

Bilder vom Gehirn – Bilder im Gehirn

Wie funktioniert die bildhafte Vorstellung?

Mark W. Greenlee

Zusammenfassung

Bildhafte Vorstellungen entstehen, wenn wahrnehmungsbezogene Informationen aus dem Gedächtnis abgerufen werden. Dieser Abruf führt zu einem wahrnehmungsähnlichen Erlebnis. Im Englischen spricht man von »seeing with the mind's eye« oder von »hearing with the mind's ear«. Diese Studie bespricht die Ergebnisse aus kognitiv-psychologischen, kognitiven neurowissenschaftlichen und theoretischen Arbeiten über die visuelle Vorstellung. Mit Hilfe der funktionellen Magnetresonanztomographie werden aktivitätsabhängige Bilder von Gehirn aufgenommen, während sich Probanden bildhafte Vorstellungen machten. Die Ergebnisse dieser Studien werden in Zusammenhang mit der Imagery-Debatte und möglicher Theorien der bildhaften Vorstellungen diskutiert.

Einleitung

Bildhafte Vorstellungen sind uns alle sehr vertraut. An Hand eines Beispiels können die Funktionen von bildhaften Vorstellungen leicht demonstriert werden: Schließen Sie für einen Moment die Augen. Stellen Sie sich das Haus vor, in dem Sie als Kind aufgewachsen sind. Jetzt zählen Sie mit Hilfe dieser Vorstellung die Gesamtzahl der Räume in dem Haus. In Ihrem Geist gehen Sie durch das Haus und zählen zusätzlich alle Fenster in dem Haus auf. Sie sind nicht nur in der Lage, sich bildhaft das Elternhaus Ihrer Kindheit vorzustellen, sondern Sie können auch Operationen ausführen, um gestellte Aufgaben zu lösen. Das Beispiel spricht für die Mächtigkeit der bildhaften Vorstellungen an Hand autobiographischer Gedächtnisinhalte.

Was Sie bei solchen Übungen erleben, ist die bildhafte Vorstellung. Sie sind nicht nur in der Lage, sich grob etwas vorzustellen, sondern diese Vorstellungen sind detailliert, oft sogar verblüffend präzise. Die Detailinformationen reichen aus, um Operationen auszuführen. Die Tatsache, dass Sie – vielleicht zum ersten Mal – die Fenster des Elternhauses aufzählen konnten, spricht dafür, dass diese Informationen in einem bildhaften Format im Gehirn abgelegt wurden.

Wie kommen diese Bilder ins Gehirn, und wie ist es möglich, dass wir bestimmte Bilder aus unseren Erlebnissen lebenslang im Gedächtnis behalten können?

1 Stephen M. Kosslyn, Giorgio Ganis und William L. Thompson, »Neural foundations of imagery«,

in: *Nature Reviews Neuroscience*, 2, 9, 2001, S. 635–642.

Kosslyn, Ganis und Thompson¹ definieren in ihrem Aufsatz von 2001 mentale Vorstellung auf folgende Weise:

»Mental imagery occurs when perceptual information is accessed from memory, giving rise to the experience of ›seeing with the mind’s eyes‹, ›hearing with the mind’s ear‹ and so on. By contrast, perception occurs when information is registered directly from the senses. Mental images need not result simply from the recall of previously perceived objects or events; they can also be created by combining and modifying stored perceptual information in novel ways.«²

Die Autoren betonen, dass mentale Vorstellungen nicht nur einen passiven Abruf von bildhafter Information aus dem Gedächtnis beinhalten, sondern dass bei der Erzeugung von Bildern auch aktive kognitive Prozesse beteiligt sind.

Laut der *Stanford Enzyklopädie für Philosophie*³ wird die bildhafte Vorstellung (im Englischen: mental imagery) auf folgende Weise definiert:

Die bildhafte Vorstellung entspricht einem bewussten, wahrnehmungsähnlichen Erlebnis. Bildhafte Vorstellungen entsprechen dem Abruf visueller und räumlicher Gedächtnisinhalte. Weiter besagt die Enzyklopädie für Philosophie, dass die bildhafte Vorstellung eine bildhafte Repräsentation ist, die zu solchen bildhaften Erlebnissen führen.

Innere Repräsentation anderer Art, die zu bildhaften Erlebnissen führen, gehören ebenfalls zu bildhaften Vorstellungen. Wenn Sie bestimmten Gerüchen oder Düften ausgesetzt werden, die Sie an Erlebnisse aus dem eigenen Leben erinnern, können Sie diese Erinnerungen bildhaft erleben. Weiterhin besagt die Enzyklopädie:

»The belief that such mental representations are real is justified in the same sort of way that belief in the reality of electrons, or natural selection, or gravitational fields (or other scientifically sanctioned ›unobservables‹) is justified:

{1} quasi-perceptual conscious experience per se;

{2} hypothetical, picture-like representations in the mind and/or brain that give rise to {1};

{3} inner representations of any sort (picture-like or otherwise) that directly give rise to {1}.«⁴

Ein Geruch oder ein Geschmack von Speisen, die Sie als Kind gegessen haben, rufen bildhafte Erinnerungen aus dieser Zeit Ihres Lebens ab. Die Assoziationen sind multisensorisch und dauerhaft im Gedächtnis gespeichert.

Welche kognitiven Prozesse unterstützen unsere Fähigkeit, bildhafte Vorstellung zu erzeugen? Wie können wir diese Art von Vorstellungen verwenden, um Problemen zu lösen? Diese kognitiven Operationen lassen sich einteilen in Vorstellungsaufgaben, visuell-konstruktive Aufgaben und Aufgaben, die mentale Modelle zu Grunde legen.

Ansätze aus der Kognitiven Psychologie

Bei der Besprechung von Vorstellungsaufgaben werden im Folgenden zwei einschlägige Experimente im Detail beschrieben: die Uhrenversuche von Paivio⁵ und die Wegfindung

2 Ebd., S. 635.

3 Nigel J. T. Thomas, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*: <http://plato.stanford.edu/entries/mental-imagery/>, 2008 (zugriff am 24.05.2011).

4 Ebd.

5 Allan Paivio, »Comparisons of mental clocks«, in: *Journal of experimental psychology Human perception and performance*, 4, 1, 1978, S. 61–71.

mit Hilfe einer fiktiven Landkarte einer imaginären Insel von Kosslyn, Ball und Reiser.⁶ Bei den visuell-konstruktiven Aufgaben werden Beispiele von Papierfaltaufgaben, vom mentalen Scanning und von der mentalen Rotation dargestellt. Als letzten Punkt dieses Abschnitts werden die mentalen Modellen von Johnson-Laird⁷ besprochen, bei denen man vermutet, dass Wissen mit Hilfe visuell-räumlicher Modelle abgelegt wird und abrufbar ist.

