

# Rechts oder links herum –



## wie das Gehirn den Rückweg findet

B. Suchan  
I. Daum

Wer kennt das nicht: Man fährt mit dem Auto durch eine fremde Stadt und merkt sich anhand von auffälligen Gebäuden den Weg. Auf dem Rückweg erkennt man die markanten Punkte wieder – und verfährt sich doch! Schuld daran ist meist die andere Perspektive – Abzweigungen an Kreuzungen müssen in entgegengesetzter Richtung befahren werden. Nur wer sich visuell *und* räumlich orientiert, wird den Rückweg finden. Welche Zentren im Gehirn dafür zuständig sind, haben Neuropsychologen jetzt herausgefunden.

Die Gedächtnispsychologie widmet sich den Mechanismen, die bei einer zeitlich befristeten Speicherung und Nutzung neuer Eindrücke im Gehirn ablaufen – wie z.B. bei der Fahrt durch eine unbekannte Stadt. Traditionell versteht man unter Kurzzeitgedächtnis einen Speicher, der die Informationen enthält, die aktuell im Zentrum der Aufmerksamkeit stehen, auch wenn sie physisch nicht mehr präsent sind. Seit den 1970er Jahren wurde dieses Konzept eines einheitlichen, passiven

Speichers weitgehend durch das Modell eines Arbeitsgedächtnisses (working memory) ersetzt, das von mehreren Subsystemen ausgeht. Deren Funktion besteht nicht nur darin, neue Gedächtnisinhalte zeitlich begrenzt aufrecht zu erhalten, sondern sie auch aktiv zu bearbeiten und umzugestalten (“working with memory”).

In Abb. 2 sind die Teilbereiche des Arbeitsgedächtnisses dargestellt: Die sog. phonologische Schleife kodiert sprachlich-akustische Inhalte und der “visuell-räumliche

Dr. Boris Suchan, Prof. Dr. Irene Daum, Neuropsychologie, Fakultät für Psychologie

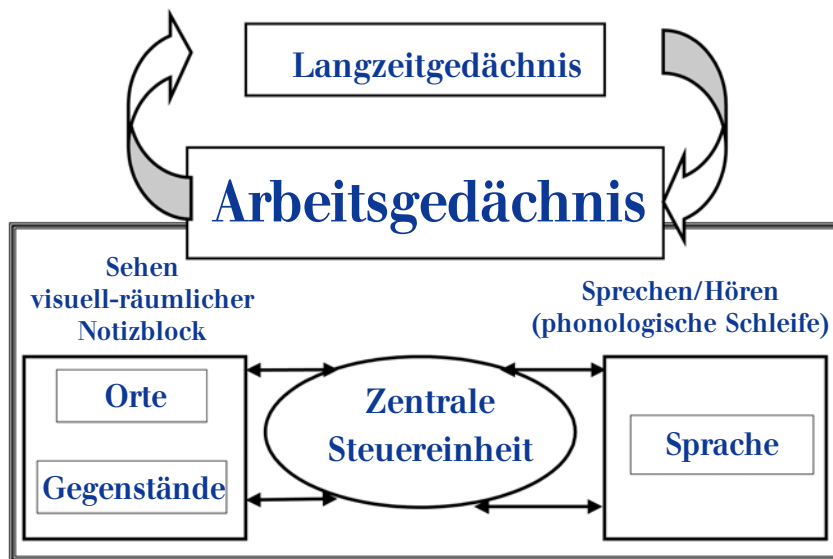


Abb. 2:  
Modell des Arbeitsgedächtnisses  
nach Baddeley (1986)

Notiz- oder Skizzenblock“ setzt bildliche und räumliche Inhalte um. Als übergeordnete Kontrollinstanz regelt die “Zentrale Steuereinheit”, die sog. zentrale Exekutive, die Verarbeitung in den beiden Subsystemen und den Austausch mit dem Langzeitgedächtnis. Wird eine Person z.B. gebeten, neue Telefonnummern, die ihr vorgesagt werden, sofort aus dem Gedächtnis wiederzugeben, ist die phonologische Schleife gefordert.

