewöhnt, dass Regeln allgemeingültigen Charakter haben. In der Sprache ist es aber häufig so, dass Regeln an bestimmte Wörter gebunden sind. Im Wörterbuch können wir nicht nur die Bedeutung eines Wortes nachschlagen, sondern auch bestimmte strukturelle Merkmale, z. B. ob das Wort transitiv oder intransitiv verwendet wird. Moderne linguistische Grammatiken bedienen sich häufig dieses Prinzips, indem sie viele Regeln mit dem jeweiligen Eintrag im mentalen Lexikon verbinden und nur noch wenige allgemeingültige Regeln vorsehen. Man spricht dann von lexikalisierten Grammatiken.

**lexikalisierte Grammatik**

**Parsing**

Wie wird nun die Bedeutung eines Satzes erschlossen? Unabhängig davon, ob wir den Satz hören oder lesen, verfügen wir zunächst über die Informationen, die der Satzanfang verfügbar macht. Diese Informationen werden dann mit jedem weiteren gelesenen oder gehörten Wort erweitert. Es gibt jedoch unterschiedliche Modelle für das Parsing (damit ist die syntaktische Analyse des Satzes gemeint) eines Satzes, die davon ausgehen, dass entweder die Wörter eines Satzes ihrer Reihenfolge nach zur Satzanalyse herangezogen werden oder dass bestimmte zentrale Bestandteile des Satzes die Analyse bestimmen.

**Garden-Path-Modell**

Ein einflussreiches Modell wurde von Frazier und Rayner (1982) Garden-Path-Modell genannt. Die Bezeichnung rührt von dem Ausdruck *to send someone up the garden path* (jemanden auf den Holzweg schicken) und bezieht sich darauf, dass Sätze nicht immer eindeutig sind und daher manchmal zunächst falsch verstanden werden. Diese „Garden-Path“-Sätze wurden genutzt, um die Satzanalyse zu untersuchen. Frazier und Rayner postulierten, dass bei Ambiguität zunächst eine Alternative ausgewählt werde. Die Auswahl erfolgt nach syntaktischen Aspekten, Bedeutung spielt für die initiale Auswahl keine Rolle. Die syntaktische Auswahl stützt sich dabei auf zwei Prinzipien, *minimal attachment* und *late closure*, die zunächst zur Auswahl der einfachsten syntaktischen Struktur führen.

**minimal attachment**

*Minimal attachment* besagt, dass die einfachste syntaktische Struktur ausgewählt wird. Rayner und Pollatsek (1989) führen als Beispiel die Sätze „The girl knew the answer by heart“ und „The girl knew the answer was wrong“ an. Das *minimal attachment*-Prinzip führt dazu, dass „the answer“ als direktes Objekt des Verbs „knew“ aufgefasst wird. Dies ist jedoch nur im ersten Satz richtig und führt im zweiten Satz auf den „Holzweg“.

**late closure**

*Late closure* meint, dass während des Parsings neue Wörter so lange wie möglich an die bestehende Struktur angehängt werden. Ein Beispielsatz, wieder von Rayner und Pollatsek (1989), lautet „Since Jay always jogs a mile seems like a short distance“. *Late closure* führt dazu, dass „a mile“ zunächst der ersten Phrase angehängt wird, anstatt an den Beginn der zweiten Phrase. Erst nach Abschluss der syntaktischen Analyse folgt eine Bewertung nach semantischen und pragmatischen Kriterien, die gegebenenfalls eine neue syntaktische Analyse nötig macht.

Die Garden-Path-Theorie wurde von vielen Studien bestätigt, darunter sowohl Reaktionszeit- wie auch Blickbewegungsstudien (Breedin/Saffran 1999; Frazier/Rayner 1982; Osterhout/Nicol 1999). Es wurde allerdings auch gefunden, dass Parsing-Strategien ebenso von weiteren Faktoren wie dem Kontext (Tanenhaus et al. 1995), der Intonation (Spivey et al. 2002) oder der Interpunktion (bei geschriebener Sprache) und der Prosodie abhängen. Die Allgemeingültigkeit der Prinzipien von *minimal attachment* und *late closure* wurde in einer Weiterentwicklung der Garden-Path-Theorie eingeschränkt (Frazier/Clifton 1996).

Alternative Parsing-Modelle störten sich insbesondere an dem Postulat, dass semantische Bedeutung zunächst nicht zur Satzanalyse herangezogen werden sollte. Als Alternative wurde die *constraint-based theory* (MacDonald et al. 1994) vorgeschlagen. Ihr Kern ist die Annahme, dass alle verfügbaren Informationen sofort verwertet werden. Einige Arbeiten stützten diese Annahme, so wurde etwa eine Tendenz gefunden, Verben zunächst so zu verwenden, wie sie am häufigsten eingesetzt werden (z. B. mit direktem Objekt; Garnsey et al. 1997). Allerdings be-



einflussten die nichtsyntaktischen Randbedingungen die Satzanalyse manchmal erst später als erwartet (Boland/Blodgett 2001).

Parsing-Modelle wie die Garden-Path-Theorie gehen davon aus, dass wir ein komplettes und detailliertes Verständnis von Sätzen generieren. Das scheint aber nicht immer der Fall zu sein. **Heuristiken**

Beantworten Sie folgende Frage: Wie viele Tiere von jeder Art ließ Moses auf die Arche? Wenn Sie gerade „zwei“ gedacht haben, denken Sie noch einmal darüber nach, die richtige Antwort ist natürlich „keine“.

Diese „Moses-Illusion“ (Erickson/Mattson 1981) ist nur ein Beispiel dafür, dass wir häufig Heuristiken anstelle von vollständigen Analysen nutzen, um den Sinn sprachlicher Äußerungen zu erschließen (Ferreira et al. 2002).

Diese Beispiele zeigen, dass die Verwendung von Heuristiken das Potenzial für fehlerhafte Kommunikation beinhaltet. Dagegen haben Heuristiken den Vorteil, dass sie in der Mehrzahl der Fälle mit geringem Verarbeitungsaufwand zum richtigen Ergebnis führen.

## 2.6.2 Neuronale Korrelate der Sprache

Wir haben gesehen, dass die Garden-Path-Theorie davon ausgeht, dass zunächst eine syntaktische Analyse stattfindet, die erst anschließend von einer semantischen Analyse gefolgt wird. Solche Annahmen sind mit Verhaltensmaßen wie der Reaktionszeit allein nur schwer zu prüfen, weil die Reaktionszeit immer nur das Endprodukt vieler möglicher Prozesse darstellt. Um Fragen nach der Abfolge sprachlicher Prozesse zu untersuchen, werden daher auch ereigniskorrelierte Hirnpotenziale (EKPs) herangezogen. Insofern als EKPs den Aktivierungsverlauf in bestimmten neuronalen Ensembles reflektieren, erlauben sie im günstigsten Fall, den Zeitverlauf kognitiver Teilprozesse zu analysieren.

**ereigniskorrelierte Potenziale (EKPs)**

Eine der bedeutendsten EKPs in der psycholinguistischen Forschung ist die N400 – eine negative Potenzialänderung, die etwa 400 ms nach Präsentation des auslösenden Ereignisses eintritt. Die N400 wird durch Probleme der semantischen Integration hervorgerufen. **N400**

Eine typische experimentelle Bedingung, mit der eine N400 hervorgerufen werden kann, ist eine Satzvervollständigung mit einem semantisch unpassenden Wort. Der Satz „Das Gewitter wurde gebügelt“ erzeugt im Hörer eine höhere N400 als der semantisch unauffällige Vergleichsatz „Das Hemd wurde gebügelt“ (Abb. 2.6.1; dieses und folgende Beispiele nach Friederici 2002). Die Mittelung der EKPs beginnt in diesen Untersuchungen immer mit dem Beginn des kritischen Wortes, im Beispiel also „gebügelt“, so dass Unterschiede zu Beginn des Satzes „Das Gewitter ...“ im Vergleich zu „Das Hemd ...“ nicht in die Mittelung eingehen sollten. Der Satz „Das Gewitter wurde gebügelt“ ist natürlich eine unsinnige Aussage, enthält aber keine syntaktische Verletzung.