Paivios Uhrenexperimente

Allan Paivio⁸ bat Probanden, sich zwei unterschiedliche Uhrzeiten auf analogen Uhren vorzustellen. Zum Beispiel hatten die Probanden zwei digitale Angaben 3 Uhr 20 und 7 Uhr 25 zu vergleichen. Die Aufgabe bestand darin, sich die Positionen der Stunden- und Minutenzeiger auf einem Zifferblatt vorzustellen, welche diese Uhrzeiten wiedergeben. Die Probanden sollten nun angeben, welche der beiden Zeiten einen kleineren Winkel zwischen den beiden Zeigern auf der analogen Uhr ergeben würde. Aufgaben mit verschiedenen Uhrzeitpaaren wurden durchgeführt, und die Reaktionszeiten für richtig gelöste Aufgaben wurden festgehalten.

Um den Einfluss des Vorstellungsvermögens auf die Testleistung zu erfassen, teilte Paivio seine Probanden in zwei Gruppen ein. Durch Fragebogen stellte er fest, dass etwa die Hälfte der Probanden ein niedriges Vorstellungsvermögen besaßen und die andere ein höheres. Die Schnelligkeit, mit der die Probanden die Aufgabe lösten, wurde festgehalten. Die Ergebnisse zeigten, dass die Probandengruppe mit einem guten Vorstellungsvermögen schneller war als die Gruppe mit dem niedrigen Vorstellungsvermögen.

Im selben Experiment führte Allan Paivio eine weitere Bedingung ein. Dabei hat er die ursprüngliche Digitaluhr-Bedingung durch zwei weiteren Bedingungen ergänzt: eine Analog-Bedingung und eine gemischte Bedingung. In der Analog-Bedingung wurden jeweils die Uhrzeiten visuell-analog dargeboten. In der gemischten Bedingung wurde die eine Uhrzeit analog, die andere Uhrzeit digital dargeboten. Die Aufgabe blieb dabei gleich, nämlich die eine Uhrzeit anzugeben, bei der Stunden- und Minutenzeiger den kleineren Winkel aufweisen. Dabei stellte er folgende Ergebnisse fest:

- 1) Die Probanden waren am schnellsten, wenn beide Uhrzeiten analog-visuell dargeboten wurden.
- 2) Die Probanden waren deutlich langsamer, wenn beide Uhrzeiten digital dargeboten wurden.
- 3) In der gemischten Bedingung, wo die eine Uhrzeit vom Typ ›analog‹, die andere Uhrzeit vom Typ ›digital‹ war, wurden Reaktionszeiten erfasst, die zwischen denen der beiden anderen Bedingungen lagen.

6 Stephen Kosslyn, Thomas M. Ball und Brian J. Reiser, »Visual images preserve metric spatial information: evidence from studies of image scanning«, in: *Journal of experimental psychology Human perception and performance*, 4, 1, 1978, S. 47–60.

7 Philip N. Johnson-Laird, »Mental models and deduction«, in: *Trends in cognitive sciences*, 5, 10, 2001, S. 434–442.

8 Paivio 1978 (s. Anm. 5).

Hinzu kommt eine wichtige Beobachtung: Nur bei der digitalen bzw. gemischten Bedingungen nahmen die Reaktionszeiten mit der Winkeldifferenz der beiden Zeigern ab. Diesen Effekt nennt man die »symbolic distance effect«. Bei diesem Effekt nimmt die Schwierigkeit der Aufgabe mit zunehmenden »Entfernungen« beziehungsweise Winkelgrößen ab (erkennbar zum Beispiel durch eine Abnahme der Reaktionszeiten), was für eine analoge (das heißt bildhafte) Repräsentation von Uhrzeiten auf einem Zifferblatt spricht. Allerdings ist der Effekt nicht bei der Analogbedingung erkennbar, weil hier die Winkel zwischen den beiden Zeigern unmittelbar durch die visuelle Wahrnehmung erfasst werden können.

Des Weiteren haben andere Autoren wie Juraj Kukolja, John Marshall und Gereon Fink im Jahr 2006,⁹ sowie auch Massimiliano Conson, Fausta Cinque und Luigi Trojano 2008¹⁰ festgestellt, dass bei den Vorstellungsbedingungen die Positionen der Zeiger auf dem Zifferblatt zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Wenn die Uhrzeiten zwischen 1 Uhr und 5:20 Uhr fallen, so sind die Zeiger im rechten Gesichtsfeldteil platziert, bei Uhrzeiten zwischen 6:40 Uhr und 11:50 Uhr logischerweise in der linken Gesichtsfeldhälfte. Man geht davon aus, dass zunächst die rechte Gesichtsfeldhälfte von linken Kortexhälfte verarbeitet wird und die linke Gesichtsfeldhälfte von der rechten Kortexhälfte (gekreuzte Repräsentationen der Gesichtsfeldhälften). Diese Ergebnisse zeigen, dass die Reaktionszeiten signifikant schneller waren bei Zeigerpositionen, die in der rechten Gesichtsfeldhälfte lagen, die folglich zuerst in der linken Hirnhemisphäre verarbeitet wurden. Diesen zeitlichen Effekt gab es nicht unter der Bedingung, bei der die Winkelvergleiche visuell durchgeführt werden konnten (siehe unten).

Kosslyns Inselversuche

Ein weiteres Beispiel für kognitive Aufgaben bei der Untersuchung der visuellen Vorstellung ist die Wegfindung oder Streckenmarkierung auf einer Landkarte von fiktiven Inseln. Hierbei wurden die Probanden aufgefordert, sich sieben fiktive Orte (sogenannte Landmarks) auf der Karte zu merken. Sie sollten sich zum Beispiel Punkte auf die Karte merken wie Haus, Hütte, Baum, See, Wald, Hafen, usw. Danach sollten die Probanden auf einem leeren Umriss von dieser Insel mental den Weg zwischen z. B. der Hütte und dem Hafen einzeichnen. Stephen Kosslyn, Thomas Ball und Brian Reiser¹¹ haben festgestellt, dass je weiter die zwei Punkte auf der Karte auseinander lagen, umso länger brauchten die Probanden, um zum Ziel zu kommen. Die Ergebnisse weisen auf einen »symbolic distance effect« hin, also auf eine analoge Kodierung der fiktiven Entfernungen. Der gleiche Effekt war bereits bei den Uhrenversuchen (siehe oben) erkennbar.

9 Juraj Kukolja, John Marshall und Gereon Fink, »Neural mechanisms underlying spatial judgments on seen and imagined visual stimuli in the left and right hemifields«, in: *men. Neuropsychologia*, 44, 14, 2006, S. 2846–2860.

10 Massimiliano Conson, Fausta Cinque und Luigi Trojano, »The two sides of the mental clock: the Imaginal HemiSpatial Effect in the healthy brain«, *Brain and Cognition*, 66, 3, 2008, S. 298–305.

11 Kosslyn 1978, (s. Anm. 6).

Visuell-konstruktive Aufgaben

Visuell-konstruktive Aufgaben für die bildhafte Vorstellung sind die so genannten mentalen Papierfaltaufgaben. Hier wird man aufgefordert zu entscheiden, ob sich beim Zusammenfalten eines ebenen Musters zu einem Würfel zwei angezeigte Pfeile treffen. Faltet man das Papier in der Vorstellung, so kommt man auf die richtige Lösung.