**Test: Telefonnummern merken, in umgekehrter Folge schreiben**

Besteht die Aufgabe darin, die Ziffern der Telefonnummern in umgekehrter Reihenfolge zu reproduzieren, dann schaltet sich zusätzlich die zentrale Exekutive ein. Sie muss die in der phonologischen Schleife gespeicherten Inhalte zunächst in der geforderten Weise umarbeiten, bevor sie wiedergegeben werden können.

Die phonologische Schleife besteht aus einem Speicher, in dem die Information gehalten wird, und einer Prozess-Komponente, die die gespeicherte Information

auffrischt. Diese Komponente ist als eine Art “inneres Sprechen” zu verstehen – in der Gedächtnispsychologie “artikulatorisches Rehearsal” genannt. Während sich die “Auffrischungs-Komponente” in den vorderen Gebieten des Stirnhirns befindet, vor allem im Sprachzentrum (Broca-Zentrum), liegt der Speicher im hinteren Bereich der linken Hirnhälfte, im sog. Parietalkortex

(s. Abb. 3).  
Im Gegensatz

dazu nimmt man für das visuelle Arbeitsgedächtnis zwei separate Speicher für ortsbezogene (visuell-räumliche) und für gegenstandsbezogene (visuelle) Inhalte an. Geht es vorwiegend darum, unterschiedliche räumliche Positionen – z.B. von Gegenständen auf einem Tisch – für

kurze Zeit in Erinnerung zu behalten, dann werden diese in den hinteren Gebieten der rechten Hirnhälfte gespeichert. Handelt es sich dagegen um visuelle Bildinhalte, wie z.B. unterschiedliche geometrische Muster, dann werden diese in der linken hinteren Hirnhälfte, dem sog. Temporal- und Parietalkortex, erfasst.

**Die „innere Stimme“ unterstützt das Gedächtnis**

Wahrscheinlich wird dieser Prozess durch eine sprachliche Kodierung unterstützt – im Sinne einer “inneren Stimme”, die das Gesehene unbewusst formuliert. Analog zum “inneren Sprechen” beim sprachlichen Arbeitsgedächtnis werden neu gespeicherte visuell-räumliche Inhalte quasi wie “innere Bilder” zusätzlich im linken und rechten Stirnhirn aufrechterhalten und aufgefrischt.

Die Organisation des Arbeitsgedächtnisses nach der Art der sich zu merkenden Inhalte ist auch von klinischer Relevanz.