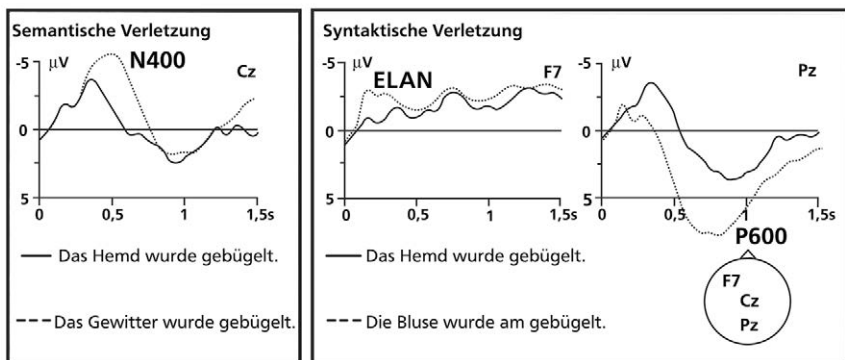
Wie verhält es sich nun mit syntaktisch inkorrekten Sätzen, wie „Die Bluse wurde am gebügelt“? Solche syntaktischen Verletzungen rufen eine Reihe von **Verletzungen der Syntax**

EKP-Änderungen hervor, die zu unterschiedlichen Zeiten ihr Maximum über verschiedenen Ableitelektroden haben. Die früheste Potenzialänderung tritt bereits nach gut 100 ms über linksfrontalen Ableitorten auf. Aufgrund ihrer zeitlichen und räumlichen Charakteristika wird sie *early left anterior negativity* (ELAN) genannt. Im Beispiel wird sie gefolgt von einer späteren EKP, die nach etwa 600 ms über zentral-parietalen Elektroden ihre maximale Auslenkung erreicht (P600). Während die ELAN insbesondere durch Wortkategoriefehler hervorgerufen wird, so tritt die P600 nach syntaktischen Verletzungen in komplexen Sätzen auf.

Zumindest die Abfolge von ELAN und N400 könnte als Beleg dafür angesehen werden, dass die syntaktische Verarbeitung der semantischen vorangeht. Aufgrund der Latenzen dieser EKPs allein kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass syntaktische und semantische Verarbeitung simultan beginnen und unabhängig voneinander verlaufen. Das spätere Maximum der N400 könnte dann einfach darauf zurückzuführen sein, dass die semantische Verarbeitung länger anhält.

Um die Frage einer seriellen Verarbeitung von Syntax und Semantik zu untersuchen, wurden Sätze mit einer syntaktischen Verletzung mit Sätzen kontrastiert, die sowohl eine syntaktische als auch eine semantische Verletzung enthielten („Das Gewitter wurde im gebügelt“; Friederici 2002). In beiden Fällen trat eine ELAN auf. Die Sätze mit kombinierter syntaktischer und semantischer Verletzung riefen aber keine N400 hervor. Die Ergebnisse sprachen also dafür, dass nach der Detektion der syntaktischen Verletzung keine weitere semantische Verarbeitung stattfand.

Weitere Untersuchungen zeigten jedoch auch, dass es kein generelles Primat der syntaktischen vor der semantischen Verarbeitung gab. In einer Studie von Gunter und Kollegen (2000) wurden Sätze präsentiert, in denen morphosyntaktische Verletzungen, wie „Sie bereist den Land ...“ auftreten konnten. Unabhängig davon wurde das Auftreten der N400 variiert. Die N400 wurde durch Sätze wie „Sie befährt das Land mit einem alten Wartburg“ hervorgerufen. Der Satzanfang „Sie befährt das Land ...“ ist sowohl syntaktisch wie semantisch korrekt. Dagegen ist die Wahrscheinlichkeit, dass nach „Sie befährt ...“ das Wort „Land“ kommt, sehr viel geringer als nach „Sie bereist ...“. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens



Schematische Darstellung nach Friederici, 2002

**Abb. 2.6.1:** EKP-Änderungen auf verschiedene Typen sprachlicher Verletzungen (nach Friederici 2002)

eines Wortes wird als *cloze value* bezeichnet. Wörter mit einem niedrigen *cloze value* rufen eine höhere N400 hervor.

Morphosyntaktische Verletzungen führten zu einer linksfrontalen Negativität (LAN), mit einem Maximum nach etwa 400 ms, und einer etwa zeitgleichen N400 an zentralen Ableitelektroden. Die noch spätere P600 wurde sowohl durch die syntaktische wie die semantische Variation beeinflusst. Diese Ergebnisse führten zu einem Drei-Stufen-Modell der Sprachverarbeitung, in dem Wortkategoriefehler früh detektiert werden und die weitere (semantische) Verarbeitung unterbrechen. In einer zweiten Phase hingegen werden Syntax und Semantik parallel verarbeitet. In Phase drei schließlich interagieren syntaktische und semantische Verarbeitung.

Ein Zusammenhang zwischen Hirnfunktion und Sprachprozessen wurde bereits in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts hergestellt, als zunächst Paul Broca (1861) einen Patienten vorstellte, der nur unter Schwierigkeit einzelne Wörter aussprechen konnte. Nach seinem Tod wurde eine Läsion des linken inferioren Frontalcortex gefunden. Wenig später, im Jahr 1874, veröffentlichte Carl Wernicke eine einflussreiche Studie (Reprint 1974), in der er Läsionen im posterioren superioren Temporalcortex mit Sprachverständnisstörungen assoziierte.

Aus diesen Arbeiten entwickelte sich die Vorstellung eines motorischen (Broca) und eines sensorischen (Wernicke) Sprachzentrums, deren Läsion jeweils zu einer nichtflüssigen (Broca) bzw. flüssigen (Wernicke) Aphasie führte. Damit ist gemeint, dass das charakteristische Merkmal der Broca-Aphasie die geringe Wortproduktion ist, während Patienten mit einer Wernicke-Aphasie flüssige Sätze normaler Länge bilden können, die aber sinnleer sind. Eine dritte klassische Aphasieform ist die Überleitungsaphasie, bei der sowohl Sprachverständnis wie Sprachproduktion relativ gut erhalten sind, die Fähigkeit zur Wiederholung jedoch stark defizitär ist. Diese Form wurde einer Zerstörung der Faserverbindungen zwischen Broca- und Wernicke-Areal zugeschrieben. Spätere Studien haben jedoch gezeigt, dass dieses Bild zu schematisch ist. So gehen schwere Formen der Broca-Aphasie oft mit zusätzlichen Basalganglienläsionen einher. Das Bild der Überleitungsaphasie wurde auch nach Läsionen gefunden, die die Nervenfasern zwischen Broca- und Wernicke-Areal nicht berührten.

Kognitiv-neuropsychologische Experimente zeigten, dass auch die Vorstellung einer selektiven Störung der Sprachproduktion (motorische Aphasie) zu einfach ist. So legten Caramazza und Zurif (1976) Broca-Aphasikern Sätze der folgenden Art vor:

1. The apple that the boy is eating is red.
2. The horse that the bear is kicking is brown.
3. The man that the horse is riding is fat.