Auch bei anderen Experimenten konnte jeweils ein ›symbolic distance effect‹ gefunden werden, der auch wieder für die Analog-Coding-Theorie spricht. Im ›mental-scanning‹ Paradigma von Ronald Finke und Steven Pinker¹² prägten sich die Probanden zunächst eine abstrakte Punktanordnung ein und mussten dann nach Ausblendung der Punkte sagen, ob ein Pfeil, der erst danach erschien, auf einen der Punkte in der Anordnung wies oder nicht (Abb. 1a). Hier zeigte sich der ›symbolic distance effect‹ in der Form, dass die Probanden umso länger für ihre Entscheidung brauchten, je weiter der Pfeilspitze des Aufforderungsreizes von der tatsächlichen Position des entsprechenden Punktes entfernt war (Abb. 1b). Die Abbildung 1 zeigt ein Beispiel und die Ergebnisse für die Vorstellungs- und Wahrnehmungsbedingung. Der ›symbolic distance effect‹ drückt sich in dem starken Anstieg der Reaktionszeiten mit zunehmender Entfernung zwischen Punkt und Pfeil aus. Diese Beobachtung gilt allerdings nur für die Vorstellungsbedingung.

Shepards Mentale Rotationsaufgabe

Ein weiteres Paradigma, das häufig Verwendung in der Forschung zur bildhaften Vorstellung findet, ist die mentale Rotation. Roger Shepard hat das Paradigma zusammen mit Jacqueline Metzler im Jahr 1971¹³ erstmals vorgeschlagen. Bei diesem Experiment handelt es sich um zwei geometrische Figuren (Abb. 2a), die jeweils aus 10 zusammengesetzten Würfeln bestehen. Es gibt drei mögliche Kombinationen:

- (1) gleiche Objekte, wobei die rechte Figur entlang der fronto-parallelen Ebene rotiert wurde,
- (2) gleiche Objekte, wobei die rechte Figur in der Tiefe rotiert wurde, und
- (3) ungleiche Objekte, wobei die rechte Figur gespiegelt und rotiert wurde. Die Aufgabe bestand darin zu erkennen, ob die beiden jeweils dargestellten Würfelfiguren (bis auf die Rotation) identisch oder spiegelverkehrt waren.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in der Abbildung 2 aufgetragen. Sowohl Rotationen in der fronto-parallelen Ebene als auch Rotationen in der Tiefe führten zu Reaktionszeiten, die mit dem Winkel der Rotation anstiegen und somit einen ›symbolic distance effect‹¹⁴ zeigten. Entsprechende Ergebnisse wurden bei rotierten Buchstaben gefunden. Hier war die Aufgabe der Probanden festzustellen, ob der Grossbuchstabe R

12 Ronald Finke und Steven Pinker, »Spontaneous imagery scanning in mental extrapolation«, in: *Journal of experimental psychology Learning, memory, and cognition*, 8, 2, 1982, S. 142–147.

13 Roger Shepard und Jacqueline Metzler, »Mental rotation of three-dimensional objects«, in: *Science*, 171, 972, 1971, S. 701–703.

14 Ebd.

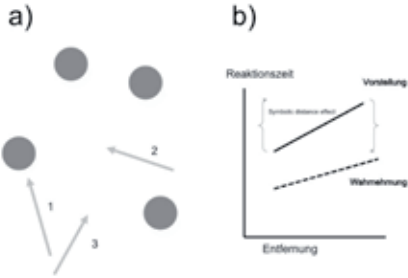


Abb. 1: a) Die experimentelle Anordnung in der Arbeit von Finke und Pinker 1982. Die vier Kreise wurden kurz geblitzt, und danach wurde jeweils einer der 3 Pfeile gezeigt. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, zu erkennen, ob der Pfeil auf einen Kreis zeigt oder nicht. b) Eine schematische Darstellung der Ergebnisse aus der Studie, in der die Reaktionszeiten als Funktion der Entfernung aufgetragen sind. Der symbolic distance effect drückt sich in der Steigung der Kurve aus

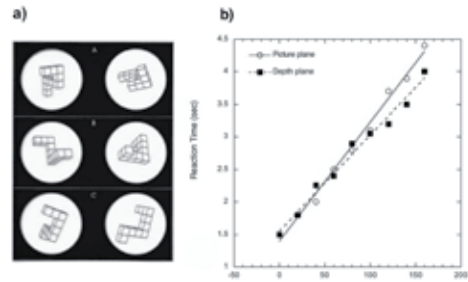


Abb. 2: Shepard's Figures und mentale Rotationen. A) Dabei waren drei mögliche Kombinationen: a) Gleiche Objekte, wobei die rechte Figur entlang der fronto-parallelen Ebene rotiert war. b) Gleiche Objekte, wobei die rechte Figur in der Tiefe rotiert wurde. c) Ungleiche Objekte, wobei die rechte Figur gespiegelt und rotiert war. B) Die Reaktionszeiten als Funktion der Rotation der rechten Figur.

gespiegelt oder nicht gespiegelt dargeboten wurde.¹⁵ Die Ergebnisse zeigten ebenfalls einen »symbolic distance effect«: Je weiter die Richtung des Buchstaben R von der Senkrechten (0 Grad) abwich – bis hin zu 180 Grad – umso länger waren die Reaktionszeiten. Offensichtlich führten die Probanden spontan eine mentale Rotation durch, obwohl sie hierzu gar nicht aufgefordert waren.

Theoretische Ansätze

Welche Theorien helfen uns nun, diese Ergebnisse zu verstehen? Die so genannte Diagramm-Theorie¹⁶ besagt, dass wir mit mentalen Modellen die Außenwelt abbilden, um logische Schlussfolgerungen besser verstehen zu können. Drei Prozesse werden dabei angenommen:

- 1) Comprehension: das heißt, die Prämissen müssen verstanden werden.
- 2) Combining and describing: Modellen werden kreiert und angewandt, um eine Schlussfolgerung zu erreichen.

15 Lynn A. Cooper und Roger Shepard, »Mental transformations in the identification of left and right hands«, in: *Journal of experimental psychology Human perception and performance*, 104, 1, 1975, S. 48–56.

16 Kenneth Craik, »The Nature of Explanation«, in: *Cambridge University Press*, 1943; Philip N. Johnson-Laird, »The history of mental models«, in: Ken Manktelow und Man Cheung Chung

(Hrsg.), *Psychology of Reasoning: Theoretical and Historical Perspective*, New York, 2004, S. 179–212; Charles Sanders Peirce, »Collected Papers of Charles Sanders Peirce«, Volumes. 1–6, 1931–1935, 1958), hrsg. von Charles Hartshorne and Paul Weiss, Volumes 7–8, Arthur W. Burks (Hrsg.), in: *Harvard University Press*, Cambridge/ Massachusetts, 1931–1935, 1958.