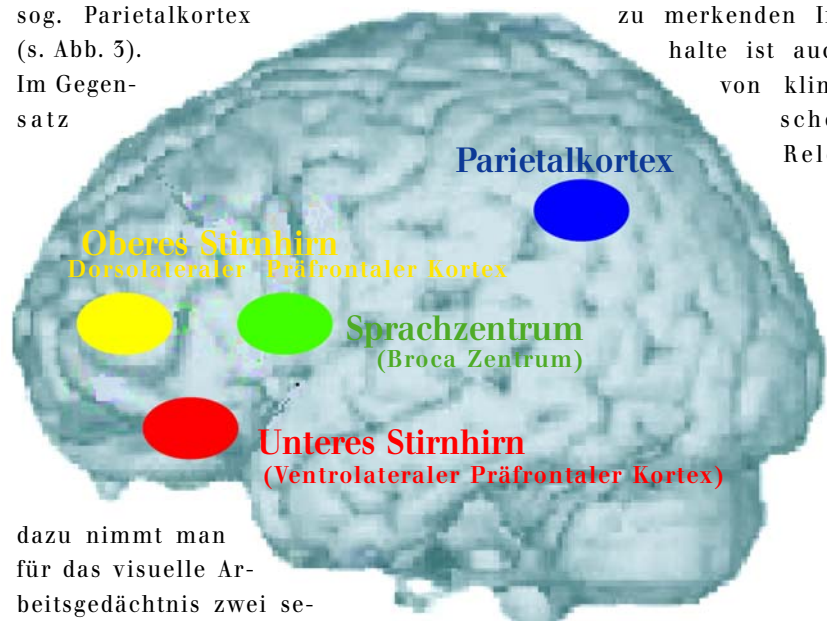
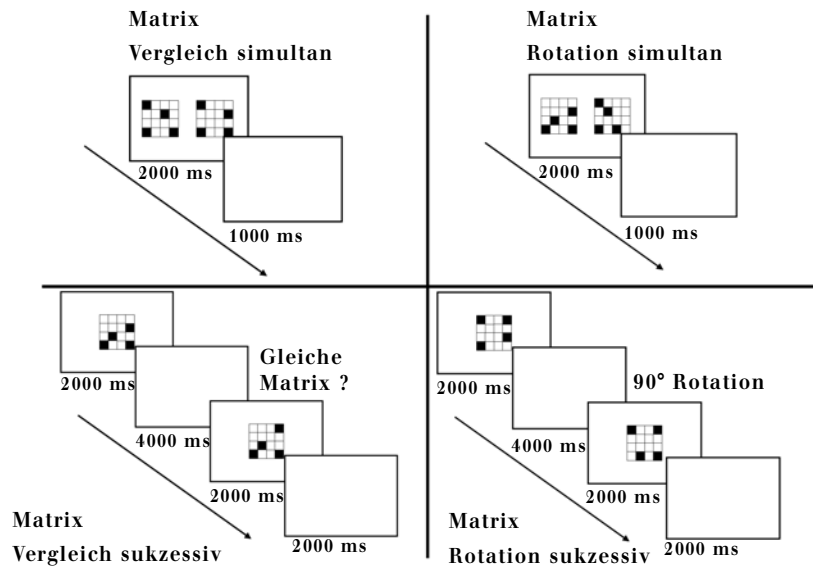


Abb. 3:  
Erinnerungen sind mitunter weit voneinander getrennt im Gehirn gespeichert. Hier sind die am Arbeitsgedächtnis beteiligten Regionen dargestellt (Seitenansicht der linken Hirnhälfte).

Abb. 4:

Welche Hirnstrukturen sind für welche Gedächtnisleistung zuständig? Um das heraus zu bekommen, werden immer zwei Aufgaben miteinander verglichen, z.B. "Rotation" und "Gedächtnis + Rotation". Die Testpersonen vergleichen jeweils zwei Matrizen, die gleichzeitig oder nacheinander mit einer Pause von vier Sekunden gezeigt werden, miteinander und entscheiden so schnell wie möglich, ob sie identisch sind oder nicht.



vanz: Wurde bei einem Patienten z.B. durch einen Unfall das linke Stirnhirn verletzt, dann fällt es ihm schwer, sich Telefonnummern oder neue Namen zu merken. Dieser Effekt verstärkt sich noch, wenn ein längerer Zeitraum – eine halbe Minute oder mehr – zwischen Speicherung und Abruf liegt, oder wenn der Patient zwischendurch abgelenkt wurde. Dagegen merkt sich dieser Patient mühelos die räumliche Anordnung von Gegenständen in einem Zimmer, da diese Hirnfunktionen

in der rechten, intakten Hirnhälfte ablaufen. Im umgekehrten Fall erinnert sich ein Patient mit einer Schädigung des rechten Stirnhirns gut an Namen oder Telefonnummern, während er Probleme damit hat, sich kurzfristig räumliche Anordnungen zu merken. Ist bei kurzfristiger Speicherung neuer Informationen das Stirnhirn aktiv, dann ist dies Ausdruck zweier unterschiedlicher Funktionen: Dem Auffrischen und dem aktiven Umgestalten gespeicherter Inhalte. Ob für diese beiden Funk-

tionen unterschiedliche Hirnregionen verantwortlich sind, oder ob unterschiedliche Gebiete für das räumliche Gedächtnis (Oberes Stirnhirn) und für das bildhafte Gedächtnis (Unteres Stirnhirn) zuständig sind, ist noch weitgehend ungeklärt. Deshalb untersuchen wir experimentell, wie Informationen im visuell-räumlichen Arbeitsgedächtnis verarbeitet werden. Dabei setzen wir die Technik der Positronen-Emissions-Tomographie (PET) ein, um die beteiligten