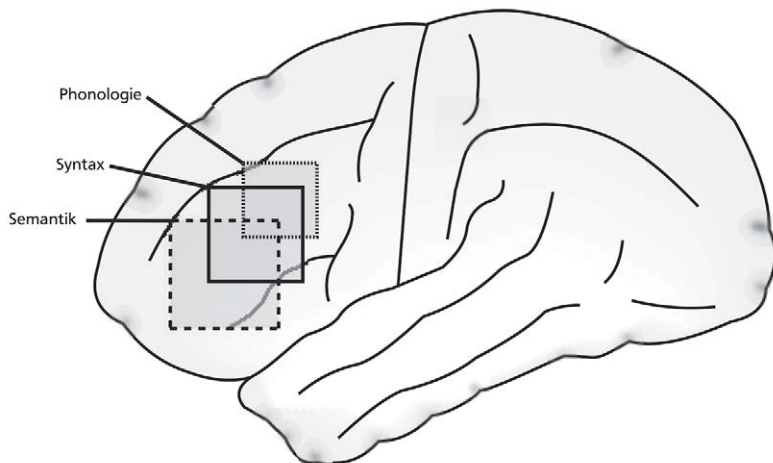
Die Sätze unterscheiden sich dahingehend, dass beim ersten Satz Syntax und Semantik übereinstimmend zur Analyse der Satzbedeutung herangezogen werden können. Beim zweiten Typ gibt nur die Syntax Auskunft über Subjekt und Objekt. Sätze der dritten Art schließlich enthalten einen Widerspruch zwischen Syntax und Semantik. Die untersuchten Broca-Aphasiker fanden die korrekte Satzbedeutung nur bei Sätzen des Typs 1 problemlos, während ihre Analyse bei Sätzen des Typs 2 auf Zufallsniveau lag und sie bei Sätzen des Typs 3 gar fast immer der Se-

**Drei-Stufen-Modell****Broca-Aphasie****Wernicke-Aphasie****Broca- u. Wernicke-Aphasie**

mantik, und damit der inkorrekten Alternative, folgten. Damit war gezeigt, dass Broca-Aphasiker nicht nur in der Sprachproduktion, sondern auch im Sprachverständnis ein syntaktisches Defizit aufweisen.

Die Differenzierung der neuronalen Korrelate ist mit der Einführung bildgebender Verfahren vorangeschritten. Eine Metaanalyse bildgebender Studien hat zu der Vorstellung geführt, dass es innerhalb des linken inferioren Präfrontalcortex einen posterior-anterioren Gradienten von phonologischer (BA44, BA6), syntaktischer (BA45, BA44) und semantischer (BA47, BA45) Verarbeitung gibt. Dabei überlappen sich die einzelnen Verarbeitungsareale allerdings deutlich (Bookheimer 2002; Abb. 2.6.2). Auch im Temporallappen wurden Differenzierungen innerhalb der durch Sprache aktivierten Areale gefunden. Phonologische/phonetische Analysen gehen mit erhöhter Aktivierung im posterioren Anteil des Gyrus temporalis superior und entlang des benachbarten Sulcus temporalis superior einher. Semantische Analyseprozesse involvieren u. a. Teile des linken Gyrus temporalis medius und inferior (Hagoort 2005).

Es gibt bisher noch keine allgemein anerkannte funktionell-neuroanatomische Theorie der Sprache. Allerdings gibt es Übereinstimmungen zwischen den vorhandenen Modellen (Friederici 2002; Hagoort 2005), bezüglich der Rolle der beiden hauptsächlich an der Sprachverarbeitung beteiligten Areale, dem inferioren Frontalcortex und dem Temporalcortex, insbesondere der linken Hemisphäre. Dem Temporalcortex wird eine Funktion bei der Identifikation sprachlicher Einheiten und, verbunden damit, der Interaktion mit dem Langzeitgedächtnis zugeschrieben. Dem inferioren Frontalcortex kommt dagegen eine Rolle bei der Integration sprachlicher Einheiten zu. Diese Integration ist in den drei zentralen Bereichen sprachlicher Analyse nötig. Auf der phonologischen Ebene werden Sätze durch die Intonationskontur charakterisiert, z. B. steigende Intonation bei Fragen. Auf der syntaktischen Ebene ist der Bedarf an Integration lexikalischer Einheiten zu einem Satzgefüge vielleicht



**Abb. 2.6.2:** Aktivierung des linken Frontalcortex durch phonologische, syntaktische und semantische Anforderungen (nach Bookheimer 2002, bearbeitet)

am augenfälligsten und am besten untersucht (s. o.). Aber auch in der semantischen Analyse treten oft Ambiguitäten auf, die erst durch Integration mit vorgehenden Sätzen, dem sprachlichen Kontext, aufgelöst werden können.

Ein Experiment mit künstlichen Grammatiken hat gezeigt, dass ein Teil des linken inferioren Frontalcortex (Brodmann-Areal 44) selektiv aktiviert wurde, wenn die Probanden Phrasenstrukturgrammatiken lernten, im Gegensatz zu einfacheren *finite state*-Grammatiken (Friederici et al. 2006). Die Probanden hatten Abfolgen wie „de bo gi to“ daraufhin zu beurteilen, ob sie korrekte Sätze einer Grammatik waren. Die grammatischen Regeln mussten durch Versuch und Irrtum herausgefunden werden. Die „Sätze“ hatten natürlich keine semantische Bedeutung, außerdem wurden für beide Grammatiken die gleichen Sequenzen verwendet. Die Grammatiken unterschieden sich hinsichtlich der Komplexität der Regeln. Während die Regeln der *finite state*-Grammatik vollständig auf den lokalen Abfolgen der aufeinanderfolgenden Buchstaben beruhen, so erlaubt die Phrasenstrukturgrammatik auch hierarchisch strukturierte Regeln (s. Abb. 2.6.3 für Beispiele).

Die *finite state*-Grammatik wird im Deutschen auch Grammatik mit endlich vielen Zuständen genannt. *Finite state*-Grammatiken sind für die Beschreibung natürlicher Sprachen nicht ausreichend, weil es auch Abhängigkeiten zwischen nicht direkt aufeinanderfolgenden Elementen gibt (s. o.). Weiterhin wurde gefunden, dass Affen *finite state*-Grammatiken erlernen können, an Phrasenstrukturgrammatiken aber scheitern (Fitch/Hauser 2004). Die selektive BA44-Aktivierung kann also als Beleg für die Hypothese gelten, dass der linke inferiore Frontalcortex die Integration sprachlicher Einheiten unterstützt. Sie zeigt aber zugleich, dass geeignete Experimente Aussagen erlauben, die noch weit präzisere Unterscheidungen innerhalb eines Gebietes wie dem inferioren Frontalcortex ermöglichen.

Ein weiteres funktionell-neuroanatomisches Modell der Sprache geht einen besonderen Weg, indem es auf Gemeinsamkeiten zwischen Sprache und Gedächtnis hinweist (Ullman 2001). Die kurze Besprechung der klassischen Aphasieformen und der Dyslexien zeigt schon, dass Sprache von einer großen Zahl von Hirnarealen unterstützt wird, die vom Frontalcortex bis zum Occipitalcortex reichen. Damit stellt sich die Frage, ob all diese Hirnareale selektiv Sprachprozesse unterstützen oder ob es Gemeinsamkeiten zwischen sprachlichen und nichtsprachlichen Prozessen gibt. Einerseits sollte man annehmen, dass das Gehirn über spezifische Strukturen oder Verschaltungen verfügt, über die etwa nichtmenschliche Primaten, deren Sprachfähigkeiten nur rudimentär ausgebildet sind, nicht verfügen. Ein Beispiel dafür mag die frontale Aktivierung durch Phrasenstrukturgrammatiken sein (s. o.; Friederici et al. 2006). Andererseits ist es unwahrscheinlich, dass ein so weitverzweigtes Netzwerk von Hirnarealen selektiv eine entwicklungsgeschichtlich so neue Funktion wie die Sprache unterstützt.