Abb. 3: Räumliche Probleme. Folgende Aufgaben werden gestellt: Die Lampe ist rechts vom Bleistiftetui. Das Buch ist links von der Lampe. Die Uhr ist vor dem Buch. Die Vase ist vor dem Bleistiftetui. Es gibt zwei zulässige Anordnungen für diese Prämissen a) zeigt die eine Anordnung und b) zeigt die andere. Die Probanden brauchen mehr Zeit, wenn mehr als ein Modell zulässig ist.



3) Validation. Eine Suche nach Gegenbeispielen oder Alternativmodellen wird gestartet. Probanden setzen vorläufige oder fehlerhafte Modelle ein, und diese führen dann zu Fehlern.¹⁷

Mentale Modelle

Johnson-Laird untersuchte mit Hilfe räumlicher Aufgaben deduktives Schlussfolgern.¹⁸ Mentale Modelle werden gebildet, um Prämissen zu verifizieren und zu einer gültigen Schlussfolgerung zu kommen (Abb. 3). Aus den folgenden räumlichen Prämissen sind zwei mögliche Anordnungen zulässig:

- Die Lampe ist rechts von dem Bleistiftetui.
- Das Buch ist links von der Lampe.
- Die Uhr ist vor dem Buch.
- Die Vase ist vor dem Bleistiftetui.

Probanden, denen solche Aufgaben gestellt werden, benötigten mehr Zeit, um zu antworten, wenn mehr als ein Modell zulässig ist. Die Kognitionspsychologie versucht, mentale Prozesse der bildhaften Vorstellung durch Reaktionszeitaufgaben zu erfassen. Die Ergebnisse dieser Forschung deuten auf bildhafte Prozesse hin bei der mentalen Vorstellung. Die Ergebnisse legen nahe, dass die bildhaften Vorstellungen unsere Kognition unterstützen. Visuell-konstruktive Aufgaben werden verwendet, um naive Probanden aufzufordern, mentale Prozesse an Hand von vorgestellten Repräsentationen durchzuführen. Mentale Modelle werden gebildet, um räumliche Aufgaben zu lösen!

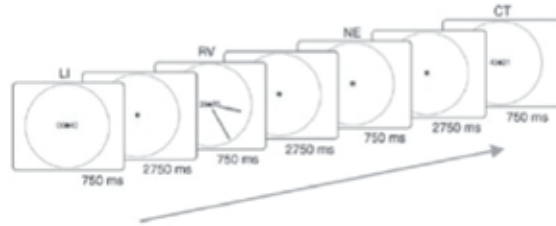
Forschungsansätze aus den kognitiven Neurowissenschaften

In der Regensburger Arbeitsgruppe werden mit Hilfe eines 3-Tesla Magnetresonanztomographie (MRT) Geräts die neuronalen Grundlagen der bildhaften Vorstellungen un-

17 Lance J. Rips, »Reasoning«, in: Douglas Medin (Hrsg.), *Steven's Handbook of Experimental*

Psychology, 3rd Edition, Volume 2, 2002, S. 363–411.

a)



b)

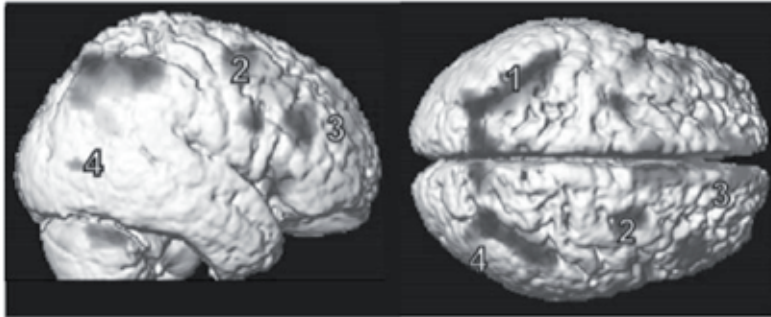


Abb. 4: Uhrenvergleiche mit Zeigerpositionen in der rechten und in der linken Gesichtsfeldhälfte: a) Beispiele von Reizanordnungen mit digitalen Angaben für Zeigerpositionen in der linken Gesichtsfeldhälfte (LI), mit analogen Zeigerpositionen in der rechten Gesichtsfeldhälfte (RV), mit Nulldurchgängen (NE) und mit Catch-Trials (CT), bei denen die angegebenen Zahlen keine Uhrzeiten darstellen. Um eine absolute Erkennung der Winkelpositionen für den jeweiligen Reiz zu ermöglichen, sollten die Probanden angeben, ob die Zeigerpositionen bei der Uhrzeit einen Winkel aufwiesen, der kleiner oder größer 90 Grad war. b) Gruppenergebnisse beim Kontrast $(RI+LI)>(RV+LV)$ – d.h. die Aktivierung bei der Vorstellung war höher als bei der Wahrnehmung, dies ist in roter Farbe. In grün dargestellt ist das Ergebnis für den Fall des Kontrastes $(RV+LV)>(RI+LI)$.

tersucht. Durch Verhaltensbeobachtungen während der MRT Messungen können die Reaktionen der Probanden detailliert festhalten werden.

Welche Ergebnisse sind bereits aus anderen Arbeitsgruppen bekannt? Die bereits oben zitierte Arbeit aus Jülich zeigt, wie das Gehirn auf Uhrenvergleiche reagiert. Der posteriore parietale Kortex reagiert deutlich mehr, wenn die Uhrvergleiche durch bildhafte Vorstellungen gelöst werden müssen.¹⁹ (Abb. 4) Hier haben wir ein Korrelat für die zusätzliche Zeit, die von Probanden benötigt wird, wenn die Uhrzeiten digital präsentiert wurden und sich die Zifferblattdarstellung bildhaft vorgestellt werden musste.

18 Johnson-Laird 2001, (s. Anm. 7).

19 Luigi Trojano, Dario Grossi, David E. J. Linden u.a., »Matching two imagined clocks: the functional anatomy of spatial analysis in the absence

of visual stimulation«, in: *Cerebral cortex*, 10, 5, New York 2000, S. 473–481, sowie Kukulja 2006, (s. Anm. 9).