Hirnregionen zu erfassen. Bei diesem Verfahren wird den Probanden zunächst schwach radioaktiv markierter Alkohol gespritzt. Da in die aktiven Hirnregionen mehr Blut und damit auch mehr radioaktiv markierter Alkohol fließt, ist der Zerfallsprozess dort ebenfalls am stärksten. Während sich die Probanden Bilder oder Gegenstände ansehen und merken, messen wir den Zerfall des radioaktiv markierten Alkohols und lokalisieren so die Regionen der stärksten Hirndurchblutung (Hirnaktivität).

Damit die jeweilige Hirnaktivität auch einem ganz bestimmten Gedächtnisprozess zugeordnet werden kann, müssen immer zwei Aufgaben miteinander verglichen werden, z.B. in Abb. 4, links und rechts: "Rotation" und "Gedächtnis + Rotation".

---

**„Sehen und merken“  
fördert die Hirndurchblutung**

---

Diese Aufgaben dürfen sich nur in einem kritischen Merkmal unterscheiden, z.B. der Menge der zu speichernden Information oder der Zeitdauer zwischen Speichern und Abruf aus dem Gedächtnis. Durch den Vergleich der Hirnaktivität bei beiden Aufgaben kann dann die auf den Wechsel des Merkmals zurückzuführende Aktivierung identifiziert werden (s. Abb. 5, oberes Bild).

Im Experiment sollte nun untersucht werden, welche Hirnstrukturen während der Speicherung visueller Muster aktiv werden und welche an der Umgestaltung der Gedächtnisinhalte (visueller Notizblock, s. Abb. 2) beteiligt sind. Dazu wurden geometrische Muster (zweidimensionale Matrizen) verwendet, bei denen vier Felder jeweils schwarz gefärbt waren (s. Abb. 4).

Die Aufgabe bestand darin, jeweils

zwei Matrizen, die gleichzeitig oder nacheinander mit einer Pause von vier Sekunden gezeigt wurden, miteinander zu vergleichen und so schnell wie möglich zu entscheiden, ob sie identisch sind oder nicht (passives Behalten der Gedächtnisinhalte).