Von Ullman (2001) wurde ein Modell vorgestellt, dass auf Gemeinsamkeiten zwischen Sprache und Gedächtnis verweist. Sein deklarativ/prozedurales Modell der Sprache postuliert, dass Aspekte des mentalen Lexikons und der Grammatik an die deklarativen und prozeduralen Gedächtnissysteme gebunden sind. Wie in den Kapiteln 3.1–3.3 näher beschrieben, ist das deklarative Gedächtnis in der Lage, Fakten und Ereignisse zu speichern, auch wenn diese arbiträr (assoziativ oder kontextuell) miteinander verbunden sind. Die Konsolidierung des deklarativ-



**Syntax und  
inferioren Frontal-  
cortex**

**finite state-  
Grammatik**

**Sprache und  
Gedächtnis**

**deklarativ-  
/prozedurales  
Sprachmodell**

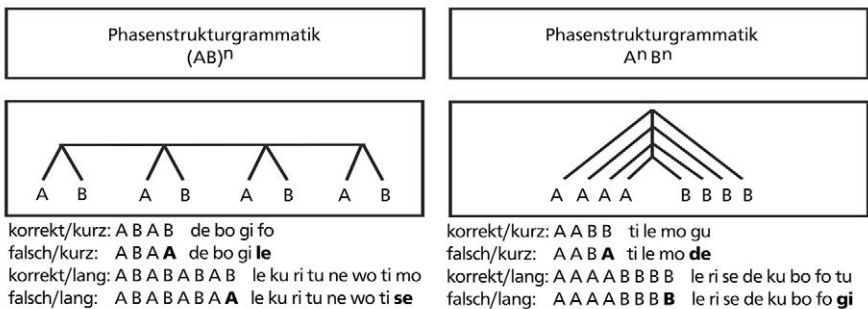
tiven Wissens erfolgt über den medialen Temporallappen, insbesondere den Hippocampus. Das prozedurale Gedächtnissystem hingegen ermöglicht das Lernen neuer (und die Kontrolle erlernter) motorischer und kognitiver Fertigkeiten. Das prozedurale Gedächtnis involviert prämotorische Areale, wie das supplementär-motorische Areal, aber auch den linken inferioren Frontalcortex sowie die Basalganglien, parietale Areale und das Cerebellum.

Ullman postuliert nun, dass das deklarative Gedächtnis dem mentalen Lexikon zugrunde liegt, während das prozedurale Gedächtnis Aspekte der Grammatik unterstützt. Wie bereits im Zusammenhang mit den Dyslexien (Kap. 2.5) und Aphasien besprochen, werden verschiedene Wege zur Wortbildung angenommen. Der lexikalische Weg ermöglicht die Perzeption und Produktion von Wörtern über das mentale Lexikon, in dem für jedes gelernte Wort ein Eintrag zu finden ist. Daneben wird ein regelbasierter Pfad angenommen, der auf allgemeinen Graphem-Phonem/Phonem-Graphem-Konversionsregeln beruht. Ullman nimmt an, dass das mentale Lexikon ein Teil des deklarativen Gedächtnisses ist, das nun neben Fakten und Ereignissen auch Wortbedeutungen und Wortklänge (für die Aussprache) enthält. Dagegen entsprechen grammatische Regeln, etwa zur Bildung regelmäßiger Vergangenheitsformen, dem prozeduralen Gedächtnis.

Empirische Unterstützung für das Modell kommt aus verschiedenen Bereichen. Psycholinguistische Daten zeigen, dass die Worthäufigkeit die Bildung irregulärer, aber nicht regulärer Wortformen beeinflusst. Dies wird als ein Hinweis darauf interpretiert, dass irreguläre Wortformen aus einem Gedächtnis abgerufen werden, während dies für reguläre Formen nicht gilt.

Neuropsychologische Daten zeigen, dass bei Patienten mit einer nichtflüssigen Aphasie nach anteriorer Hirnschädigung Störungen der Grammatik im Vordergrund stehen, während sie durchaus noch in der Lage sind, einzelne Wörter aus dem Gedächtnis abzurufen. Hierbei zeigen sie jedoch häufiger Fehler bei der Bildung regulärer Wortformen als bei irregulären Wortformen. Umgekehrt verhält es sich bei Patienten mit einer flüssigen Aphasie nach posteriorer Hirnschädigung. Bei diesen Patienten stehen allgemein Schwierigkeiten in der semantisch korrekten Verwendung von Wörtern im Vordergrund, während syntaktische Strukturen intakt sind und reguläre Wortformen korrekt gebildet werden.

**Belege für das Sprachmodell**



**Abb. 2.6.3:** Beispiel für künstliche „Sätze“, die der *finite-state*-Grammatik oder der Phrasenstrukturgrammatik gehorchen (nach Friederici et al. 2006, bearbeitet)

Dieses Dokument wurde mit IP-Adresse 141.46.144.6 aus dem Netz der USEB HS Zittau am 14.10.2020 um 18:17 Uhr heruntergeladen. Das Weitergeben und Kopieren dieses Dokuments ist nicht zulässig.

Weitere Belege für das Modell kommen aus dem Bereich der neurodegenerativen Erkrankungen. Bei der Alzheimer-Erkrankung, die mit Degenerationen im Temporallappen (insbesondere im MTL) beginnt, die sich dann zunächst auf angrenzende Bereiche des Parietallappens ausdehnen, stehen Störungen des deklarativen Gedächtnisses im Mittelpunkt. Dagegen bleibt prozedurales Gedächtnis lange intakt. Defizite in der Objektbenennung und im Abruf von Fakten korrelieren mit sprachlichen Defiziten in der Bildung irregulärer Wortformen, während dies für reguläre Wortformen nicht gefunden wurde.

Bei der Parkinson-Krankheit hingegen stehen motorische Störungen (Hypokinesie, Ruhetremor, Rigor, Gang- und Bewegungsstörungen) im Vordergrund. Diese Störungen werden durch den Verlust dopaminerger Neurone in der Substantia nigra hervorgerufen. Solange die Patienten keine Parkinson-Demenz entwickeln, bleibt der Temporallappen relativ wenig betroffen, dementsprechend ist auch das deklarative Gedächtnis relativ intakt. Sprachlich zeigen die Parkinson-Patienten ein umgekehrtes Muster im Vergleich zur Alzheimer-Krankheit, indem sie eher Fehler bei der Bildung regulärer als irregulärer Wortformen machen. Im Frühstadium sind die Basalganglien meist einseitig stärker betroffen. Rechtsseitige Hypokinesie, die durch linksseitige Basalganglienschädigung hervorgerufen wird, korreliert mit der Anzahl der Fehler bei der Bildung regulärer, aber nicht irregulärer Wortformen. Eine ähnliche Korrelation wurde nicht für linksseitige Hypokinesie gefunden, was für eine besondere Bedeutung linkshemisphärischer Strukturen bei der Nutzung grammatikalischer Regeln spricht.

Bei der Huntington'schen Krankheit wiederum – einer erblichen Krankheit, die im Gegensatz zur Parkinson-Krankheit nicht zu Hypokinesie, sondern (u. a.) zu überschießenden motorischen Bewegungen (Chorea Huntington) führt – wurde eine ebenfalls überschießende Produktion regulärer Endungen (z. B. im Englischen *walked-ed*) gefunden.

Diese Befunde sprechen recht deutlich dafür, dass die Basalganglien und frontale Strukturen in die Produktion regulärer Wortformen eingebunden sind, während irreguläre Wortformen aus einem deklarativen Speicher abgerufen werden. Dazu werden insbesondere der Temporallappen und der inferiore Parietallappen benötigt (sowie insbesondere der mediale Temporallappen, soweit der Speicherinhalt noch nicht konsolidiert ist). Ullman nimmt an, dass die Bildung regelhafter grammatischer Strukturen in *real-time* von den Basalganglien im Zusammenspiel mit Arealen des dorsalen corticalen Pfads (frontale und parietale Strukturen) geschieht, in ähnlicher Weise, wie der dorsale Pfad auch die *on-line* Berechnung räumlicher Orientierungskordinaten ermöglicht. Dabei soll es zu einer gegenseitigen Inhibition zwischen dem prozeduralen und deklarativen System kommen, indem etwa das Auffinden einer irregulären Wortform im deklarativen Speicher die Bildung der regulären Form durch das prozedurale System verhindert. Es mag sein, dass dieses Modell zu einfach ist, um der ganzen Vielfalt sprachlicher Prozesse gerecht zu werden, aber es stellt zumindest einen guten Ansatz dar, über Gemeinsamkeiten zwischen sprachlichen und nichtsprachlichen Prozessen nachzudenken.