TMS Studien

Transkraniale Magnetstimulation (TMS) ist ein Verfahren, welches das Gehirn räumlich und zeitlich selektiv durch die Schaltung von starken Magnetfeldern stimuliert. Mit TMS kann man im Gehirn kurzzeitig eine »virtuelle Läsion« setzen, um die Funktion dieser Hirnregion zu erforschen²⁰. Das Verfahren wurde von Kosslyn u.a.²¹ sowie von Kosslyn, Ganis und Thompson²² in zwei Bedingungen angewandt: Einmal wurde der Magnetpuls tatsächlich in den Schädel der Probanden hinein gezielt (Bedingung: *real TMS*), in einer anderen Bedingung wurde die Spule umgedreht, und der Puls richtete sich vom Gehirn der Probanden weg (Bedingung: *sham TMS*). Dabei sollten sich die Probanden Streifenmuster unterschiedlicher Länge, Breite und Orientierung vorstellen, welche sie sich während einer Lernphase eingeprägt hatten. Auf Anfrage sollten sie die Muster aus zwei der vier Felder miteinander bezüglich einer Reizdimension vergleichen. Verglichen mit einer Scheinstimulation, wo das Gehirn nicht stimuliert wurde, stiegen die Reaktionszeiten während der echten TMS oberhalb vom primären visuellen Kortex an. Es folgt daraus, dass die Probanden Probleme hatten, sich bildhaft die Muster erneut vorzustellen, wenn der visuelle Kortex beim Abruf aus dem Gedächtnis stimuliert wurde. Das Erstaunliche bei diesen Ergebnissen war, dass der Effekt bei einer Stimulation über dem primären visuellen Kortex am ausgeprägtesten war (das heißt bei der ersten cerebralen Schaltstation für die visuelle Verarbeitung).

Funktionelle MRT Untersuchungen

Slotnick, Thompson und Kosslyn²³ führten eine MRT-Arbeit durch, bei der eine Wahrnehmungsbedingung vorgegeben wurde, wo ein Schachbrettreiz in Uhrzeigersinn langsam rotiert (Abb. 5a), während die Probanden geradeaus auf einem zentralen Punkt zu schauen hatten. Die resultierenden Ergebnisse für zwei Probanden sind in der Abbildung 5b wiedergegeben. Die Farben spiegeln die Aktivierungen im visuellen Kortex wider, die bei den jeweiligen Positionen im Gesichtsfeld entstanden sind. In einer Vorstellungsbedingung wurde die Position nur leicht angedeutet. Dabei sollte die Probanden sich bildhaft vorstellen, dass der gleiche Reiz dargeboten würde wie der, der bei der Wahrnehmungsbedingung gezeigt wurde. Hier sollte die bildhafte Vorstellung eines langsam rotierenden Stimulus zu selektiven Aktivierungen im retinotopen Kortex führen, falls der primären Kortex an diesen Vorgängen beteiligt ist. Die Ergebnisse sind leider nicht einheitlich: Einige Personen zeigen die Effekte, einige zeigten nur bei der Wahrnehmungsbedingung Aktivierungen. Eine weitere Kontrollbedingung wurde eingesetzt, um die reine

20 Alvaro Pascual-Leone, Vincent Walsh und John Rothwell, »Transcranial magnetic stimulation in cognitive neuroscience—virtual lesion, chronometry, and functional connectivity«, in: *Current Opinion in Neurobiology*, 10, 2, 2000, S. 232–237.

21 Stephen Kosslyn und Alvaro Pascual-Leone u.a., »The role of area 17 in visual imagery: conver-

gent evidence from PET and rTMS«, in: *Science*, 284, 5411, New York 1999, S. 167–170.

22 Kosslyn 2001 (s. Anm. 1).

23 Scott D. Slotnick, William Thompson und Stephen Kosslyn, »Visual mental imagery induces retinotopically organized activation of early visual areas«, in: *Cerebral cortex*, 15, 10, New York 2005, S. 1570–1583.

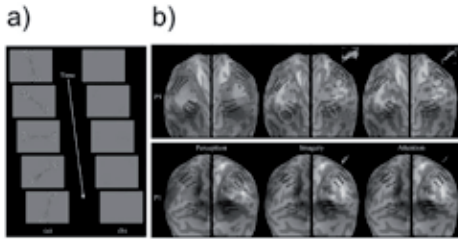


Abb. 5: a) Experimentelle Anordnung und b) funktionelle retinotopographische Darstellung der Aktivierungen im visuellen Kortex bei der Wahrnehmungsbedingung (links), bei der Vorstellungsbedingung (Mitte) und bei der Aufmerksamkeitsbedingung (rechts) für den Probanden 5 (oben) und dem Probanden 1 (unten).

Aufmerksamkeit der Probanden zu kontrollieren, welche jedoch zu nur geringfügigen bis hin zu keinen nennenswerten Aktivierungen bei den Probanden geführt hat. Erstaunlich ist, dass einige der Probanden starke Aktivierungen in V1 gezeigt haben, andere aber nicht. Die Abbildung 5 zeigt Ergebnisse von zwei Probanden.

Funktionelle MRT während der Mentalen Rotation und Räumlichen Aufgaben

In einer Studie mit Thomas Mulack und Roland Rutschmann in Freiburg²⁴ wurde eine fMRT Arbeit zur mentalen Rotation durchgeführt. Dabei stellten wir eine starke Aktivierung im posterioren parietalen Kortex fest. Im selben Areal, wo die Jülicher Arbeitsgruppe die Aktivierung bei vorgestellten Uhren fanden, stellten wir Aktivierungen bei der mentalen Rotation oben erwähnter Shepard Figures fest (Abb. 6). Kräftige Signalanstiege wurden während der mentalen Rotationsaufgaben (MR in Abb. 6c) festgestellt. Deutlich geringer waren die Anstiege, wenn die Personen lediglich eine Musterunterscheidung mit denselben Figures durchführen mussten. Die unterschiedlichen Ergebnisse sprechen für eine Rolle des posterioren parietalen Kortex bei den kognitiven Prozessen der mentalen Rotation. Vergleichbare Ergebnisse wurden von anderen Autoren wie Jordan oder Weigelt berichtet.²⁵ Hinzu kommt eine mögliche Rolle des prämotorischen Kortex, der bei der mentalen Rotationsaufgabe mit aktiviert wird.²⁶

Knauff u.a.²⁷ führten ein Paradigma durch, um die mentale Vorstellung an Hand von abstrakten Figures zu testen. Dabei wurden eine Wahrnehmungs- und eine Vorstellungsbedingung angewandt. Die Ergebnisse der Verhaltensdaten wiesen auf einen »symbolic distance effect« hin: Je näher das Quadrat an die Positionen, die von der Figur besetzt wurden, umso mehr Zeit brauchten die Probanden, eine richtige Antwort zu geben

24 Mark Greenlee, Thomas Mulack und Roland Rutschmann, »Neocortical areas underlying mental rotation and size constancy«, in: *Perception*, Suppl., 1999.

25 Kirsten Jordan, »Cortical Activations during the Mental Rotation of Different Visual Objects«, in: *NeuroImage*, 13, 1, 2001, S. 143–152, sowie Sarah Weigelt, Zoe Kourtzi, Wolf Singer u.a., »The cortical representation of objects rotating in depth«, in: *Journal of Neuroscience*, 27, 14, 2007, S. 3864–3874.

26 Wolfgang Richter u.a., »Motor area activity during mental rotation studied by time-resolved single-trial fMRI«, in: *Journal of cognitive neuroscience*, 2, 12, 2000, S. 310–320.

27 Markus Knauff, Jan Kassubek, Thomas Mulack und Mark Greenlee, »Cortical activation evoked by visual mental imagery as measured by fMRI«, in: *NeuroReport*, 11, 18, 2000, S. 3957–3962.