---

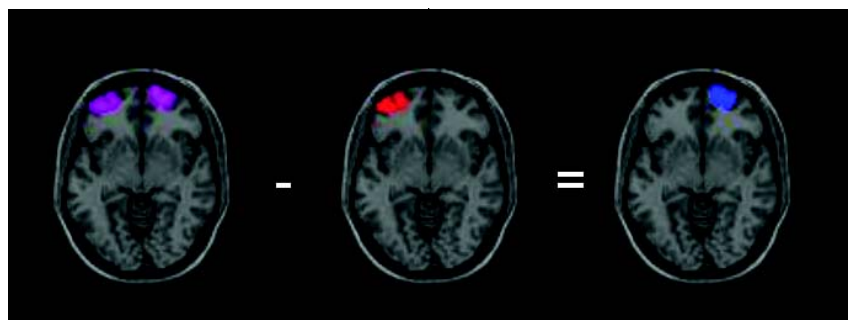
**Verzögerung ausnutzen**

---

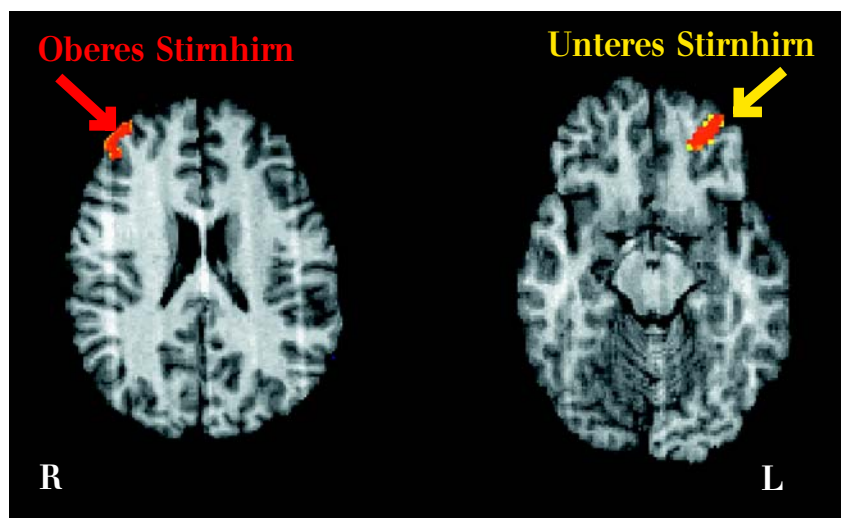
In einem weiteren Versuch mussten die Probanden beurteilen, ob eine der zwei simultan oder sukzessiv gezeigten Matrizen eine 90°-Rotation der ersten nach rechts darstellt (aktive Umgestaltung der Gedächtnisinhalte).

Die Analyse der Reaktionszeiten ergab, dass die Probanden bei

zwei nacheinander gezeigten Matrizen schneller reagierten, als wenn sie diese gleichzeitig angesehen hatten. Dies deutet darauf hin, dass die beteiligten Personen das Verzögerungsintervall nutzen, um sich auf die Reaktion vorzubereiten und sie daher schneller ausführten. Die PET-Daten zeigen bei sukzessiver Bearbeitung – wenn die erste Matrix vor dem Vergleich eine Zeitlang „im Speicher gehalten“ wurde – Aktivierungen im linken unteren Stirnhirn (ventrolaterales Gebiet), im Sprachzentrum und in hinteren Hirngebieten (Parietalkortex). Musste eine eventuelle Rotation beurteilt werden, d.h. erforderte die Aufgabe eine aktive mentale Umarbeitung der Matrizen, dann



*Abb. 5:  
Durch den Vergleich der Hirnaktivität bei "Rotation" und "Gedächtnis + Rotation" kann die auf den Wechsel des Merkmals zurückzuführende Aktivierung identifiziert werden (oben). Unten: Während der Matrizen-Rotation ist der Blutfluss (= erhöhte Hirnaktivität) im rechten oberen Stirnhirn erhöht. Die Gedächtnisleistung führt im linken oberen Stirnhirn zu einem erhöhten Blutfluss.*





*Abb. 6:  
Dreidimensionale Stimulation in der EEG-Studie: Die Stimuli sind in diesem Fall Würfelfiguren, die nach links oder nach rechts rotieren. Die Versuchsperson entscheidet, ob die zweite Figur eine exakte Rotation der ersten ist. Bei ungleichen Figuren wird ein Würfel an eine andere Stelle gesetzt. Damit werden die Anforderungen an die räumliche Informationsverarbeitung erhöht.*

waren Bereiche im rechten oberen Stirnhirn (dorsolaterales Gebiet) sowie in hinteren Hirngebieten aktiv.

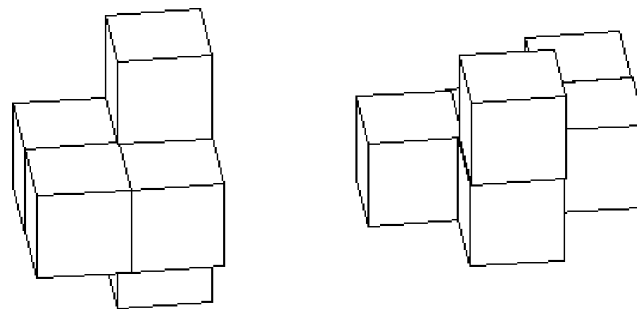
Die Ergebnisse sprechen somit für eine funktionsbezogene Aufteilung des Stirnhirns in einen weiter oben gelegenen, exekutiven manipulativen Bereich und einen weiter unten gelegenen, gedächtnisbezogenen Bereich (Abb. 5, unteres Bild). Dabei kommt der beobachteten getrennten Speicherung und räumlichen Bearbeitung visueller Reize in der linken und rechten Hirnhälfte besondere Bedeutung zu.