## Fragen zu Kapitel 2.6

### Überprüfen Sie Ihr Wissen!

121. Was ist eine lexikalisierte Grammatik?
122. Was besagt das Prinzip des *minimal attachment*? Geben Sie ein Beispiel (möglichst ein neues).
123. Was ist *late closure*? Generieren Sie auch hier ein Beispiel.
124. Welche Kritik gab es am Garden-Path-Modell? Welche Alternativen wurden vorgeschlagen?
125. Was ist eine N400? Unter welchen Umständen tritt sie auf? Welche funktionellen Aussagen lässt ihr Auftreten zu?
126. Welche EKPs werden nach syntaktischen Verletzungen beobachtet? Wie unterscheiden sie sich?
127. Welche Schlüsse über die syntaktische und semantische Sprachverarbeitung kann man aufgrund von EKP-Daten ziehen?
128. Wodurch ist eine Broca-Aphasie gekennzeichnet? Welche Kritik gibt es am klassischen Konzept der Broca-Aphasie? Aufgrund welcher Befunde?
129. Welche sprachliche Funktion hat der linke inferiore Frontalcortex?
130. Welche Gemeinsamkeiten gibt es zwischen Sprach- und Gedächtnisfunktionen?

## 2.7 Mentale Arithmetik

### 2.7.1 Numerosität



Von 1998–2003 bereiste der französische Forscher Pierre Pica mehrfach ein Dschungelgebiet im nördlichen Brasilien. Das Ziel dieser Reisen war ungewöhnlich. Pica suchte Indianer vom Stamm der Munduruku auf, um ihr Konzept der Numerosität zu untersuchen (Pica et al. 2004). Eine Besonderheit der Munduruku ist, dass ihre Sprache nur Zahlwörter von 1–5 hat.

Sie konnten damit zur Klärung der langanhaltenden Frage beitragen, ob mentale Arithmetik auf Sprache angewiesen ist. Einige Forscher vertraten die Ansicht, dass Arithmetik eine abstrakte Variante sprachlicher Fähigkeiten ist (Chomsky 1988, 169; Hurford 1987). Andere wiederum argumentierten, dass es einen angeborenen „Zahlensinn“ (*number sense*) gebe. Dieser ermögliche auch in Abwesenheit exakter Zahlen zumindest numerische Schätzoperationen, die unabhängig von anderen Merkmalen wie Gewicht oder Dichte durchgeführt werden könnten (Dehaene 1997).

Pica bereiste nun mit einem mit Solarzellen betriebenen Laptop den Dschungel, um den Munduruku verschiedene arithmetische Aufgaben zu stellen. Zunächst konnte er zeigen, dass die Munduruku exakte Zähloperationen meist nur bis zur Quantität 3 oder 4 durchführten, selten darüber, wie etwa bis 10, durch stilles Abzählen der Finger. Wie aber würden sie sich verhalten, wenn größere Quantitäten verglichen werden sollten? Dazu sollten größere Punktwolken („Erbsen“) miteinander verglichen werden (Abb. 2.7.1).

### mentale Arithmetik und Sprache

Die Munduruku zeigten hier den gleichen Distanzeffekt, den auch Sprecher unserer Sprache zeigen: Je größer der Unterschied zwischen den Quantitäten, umso schneller und fehlerfreier kann die größere (oder kleinere) Quantität bestimmt werden. Die Munduruku unterschieden sich hinsichtlich des numerischen Distanzeffekts nicht von französischen Probanden, die mit der gleichen Aufgabe getestet wurden. Dabei kommt es nicht auf den absoluten Unterschied an, sondern auf das Verhältnis der Anzahl der Elemente der (kleineren) Menge und der Differenz zur Vergleichsmenge.

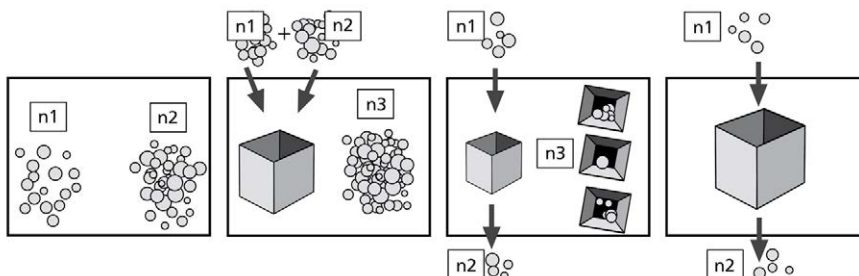
**numerischer  
Distanzeffekt**

Die gleiche Sicherheit, mit der eine Menge von 12 Erbsen als größer als eine Menge von 10 Erbsen erkannt wird, stellt sich im erst im Vergleich von 120 zu 100 Erbsen ein (und nicht von 102 zu 100). Dieses Verhältnis wird nach dem deutschen Physiker Wilhelm Weber als Weber-Bruch benannt und hat die Form  $\Delta S/S = k$ , wobei  $\Delta S$  die Unterschiedsschwelle und  $S$  die „Stimulus-Intensität“ bezeichnet (der Bruch wurde ursprünglich zur Beschreibung von Lichtintensitätsvergleichen herangezogen). Im vorliegenden Fall bezeichnet  $S$  die Menge der Punkte. Die Konstante betrug für die Munduruku  $k = 0,17$  und war damit nur marginal größer als für die französischen Probanden mit  $k = 0,12$ . Konkret bedeutet dies, dass die Munduruku beispielsweise eine Menge von 100 gerade noch von einer Menge von 117 „Erbsen“ unterscheiden konnten, während bei den Franzosen die Schwelle bei 100 und 112 lag.

**Weber-Bruch**

Dass die Munduruku diese Aufgabe lösen konnten, zeigte, dass sie große Anzahlen auch ohne exakte Zahlbegriffe, also analog, repräsentieren konnten und über ein Konzept relativer Größe verfügten. Die nur geringfügig größere Konstante zeigt, dass die Munduruku den Vergleich der Quantitäten mit ähnlicher Präzision bewerkstelligten.

Die Munduruku konnten auch ungefähre Additions- und Subtraktionsaufgaben mit gleicher Präzision wie die französischen Kontrollprobanden bearbeiten. Konkret ging es darum, dass zwei Mengen von „Erbsen“ in einen Behälter geschüttet wurden (Abb. 2.7.1). Dann sollte entschieden werden, ob die (unsichtbare) Menge im Behälter größer oder kleiner als eine Vergleichsmenge war. Die Subtraktionsaufgabe war analog dazu so gestaltet, dass „Erbsen“ aus dem Behälter entnommen wurden.



**Abb. 2.7.1:** Schematische Versuchsanordnung zur Untersuchung der numerischen Fähigkeiten der Munduruku. Von links nach rechts: ungefährer Mengenvergleich, ungefähre Addition, exakte Subtraktion (zeige auf die Differenz  $n1 - n2$ ), exakte Subtraktion (benenne die Differenz  $n1 - n2$ ; nach Pica et al. 2004, bearbeitet)

**exakte Berechnung**

Schließlich wurde untersucht, inwieweit die Munduruku in der Lage sind, exakte Berechnungen auszuführen. Dazu wurden aus einer initialen Menge von maximal 8 „Erbsen“ einige entnommen, und zwar immer so viele, dass das Resultat im Bereich von 1–4 lag und somit benannt werden konnte. Die Ausgangszahlen lagen aber z. T. außerhalb des benennbaren Bereichs. Wenn Letzteres zutraf, brach die Leistung der Munduruku schnell zusammen. Dagegen waren die Lösungen fast zu 100 % korrekt, wenn der Minuend  $\leq 4$  war. Die Untersuchungen bestätigten damit die Existenz zweier unterschiedlicher Systeme mentaler Arithmetik. In der Abwesenheit exakter Zahlenbegriffe  $> 5$  waren die Munduruku in der Lage, approximative Größenschätzungen in vergleichbarer Präzision wie Kontrollprobanden mit einem elaborierten Zahlensystem auszuführen. Auch die Konzepte von Addition und Subtraktion waren ihnen verständlich. Exakte Arithmetik dagegen war ihnen nur in sehr begrenztem Rahmen möglich.

**analoge Repräsentation**

Belege für eine analoge mentale Repräsentation von Quantität wurden in vielen Studien gefunden, sowohl bei Tieren wie bei Kindern und erwachsenen Menschen. Man könnte hier einwenden, dass es sehr schwierig ist, Numerositätskonzepte bei Tieren nachzuweisen – ist doch jede Menge, die sich durch eine unterschiedliche Anzahl von Elementen unterscheidet, unweigerlich auch physikalisch unterschiedlich. Die verschiedene Anzahl der Elemente geht i. d. R. auch mit unterschiedlicher Dichte oder unterschiedlicher Ausdehnung der Menge einher. Mehr Punkte in einer Menge führen (bei gleicher Größe) zu unterschiedlicher Helligkeit der Fläche usw. Bei der Untersuchung von Studien zur Numerosität müssen diese Konfundierungen sehr sorgfältig vermieden werden. Mit cleverem Experimentieren hat man jedoch recht überzeugende Belege dafür gefunden, dass auch Tiere ein Numerositätskonzept haben.