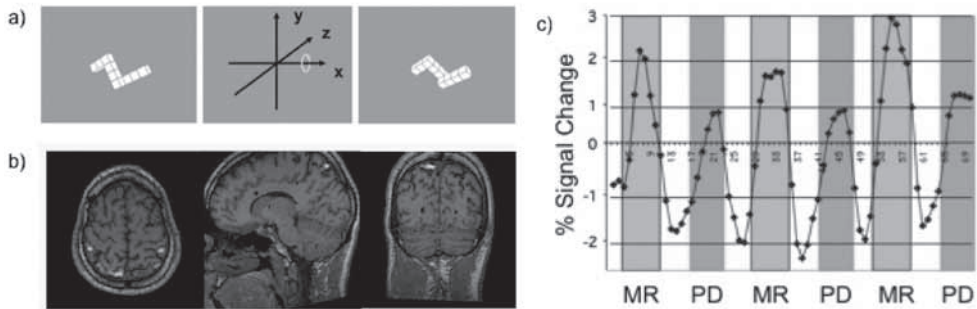


Abb. 6: a) Experimentelle Anordnung der Untersuchung zur mentalen Rotation von Mulack (1998, unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Freiburg). Shepard-Figuren wurden entlang der x-, y- und z-Achsen gedreht. Die Probanden sollten angeben, ob die beiden Figuren durch Drehung zur Deckung zu bringen waren oder nicht. b) ein Beispiel für fMRT-Aktivitäten in posterioren parietalen Arealen während der mentalen Rotation. c) Ein Zeitverlauf der Aktivierung im parietalen Kortex bei der mentalen Rotation (MR, grün), bei der Musterunterscheidung ohne Rotation (PD, rosa) und in Ruhe (weiss). Bei der Musterunterscheidung wurden zwei Würfelfiguren dargeboten, die entweder gleiche oder ungleiche Form hatten. Man erkennt, dass dieses Areal etwas mehr aktiv ist, wenn der Proband die mentale Rotation durchführt.

(das heißt, desto schwieriger war die Aufgabe für sie). Getestet wurde somit letztlich die räumliche Vorstellung. Die Hirnaktivitäten, die mit der Methode der funktionellen MRT gemessen wurden, sind in Abbildung 7 dargestellt. Es stellte sich heraus, dass vor allem die posterioren parietalen Gebiete (Brodmann-Areal 7) bei der Vorstellungsbedingung stärker aktiviert wurden. Diese Ergebnisse sprechen für eine Rolle von posterioren parietalen Kortexregionen bei der Bewältigung solcher mentalen Vorstellungsaufgaben. Im Gegensatz zu den Befunden von Kosslyn und Kollegen fanden wir nur geringfügige Aktivierungen im primären okzipitalen Kortex.

Eine PET-Studie von Sadato et al. (1996) hat Blinde mit Sehenden bei taktilen Diskriminationsaufgaben verglichen. Dabei stellten die Autoren eine starke Erhöhung der regionalen zerebralen Durchblutung im visuellen Kortex der Blinden fest. Bei den Sehenden wurde hingegen von einer Abnahme der rCBF berichtet. Die Ergebnisse deuten auf eine plastische Veränderung in den Gehirnen von Blinden hin, so dass offensichtlich der visuelle Kortex an der Verarbeitung von taktilen Reizen beteiligt ist. Vanlierde u.a.²⁸ untersuchten ebenfalls blinde Versuchspersonen in einem Experiment zur bildhaften Vorstellung. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, zu entscheiden, ob ein bestimmtes Muster von Elementen in einem 6 x 6-Gitter einem zuvor präsentierten Muster glich oder nicht. Sehende Probanden mit Augenbinden und Blinde tasteten Blockfiguren ab, um die Aufgabe zu bewältigen. Erblindete Probanden zeigen Aktivierungen im Gehirn, die mit denen von Normalsichtigen vergleichbar sind. Beide Gruppen zeigen Aktivierungen in posterioren parietalen Regionen, nicht aber im primären visuellen Kortex.

28 Annick Vanlierde, Anne De Volder, Marie-Chantal Wanet-Defalque u.a., »Occipito-parietal cortex activation during visuo-spatial image-

ry in early blind humans«, in: *NeuroImage*, 19, 3, 2003, S. 698–709.

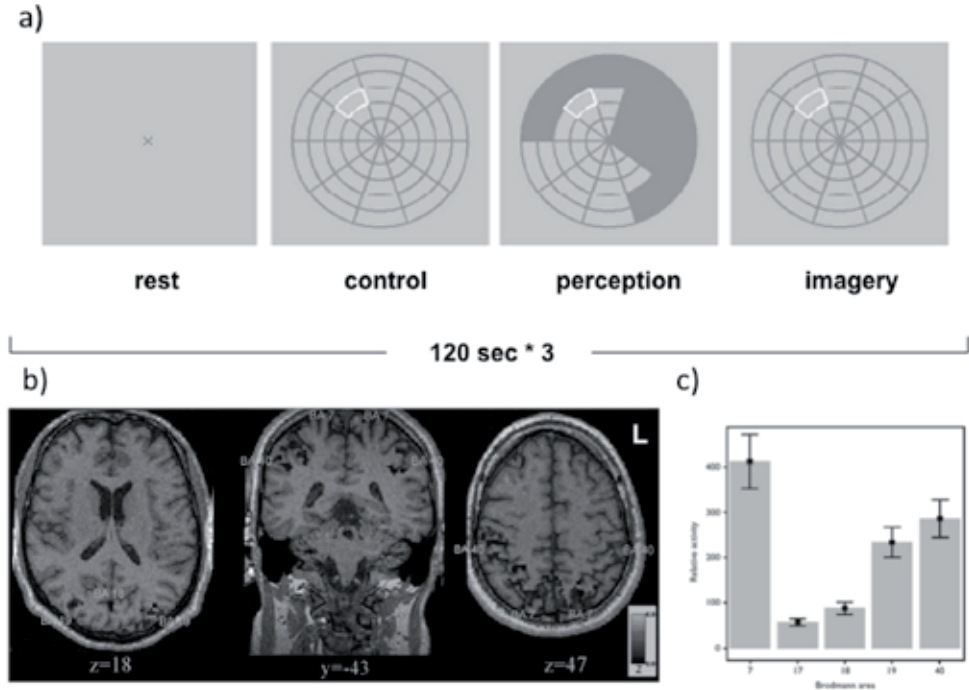


Abb. 7: a) Experimentelle Anordnung der Untersuchung zur bildhaften Vorstellung von Knauff u.a. (2000). Es gab vier Arten von Durchgängen: 1) Ruhe mit zentraler Fixation; 2) Kontrollbedingung mit Reaktionsaufgabe bei Präsentation des weißen Quadrats; 3) Wahrnehmungsbedingung mit Vergleich zur Baseline; 4) Vorstellungsbedingung mit Vergleich zur Baseline. Die Probanden sollten angeben, ob das weiße Quadrat innerhalb oder außerhalb des Bereichs aufleuchtete, wo die graue Fläche lag. b) Aktivierung des Gehirns bei der Vorstellungsaufgabe mit starken Aktivierungen im parietalen Kortex. c) Region-of-interest Analyse der Aktivierungen im primären (BA 17), extrastriären (BA 18,19) und parietalen (BA 7, 40) Kortex. Die Aktivierungen bei der bildhaften Vorstellung nehmen in parietalen Kortex deutlich zu.