---

**Eindrücke getrennt speichern und bearbeiten**

---

Neben dem Einsatz neuerer bildgebender Verfahren wie der PET-Technik spielt die Analyse der elektrischen Hirnaktivität, die seit Anfang des letzten Jahrhunderts durchgeführt wird, noch immer eine wichtige Rolle bei der Untersuchung von Hirn-Verhaltenskorrelationen. Die elektrische Hirnaktivität (Elektroenzephalogramm, EEG) wird mit Hilfe spezifischer Mess-Vorrichtungen aufgezeichnet und zu bestimmten Reizen bzw. kognitiven Prozessen in



Beziehung gesetzt. Man erhält auf diese Weise sog. Ereignis-korrelierte Potentiale (EKP). Es ist allerdings aufgrund der geringen Spannungsstärken nicht möglich, die abgeleitete Aktivität eng umschriebenen Hirnregionen zuzuordnen. Dafür gestattet das Verfahren aber eine gute zeitliche Auflösung, d.h. eine genaue Analyse des zeitlichen Verlaufs der neuronalen Aktivität im Bereich von Millisekunden. Eine so hohe zeitliche Auflösung ist bei der PET-Methode wiederum nicht möglich; sie repräsentiert die über einen Zeitraum von ca. zwei Minuten abgelaufene Gesamtaktivität.

Um die zeitlichen Verläufe der im Arbeitsgedächtnis ablaufenden Prozesse näher zu bestimmen, wiederholten wir unsere Studie in modifizierter Form und zeichneten diesmal die elektrische Hirnaktivität auf. Wir verwendeten diesmal dreidimensionale Stimuli

(Würfelfiguren), die nach links oder nach rechts rotieren (Abb. 6). Die Versuchspersonen sollten entscheiden, ob die zweite Figur eine exakte Rotation der ersten ist. Bei ungleichen Figuren wurde ein Würfel an eine andere Stelle gesetzt. Die Anforderungen an die räumliche Informationsverarbeitung wurden damit deutlich erhöht.