**Numerositätskonzept bei Tieren**

Ratten, die initial in der visuellen oder auditiven Modalität trainiert wurden, konnten später Numerositäten zwischen den Modalitäten diskriminieren (Church/Meck 1984). Andere Experimente, ebenfalls mit Ratten, zeigten, dass ein initiales Diskriminationstraining zwischen kurzen 2-Ton- und langen 8-Ton-Sequenzen (die auch aufgrund der Reizdauer unterschieden werden konnten) später auf 2- und 8-Ton-Sequenzen generalisierten, die sich nicht mehr in der Präsentationsdauer unterschieden (Meck/Church 1983).

**Entwicklung des Numerositätskonzepts**

Ähnliche Befunde wurden auch von Kleinkindern im vorsprachlichen Alter berichtet. Bei diesen Untersuchungen macht man sich den Umstand zunutze, dass Kleinkinder auf die wiederholte Darbietung ähnlicher Dinge habituieren (s. Kap. 3.5). Dies äußert sich in einer verminderten Betrachtungsdauer, wenn wiederholt gleiche oder ähnliche Objekte präsentiert werden. Wird jedoch ein neues Objekt gezeigt, so betrachten die Kinder dieses Objekt länger, als ob ihre Neugier geweckt wäre. Xu und Spelke (2000) konnten zeigen, dass dies auch für Mengen ungleicher Numerosität gilt, auch dann, wenn konfundierende Variablen wie Dichte und Helligkeit sorgfältig kontrolliert werden (s. Abb. 2.7.5).

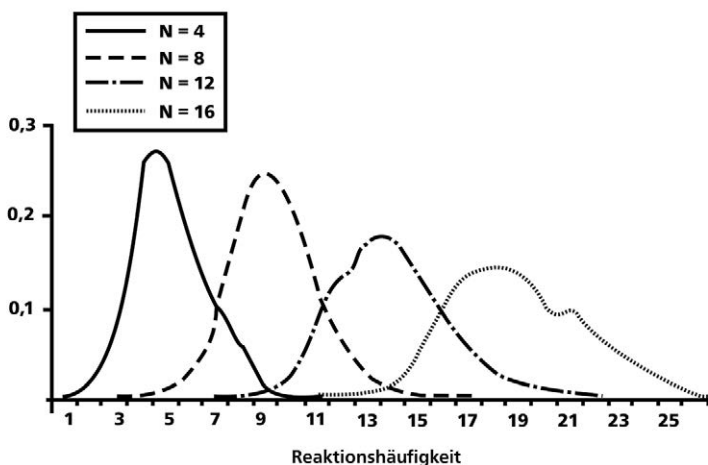
Tiere und Menschen haben gemeinsam, dass Numerositätsschätzungen dem bereits vorgestellten Weber'schen Gesetz gehorchen. Um einen Eindruck davon zu bekommen, können Sie mit einem Freund folgenden Selbstversuch durchführen: Murmeln Sie leise das Wort „Lokomotivführer“ vor sich hin, wobei Sie das Wort ständig wiederholen (dies verhindert verbales Zählen). Der Mitspieler

sagt dann eine Zahl zwischen 7 und 25, die Sie dann so schnell wie möglich in eine Anzahl von Tastendrücken auf einer Taste der Computertastatur umsetzen. Wenn Sie einen Texteditor eingeschaltet haben, können Sie anschließend die Tastendrücke einfach anhand der eingegebenen Symbole abzählen. Sie sollten dann bemerken, dass die Abweichung von der vorgegebenen Anzahl im Verhältnis zu der vorgegebenen Zielzahl wächst.

Dies wurde zumindest in einer Untersuchung von Whalen und Kollegen (1999) gefunden. Ähnliche Befunde wurden auch für die Schätzung von Preisen und die Approximation komplexer Rechenaufgaben berichtet. Aber nicht nur beim Vergleich von Mengen, sondern auch beim Vergleich von numerischen Zahlen zeigt sich ein Effekt der Größe. Der Größenvergleich zwischen den Zahlen 5 und 6 gelingt im Mittel schneller als der Vergleich von 555 und 556 (Moyer/Landauer 1967). Abbildung 2.7.2 illustriert den dem Weber-Bruch folgenden Zusammenhang zwischen Ausgangsgröße und Schätzgenauigkeit anhand eines Experiments mit Ratten, die darauf konditioniert wurden, bestimmte Anzahlen von Tastendrücken abzugeben. Je größer die Anzahl war, umso größer war auch die Streuung der abgegebenen Tastendrücke.

## 2.7.2 Neuronale Korrelate der Numerosität

Die Unterscheidung in zwei mental-arithmetische Systeme – ein exaktes System verbaler Arithmetik und ein approximatives, nonverbales System – sollte sich auch in verschiedenen neuronalen Korrelaten dieser Systeme widerspiegeln, zumal die Übereinstimmung zwischen den tier- und humanexperimentellen Befun-

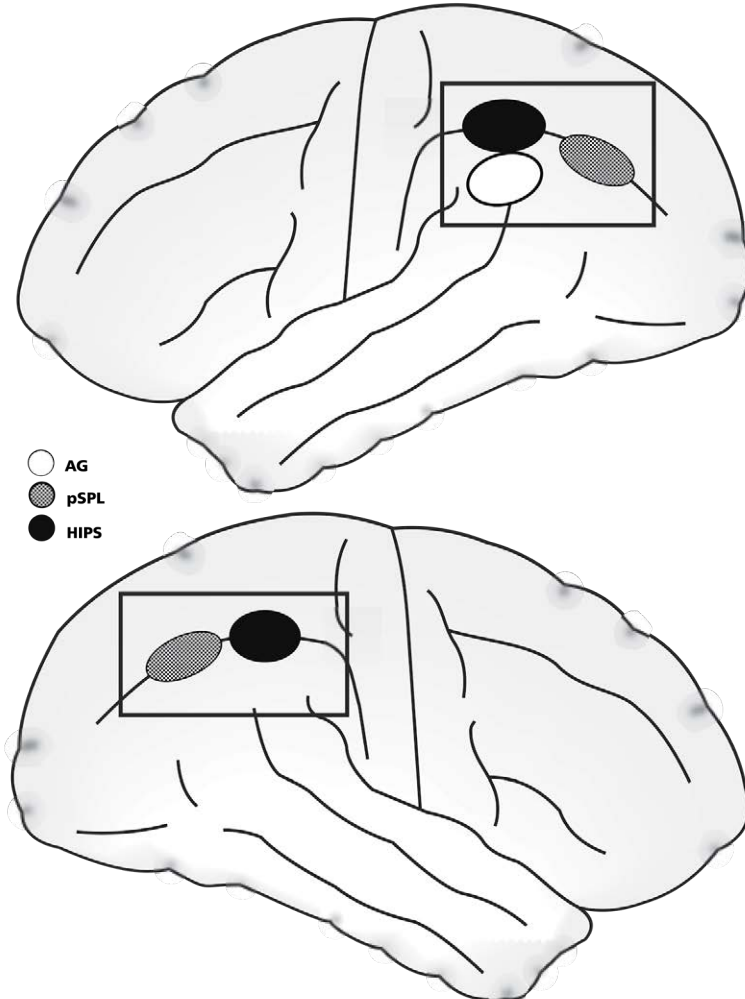


**Abb. 2.7.2:** Antwortverteilung bei Konditionierung auf bestimmte Anzahl von Tastendrücken von Ratten (nach Piazza/Dehaene 2004, bearbeitet)

**posteriorer  
Parietalcortex**

den nahelegt, dass es sich bei dem analogen System um ein phylogenetisch älteres System als das sprachliche System handelt.