Aus dem Gehirn ablesen: Erkennung von bildhaften Vorstellungen an Hand fMRT Aktivierungen

Zuletzt gehen wir auf die Ergebnisse aus einer neuen Arbeit von Kovacs u.a. ein.²⁹ Diese Autoren haben die Hirnaktivierung gemessen, die durch Computerdarstellungen von Gesichtern bzw. Händen ausgelöst wurden. Entweder waren die Bilder eindeutig ein Gesicht oder eine Hand oder drittens eine Mischung aus beiden. Bei derart gemischten Bildern fanden wir, dass die Probanden mal ein Gesicht, mal eine Hand gesehen haben. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in der Abbildung 8 links dargestellt. Die

²⁹ Gyula Kovacs, Czariki und Mark Greenlee, »Die Vorhersage mentaler Zustände und Sinneseindrücke durch Hirnaktivität«, in: *Blick in die*

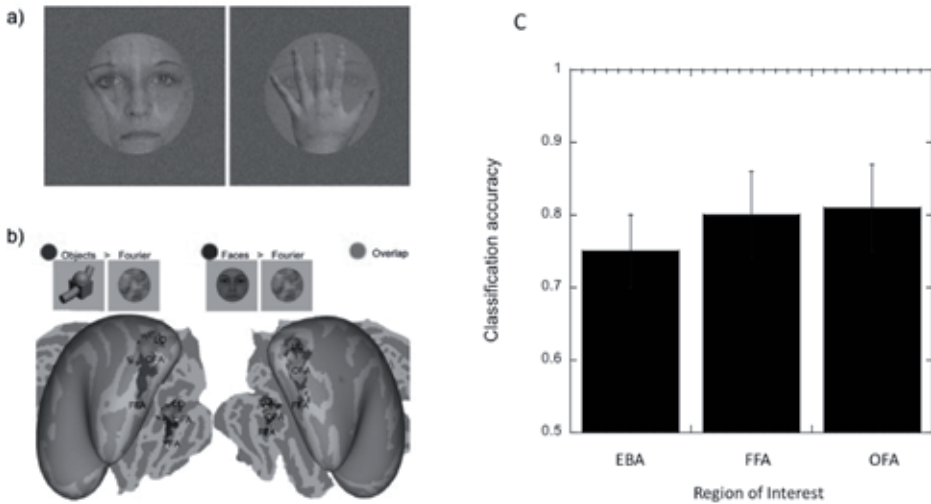


Abb. 8: a) Experimentelle Anordnung der Untersuchung zur Unterscheidung von ambigen Stimuli von Kovacs u.a. (2008). Die Reize waren Überlagerungen von 50% Gesicht und 50% Hand. Zu diesen Bildern wurde weißes Rauschen beigemischt, um die Erkennungsaufgabe zu erschweren. b) Region-of-interest Analysen von Arealen im ventralen visuellen Kortex, die selektiv auf Gesichter oder Objekte reagierten. FFA: Fusiform Face Area; OFA: Occipital Face Area; LO: Lateral Occipital Kortex. c) Klassifizierungsgenauigkeit einer Analyse mit Hilfe von Support vector machines. Die Algorithmen wurden an Hand der aktivierten Voxel (volume elements) nach Reizung mit Gesichts- und Handreizen trainiert und danach an ähnlichen Reizen getestet. Die Zuordnungen »Gesicht« bzw. »Hand« wurden überzufällig richtig der jeweiligen Reizklassen zugeordnet, je nach dem welche Region für die Klassifizierung heran gezogen wurde.

Hirnaktivierung bei der Betrachtung von Gesichtern, Händen oder Objekten sind hier farbig markiert. Die verschiedenen Farben geben gestuft die Höhe der Aktivierung an. Mit Hilfe einer multivariaten Analyse der Aktivierungen in diesen *regions-of-interest* wurde eine Klassifikation der Aktivität vorgenommen. Für jeden Durchgang wurden mit einer gewissen Genauigkeit die Entscheidungen der Probanden »vorhergesagt«. Wenn die Hirnaktivität einen zuverlässigen Zusammenhang mit den wahrgenommenen Bildern von Gesichtern, Händen und Mischbildern aufweist, dann sollten wir in der Lage sein, aus der Hirnaktivität den momentanen Wahrnehmungszustand des Probanden »abzulesen«. Diese Art von Gedankenlesen wurde bereits von anderen Forschern erfolgreich durchgeführt, zum Beispiel von Kamitani und Tong³⁰, von Haynes und Rees³¹, oder auch von Kay, Naselaris, Prenger und Gallant.³²

30 Yukiyasu Kamitani und Frank Tong, »Decoding the visual and subjective contents of the human brain«, in: *Nature Neuroscience*, 8, 5, 2005, S. 679–85.

31 John-Dylan Haynes und Geraint Rees, »Decoding mental states from brain activity in hu-

mans«, in: *Nature Reviews Neuroscience*, 7, 7, 2006, S. 523–34.

32 Kendrick N. Kay, Thomas Naselaris und Ryan Prenger u.a., Identifying natural images from human brain activity, in: *Nature*, 452, 7185, 2008, S. 352–355.