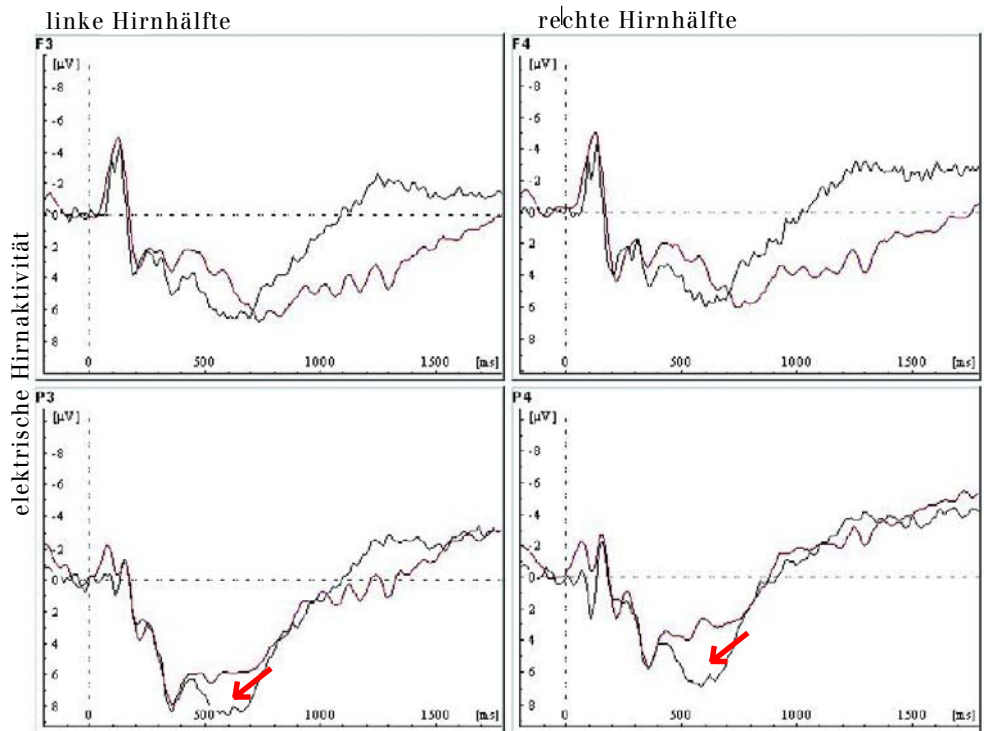
---

**Zwei Verfahren für Zeit und Raum**

---

Abb. 7 zeigt bei den EEG-Ableitungen über dem Stirnhirn (F3 und F4) einen steileren Anstieg der schwarzen Kurve für den Vergleich der zweiten Figur mit der zuerst gesehenen (einfache Gedächtnisleistung) als bei einer zusätzlichen Rotation der zweiten Figur (Gedächtnisleistung und Rotation, s. F3 und F4, rote Linie). Ein Anstieg in den negativen Be-

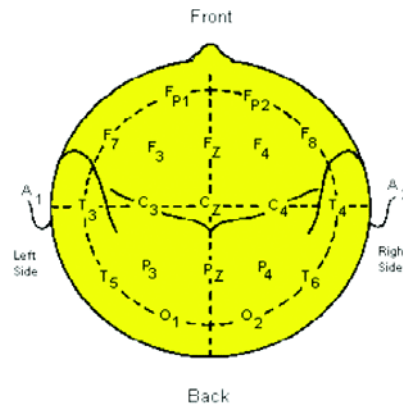
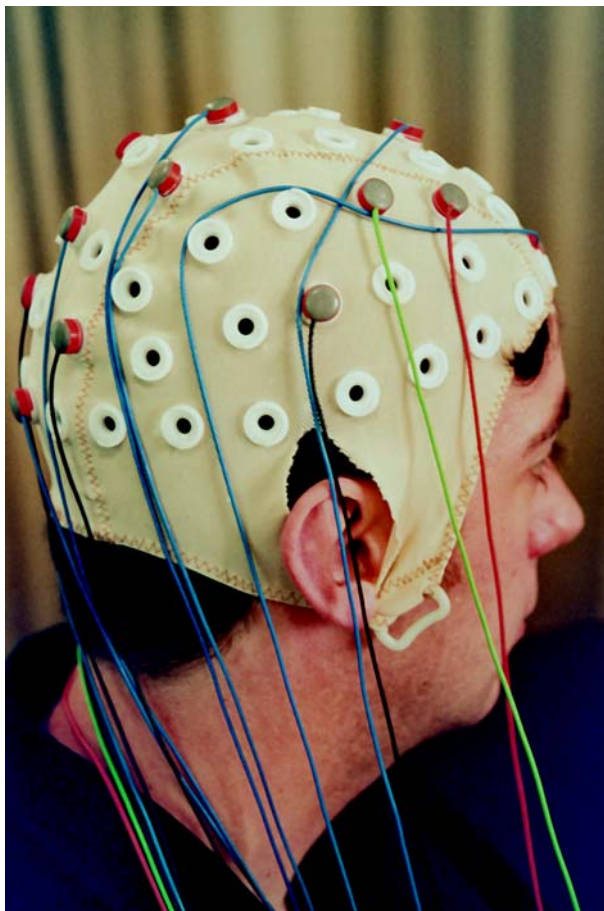
Abb. 7: EEG-Ableitungen über dem Stirnhirn (F3 und F4) und den hinteren Hirngebieten (P3 und P4). Ein Anstieg in den negativen Bereich spiegelt eine erhöhte Aktivierung der Hirngebiete wieder. So zeigt die schwarze Kurve der elektrischen Hirnaktivität über den hinteren Hirngebieten (P3 und P4, s. Pfeile), dass die Form der Würfel-Figur bei der zweiten Figur wiedererkannt wurde. (rot = Rotation, schwarz = Gedächtnis)