Der Vergleich bildgebender Studien ergibt denn auch mehrere Areale des Gehirns, die durch verschiedene mental-arithmetische Aufgaben aktiviert werden. Insbesondere drei abgrenzbare Aktivationsherde im posterioren Parietalcortex wurden wiederholt gefunden. Eines dieser Areale liegt an den Ufern des horizontalen Segments des Sulcus intraparietalis (HIPS), ein weiteres im posterioren Lobulus parietalis superior (pSPL). Während diese beiden Aktivierungen bilateral beobachtet wurden, so tritt eine dritte Aktivierung spezifisch im Gyrus angularis (AG) der linken Hemisphäre auf (Abb. 2.7.3).

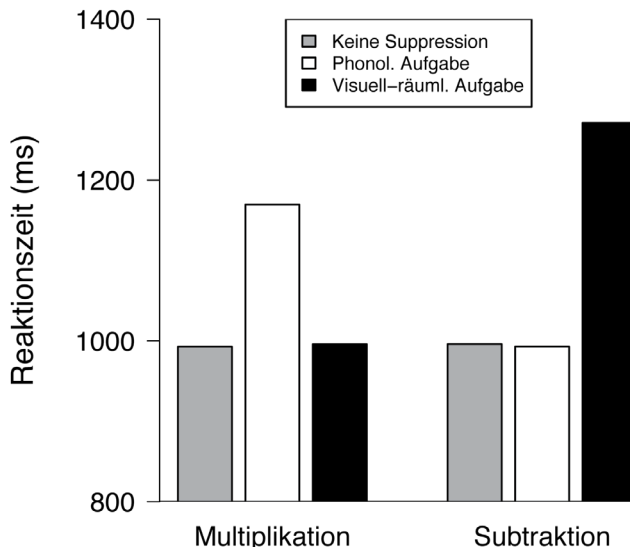


**Abb. 2.7.3:** Hirnareale im posterioren Parietalcortex, die mental-arithmetische Funktionen unterstützen. AG: Gyrus angularis; HIPS: horizontales Segment des Sulcus intraparietalis; pSPL: posteriorer Lobulus parietalis superior (nach Piazza/Dehaene 2004, bearbeitet)

Aus der Neuropsychologie ist schon seit langem bekannt, dass eine Läsion des linken Gyrus angularis häufig mit einer Lese- und Schreibstörung einhergeht (Alexie mit Agraphie; Déjerine 1892, s. Kap. 2.5). Tatsächlich ist der linke Gyrus angularis auch stärker bei exakter Berechnung als bei Schätzung aktiviert. Weiterhin findet man hier stärkere Aktivierung bei Multiplikation als bei Subtraktion. Der Zusammenhang mag zunächst verwundern. Tatsächlich gibt es aber Hinweise darauf, dass Multiplikation stärker auf verbalem Abruf aus dem Arbeitsgedächtnis beruht als Subtraktion. Diese beansprucht demgegenüber mehr visuell-räumliche Prozesse, im Sinne eines mentalen Zahlenstrahls.

Diese Zusammenhänge wurden exemplarisch in einer Studie von Lee und Kang (2002) untersucht. Sie ließen ihre Probanden Multiplikations- und Subtraktionsaufgaben rechnen, während sie gleichzeitig eine Zweitaufgabe bearbeiten mussten. Eine dieser Zweitaufgaben bestand darin, in ständiger Wiederholung ein sinnloses aussprechbares Nichtwort (Kap. 2.6) auszusprechen. Diese Technik der artikulatorischen Suppression (Kap. 3.1) dient dazu, den phonologischen Arbeitsspeicher auszulasten. Die alternative Zweitaufgabe bestand darin, sich die Form und Lage einer abstrakten visuellen Figur zu merken. Die Hypothese der Autoren betraf die Form der Interferenz zwischen den arithmetischen Aufgaben und den Zweitaufgaben. Wenn Multiplikation primär sprachliche Prozesse beansprucht, so sollte sie durch die phonologische Aufgabe gestört werden, aber nicht durch die visuell-räumliche Aufgabe. Umgekehrt sollte die Subtraktion, wenn diese primär auf visuell-räumlichen Prozessen beruht, primär durch die simultane visuell-räumliche Aufgabe, aber nicht durch die phonologische Aufgabe gestört werden. Genau diese doppelte Dissoziation zwischen den arithmetischen Aufgaben und Zweitaufgaben wurde gefunden: Die Bearbeitungszeiten für die Multiplikation waren bei gleichzeitiger phonologischer Arbeitsgedächtnisbelastung signifikant verlängert,

verbale und visuell-räumliche Prozesse



**Abb. 2.7.4:** Differenzielle Interferenz von Multiplikation und Subtraktion mit verbaler und visuell-räumlicher Arbeitsgedächtnisbelastung (nach Lee/Kang 2002, bearbeitet)

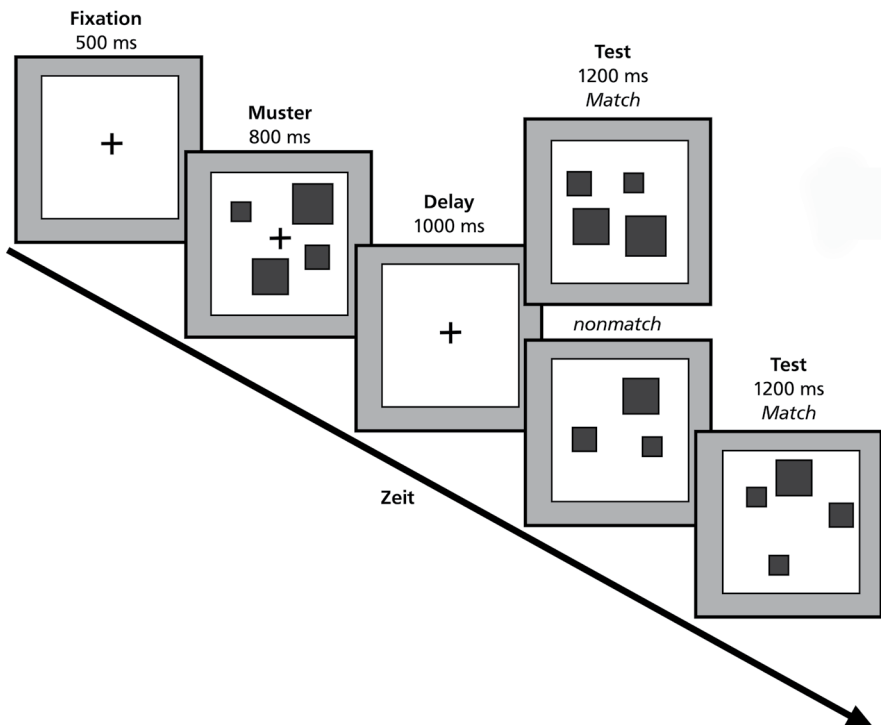
jedoch nicht bei visuell-räumlicher Arbeitsgedächtnisbelastung. Umgekehrt verhielt es sich mit der Subtraktion (Abb. 2.7.4).

Auch die neuronalen Korrelate von Multiplikation und Subtraktion scheinen verschieden zu sein. Wie bereits berichtet, wurde bei der Multiplikation eine Aktivierung des linken Gyrus angularis gefunden. Bei Subtraktionsaufgaben dagegen fand man eher eine Aktivierung entlang des pSPL (Übereinstimmung mit anderen, nichtnumerischen visuell-räumlichen Prozessen?) wie auch im HIPS.

### Differenzielle Aktivierung entlang des horizontalen Segments des Sulcus intraparietalis (HIPS) in mentalen Arithmetikaufgaben (nach Piazza / Dehaene 2004)

HIPS ist stärker aktiviert

- bei Ergebnisschätzung als bei exakter Lösung,
- bei Subtraktion als bei Multiplikation,
- bei Operationen mit großen als mit kleinen Zahlen,
- bei Operationen, die eine numerische Skala benötigen,
- bei numerischen im Vergleich zu nichtnumerischen Vergleichen (wie Wildheit von Tieren, Raumbeziehungen von Körperteilen usw.).