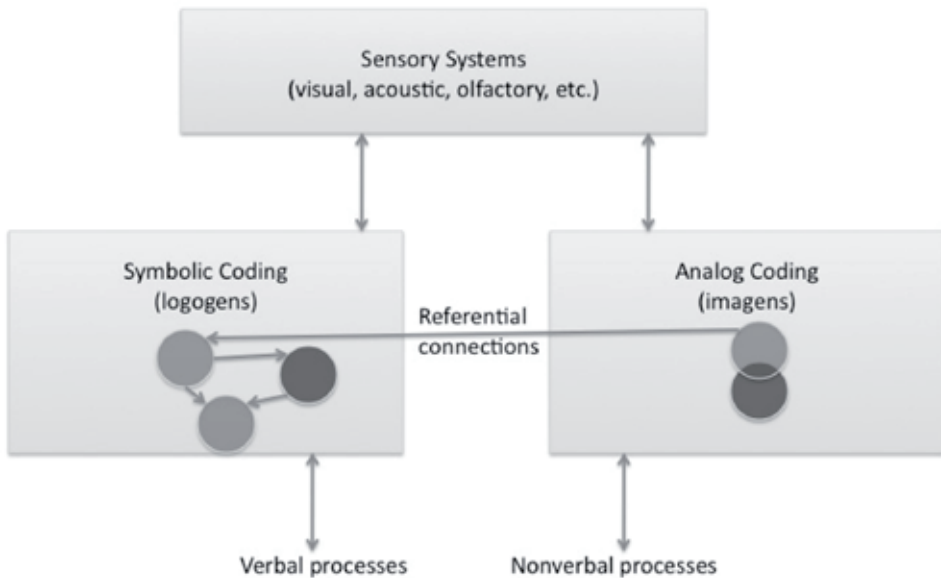


Abb. 9: Schematische Darstellung der »Dual-Coding« Theorie von Paivio (1986). Sensorische Afferenzen aus den Sinnessystemen gehen ein und bilden zwei Arten von Repräsentationen: symbolische Kodierungen bestehend aus »logogens« und analogen Kodierungen bestehend aus »imogens«. Logogens und Imogens sind untereinander verbunden und können miteinander durch so genannte »referential connections« quergebunden werden. Die verschiedenen Repräsentationsarten bilden die kognitiven Grundlagen für verbale bzw. nicht-verbale Prozesse.

Imagery Debatte

Die Uhrenvergleiche, die von Paivio und anderen Autoren durchgeführt wurden, wurden an Hand von der so genannten *Dual-Coding*-Hypothese erklärt. Die Theorie besagt, dass man Bilder zunächst in analoger Repräsentation (sogenannte *imgogens*) speichert und auch so abrufen, das heißt, dass man tatsächlich eine bildhafte Repräsentation vor seinem »inneren Auge« sieht. Diese analogen Repräsentationen bilden die kognitiven Grundlagen der nicht-verbale Erkennungs- und Kategorisierungsprozesse, der »nonverbal processes«. (Abb. 9) Diese Art von Repräsentation geht aber mit der Zeit über in eine symbolische Form, bei der man den Gedächtnisinhalt nicht mehr als Bild, sondern als Menge von mehr oder weniger abstrakten Symbolen (sogenannte *logogens*) speichert, die den Gedächtnisinhalt beschreiben. Die symbolische Kodierung ist die Basis unserer Fähigkeit, sensorisch Erlebtes in eine verbale Darstellung des Erlebten zu wandeln – »verbal processes«. (Abb. 9) Solche verbalen Prozesse sind die kognitiven Voraussetzungen für sprachliche Äußerungen über die Gedächtnisinhalte, die zunächst analog und danach symbolisch im Langzeitspeicher enkodiert wurden.

Analog Repräsentation	Propositionale Repräsentation
Visuelle Information wird bildhaft gespeichert	Visuelles Gedächtnis wird wie verbale Information gespeichert
Visuelles Gedächtnis verhält sich wie die Wahrnehmung	Visuelle Gedächtnis entspricht einer Beschreibung des Abbilds
Räumliche Verhältnisse sind implizit repräsentiert	Räumliche Verhältnisse sind explizit repräsentiert
Jedes Sinnessystem hat einen eigenen Speicher	Informationen aus den verschiedenen Sinnessystemen werden in gleicher Weise gespeichert

Abb. 10: Gegenüberstellung der Eigenschaften der Analog- und Präpositionalen Kodierung

Außer Paivio gab es aber auch Vertreter einer reinen Analog-Coding- beziehungsweise einer reinen Symbolic-Coding-Theorie. Zwischen diesen beiden Lagern entspannt sich die sogenannte Imagery Debate. Tabelle 1 stellt die Eigenschaften, die man der Analog- und der Präpositionalen Kodierung zuschreibt, denen der Präpositionalen Kodierung gegenüber. Symbolische Kodierung und propositionale Kodierung sind hier als austauschbare Begriffe zu verstehen. (Abb. 10) Kosslyn und Mitarbeiter vertreten die Ansicht, dass Bilder im Gehirn analog kodiert werden. Ähnlich wie bei der Wahrnehmung werden auch Gedächtnisbilder abgelegt und wieder abgerufen. Die Vertreter dieser Idee meinen, dass bei diesen Vorgängen durchaus primäre sensorische Kortexgebiete rekrutiert werden. Durch Top-down kognitive Prozesse, die man noch nicht vollständig versteht, werden bei den mentalen Vorstellungen von visuellen Repräsentationen ganze Populationen von Neuronen aktiv, die auch bei der Enkodierung solcher Bilder aktiviert werden. Somit haben Neuronen im sensorischen Kortex eine doppelte Funktion, indem sie Informationen von der Umwelt aufnehmen und verarbeiten und nachher beim Abruf wieder aktiv werden lassen.

Die Verfechter der propositionellen Kodierung bildhafter Informationen plädieren dagegen für eine symbolische Kodierung und Repräsentation. Die ursprünglich bildhaften Eindrücke werden im Gedächtnis in sprach-ähnlichem Format abgebildet. Die bildhafte Vorstellung, die man intuitiv beim Abruf erlebt, ist eine Art visueller Täuschung und hat mit der Art der Kodierung nichts gemeinsam.³³ Inzwischen gibt es viele Ergebnisse, die für eine analoge Kodierung sprechen, wobei Neuronen in Hirnarealen aktiv werden, wenn die Personen Bilder wahrnehmen oder sich bildhaft vorstellen.³⁴

Aussicht

Die referierten Studien sprechen für die Existenz von bildhaften Vorstellungen als Ausdruck bildhafter Speicherungsprozesse im Gehirn. Die Ergebnisse aus den Kognitions-

33 Zenon Pylyshyn, »Mental imagery: in search of a theory«, in: *The Behavioral and brain sciences*, 25, 2, 2002, S. 157–182 und S. 182–237.

34 Gabriel Kreiman, Christof Koch und Itzhak Fried, »Imagery neurons in the human brain«, in: *Nature*, 408, 6810, 2000, S. 357–361.

wissenschaften legen nah, dass Bilder zunächst analog kodiert werden. Hier werden die Mechanismen verwendet, die für die sensorische Verarbeitung der Reize ursprünglich eingesetzt wurden. Beim Abruf werden diese Informationen wieder in einen bildhaften Format zur Verfügung gestellt. Auf diese Weise können wir mit mentalen Bildern so umgehen, dass wir kognitive Aufgaben lösen können. Die bildhafte Vorstellung ist eine Eigenschaft von einem kognitiven System, das in der Lage ist, Bilder detailgetreu aufzunehmen, zu speichern und wieder abzurufen. Mit Hilfe neurowissenschaftlicher Forschungsansätze gewinnen wir Einblicke in die Funktionsweise, wie das menschliche Gehirn mit den unzähligen Bildern umgeht, die von uns im Leben aufgenommen werden.

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (FOR 1075, TP8), bei der BMBF (Projekte: Visuospatial Cognition, Perceptual Learning and Brain Plasticity) und bei der Europäischen Commission (FP6 Projekt: Decisions in Motion). Ebenfalls bedankt werden Herrn Werner Sowa und Dr. Matthias Gondan für Ihre Unterstützung beim Erstellen des Manuskripts.