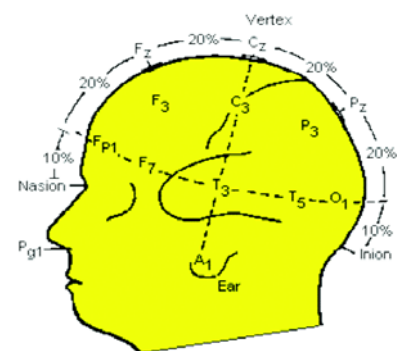
reich spiegelt eine erhöhte Aktivierung der Hirngebiete wieder. Der einfache Gedächtnisabgleich (schwarze Kurve) ging mit we-

sentlich kürzeren Entscheidungs- und Reaktionszeiten einher, als dies bei einer zusätzlichen Rotation der Fall war.

Der positive Verlauf der elektrischen Hirnaktivität über den hinteren Hirngebieten (s. Pfeile in Abb. 7, P3 und P4) 400-700 Milli-



F4: Elektrodenposition, frontal, rechts  
P4: Elektrodenposition, hinten, rechts



F5: Elektrodenposition, frontal, links  
P5: Elektrodenposition, hinten, links

sekunden nach dem Betrachten der zweiten Figur bringt zu Ausdruck, dass die Form der Würfel-Figur wiedererkannt wurde. Ein solcher Effekt zeigte sich nicht bei zusätzlicher Rotation (rote Kurve), da sich die zweite Figur deutlich von der ersten unterschied.

Insgesamt war die Hirnaktivität der rechten Seite etwas ausgeprägter als bei der linken Hirnhälfte, was auf die stärkere Beteiligung der rechten Hirnhälfte an der mentalen räumlichen Bearbeitung visueller Reize zurückzuführen ist.

---

## Wie der Autofahrer den Rückweg findet

---

Zu wissen, welche Hirnregionen für welche Gedächtnisleistungen zuständig sind und wie Informationen verarbeitet werden, ist eine grundlegende Voraussetzung für die Behandlung von Patienten mit Hirnverletzungen oder Erkrankungen des Gehirns. Die meisten Alltagssituationen kann der Mensch nur mit einem richtig funktionierenden Gedächtnis bestehen. So wird der Autofahrer den Rückweg durch die Stadt nur dann wiedererkennen, wenn sein unteres Stirnhirn aktiv ist und durch den Parietalkortex im hinteren Hirnbereich unterstützt wird. Die entgegengesetzte Perspektive realisiert dagegen das Obere Stirnhirn mit Unterstützung des Parietalkortex, indem das erinnerte Bild, d.h. die Straßenabzweigungen und Häuserfronten von links nach rechts bzw. von vorne nach hinten gedreht werden. Ob das Stirnhirn dabei ein- oder beidseitig aktiv wird, hängt vermutlich von der Komplexität der Straßenführung oder der Vielfalt der Gebäude ab.

Der Lehrstuhl ist eingebunden in das Schwerpunktprogramm "Exekutive Funktionen" der Deutschen Forschungsgemeinschaft, in die International Graduate School for Neuroscience der Ruhr-Universität Bochum sowie in den Forschungsverbund "NeuroNord".

### Literatur:

[1] Baddeley A.D., Working Memory. Clarendon, Oxford, 1986

Die vorgestellte PET Studie erscheint im Dezember 2002: Suchan, B. et.al., Behavioural Brain Research, Volume/Issue 136/2 pp. 533 - 544.