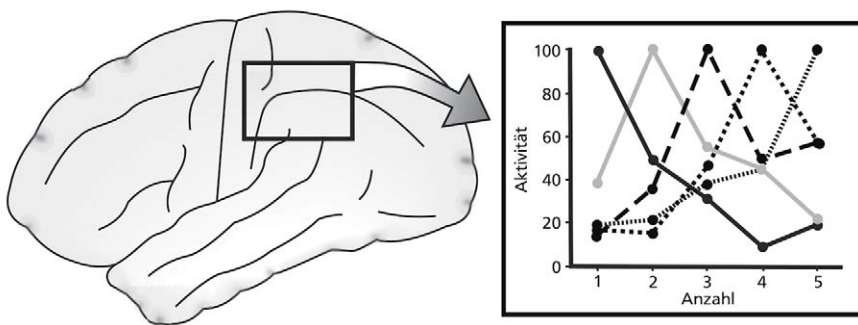
**Abb. 2.7.5:** Schematischer Versuchsdurchgang zur Untersuchung numerischer Kodierung im Gehirn des Affen (nach Nieder/Miller 2004, bearbeitet)

Der Kasten „Differenzielle Aktivierung“ zeigt, dass der HIPS ein Kandidat für die Repräsentation von Numerosität ist. Bei exakter Rechnung ist er stärker bei der Subtraktion aktiviert, die weniger über verbalen Gedächtnisabruf gelöst wird. Stärkere Aktivierung bei Ergebnisschätzung und Operationen mit großen Zahlen sprechen für eine Rolle in der analogen Numerositätsverarbeitung. Der HIPS ist bei Vergleichsprozessen stärker involviert, wenn der Vergleich numerischer Natur ist, als bei nichtnumerischen Vergleichen. Dies betrifft sogar Vergleiche zwischen Zahlen relativ zu Buchstaben- oder Farbenvergleichen (Eger et al. 2003). Buchstaben und Farben zeigen beide auch einen Distanzeffekt. Buchstaben sind ebenfalls symbolische Repräsentationen und haben darüber hinaus wie Ziffern eine klare Reihenfolge. Allerdings konnte eine stärkere Aktivierung durch Numerositätschätzung nicht immer repliziert werden (Shuman/Kanwisher 2004). Eine spezifische Rolle von Neuronen entlang des HIPS in der Numerositätsschätzung muss nicht unbedingt bedeuten, dass im gleichen Areal nicht auch andere Funktionen beheimatet sind. Aus vielen Untersuchungen wissen wir, dass dieses Gebiet eine bedeutende Rolle bei der räumlichen Orientierung spielt (Kap. 1.3).

In einer weiteren Studie wurde die Hirnaktivierung bei Kindern im Vorschulalter mit der von Erwachsenen verglichen (Cantlon et al. 2006). Schon bei den 4-jährigen Kindern wurden parietale Aktivierungen entlang oder in der Nähe des Sulcus intraparietalis in einer Quantitätsschätzungsaufgabe beobachtet. Die Daten unterstützen die Hypothese, dass parietale Neurone eine analoge Form der Numerositätsrepräsentation unterstützen, da die verbale Repräsentation bei den Kindern noch sehr rudimentär war (Zahlenraum bis 10, darüber hinaus unsicher).

Einen wichtigen Einblick in die neuronalen Grundlagen der Numerositätsrepräsentation haben Einzellableitungen beim Affen ergeben. Mittels multipler Ableitungen wurden numerositätssensitive Neurone im posterioren Parietalcortex und im ventrolateralen Präfrontalcortex des Affen gefunden (Nieder/Miller 2004). Die Affen bearbeiteten eine Delayed-Matching-Aufgabe, bei der sie lernten, einen

neuronale Numerositätskodierung



**Abb. 2.7.6:** Numerositätskodierung in posterioren parietalen Neuronen des Affen. Die Numerositäten von 1–5 werden durch eine Reihe von Neuronen mit unterschiedlicher Numerositätsspezifität abgedeckt. Den Neuronen ist gemeinsam, dass sie auf abweichende Numerositäten nur gering reagieren (nach Nieder/Miller 2004, bearbeitet).

Test- und Vergleichsreiz auf gleiche Numerosität zu beurteilen. Konkret sahen sie Punktmuster, bei denen Größe, Lage und Anzahl der Punkte variiert wurden. Sie lernten, positiv auf Muster mit gleicher Punktzahl zu reagieren, unabhängig von Größe und Lage der Punkte (Abb. 2.7.5).

Von den abgeleiteten Nervenzellen in den genannten Gebieten kodierten einige die Anzahl der Punkte. Einzelne Neurone kodierten jeweils eine bestimmte Numerosität (Abb. 2.7.6). So reagierten einige maximal auf Muster mit 3 Punkten, deutlich weniger auf Muster mit 2 oder 4 Punkten und noch weniger auf Muster mit 1 oder 5 Punkten. Andere Neurone feuerten maximal bei 2 Punkten, wieder andere bei 1 Punkt usw. Auf diese Weise wurde der untersuchte Zahlenbereich (von 1–5) durch Neurone kodiert, die jeweils maximal auf eine Numerosität reagierten. Die Neurone zeigten recht steile Tuningkurven, die gut mit dem Verhalten der Affen übereinstimmten – insofern als falsch-positive Antworten eher bei Mengen auftraten, deren Numerosität nur gering von der gesuchten Numerosität abwich.

Im posterioren Parietalcortex wurde die größte Dichte an numerositätskodierenden Neuronen im Fundus des Sulcus intraparietalis gefunden, in Übereinstimmung mit den bildgebenden Befunden im menschlichen Gehirn. In diesem wurde der HIPS insbesondere bei analogen Quantitätsschätzungen aktiviert gefunden. Die parietalen Neurone reagierten früher auf Numerosität als die präfrontalen Neurone, was für einen Informationsfluss vom Parietallappen zum Frontallappen spricht.

Damit ergänzen sich die bildgebenden Untersuchungen des menschlichen Gehirns und die Einzelzelleableitungen am Affengehirn zu einem Bild der Numerositätskodierung, bei dem zumindest die Numerositäten von 1–5 zellulär kodiert sind. In beiden Spezies spielt der posteriore parietale Cortex eine wichtige Rolle für die Numerositätskodierung. Die komplexeren mental-arithmetischen Fähigkeiten des Menschen gehen einher mit einer Differenzierung arithmetischer Prozesse in benachbarten posterioren parietalen Arealen. Inwieweit es vom Affen zum Menschen zu einer Verlagerung der mentalen Arithmetik vom präfrontalen zum posterioren parietalen Cortex gekommen ist oder dieser Unterschied auf Unterschiede in den verwendeten experimentellen Paradigmata zurückzuführen ist, bleibt noch zu untersuchen.



## Fragen zu Kapitel 2.7

### Überprüfen Sie Ihr Wissen!

- 131.** Was beschreibt der numerische Distanzeffekt?
- 132.** Bei einer Konstante von  $k = 0,20$  im Weber-Bruch müssen Sie wie viele Kerzen anzünden, damit ihre Anzahl als  $> 120$  Kerzen wahrgenommen wird?
- 133.** Welche verschiedenen Repräsentationsarten für Numerositäten gibt es? Nennen Sie Beispiele.
- 134.** Welche unterschiedlichen Arbeitsgedächtnisspeicher beanspruchen Subtraktion und Multiplikation – und warum?
- 135.** Durch welche arithmetischen Aufgaben wird der HIPS besonders stark aktiviert?
- 136.** Welche Funktionen unterstützt der Gyrus angularis (s. a. Kap. 2.5)?

137. Wie werden Numerositäten auf der Ebene einzelner Neurone kodiert?
138. Welche Gemeinsamkeiten gibt es bei der Numerositätsverarbeitung bei Mensch und Tier – welche Unterschiede gibt es?
139. Wie würden Sie vorgehen, wenn Sie die Intaktheit der Numerositätsverarbeitung bei einem sprachgestörten Kind untersuchen wollten?
140. Welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede gibt es bei der Verarbeitung von Zahlen, Buchstaben und Wörtern?



# 3 Lernen und Gedächtnis