

Die visuelle Wahrnehmung ist ein aktiver Prozess, bei dem unser Gehirn die von den Augen aufgenommene Information vielfältig wandelt und selektiert. Diese Vorgänge werden ganz wesentlich durch Aufmerksamkeit gesteuert. Die kürzlich etablierte Abteilung Kognitive Neurowissenschaften am Deutschen Primatenzentrum in Göttingen erforscht in Kooperation mit Psychologen, Physikern und Klinikern der Georg-August-Universität und der Göttinger Max-Planck-Institute die neuronalen Grundlagen des Aufmerksamkeitsystems. Diese Grundlagenforschung könnte langfristig Beiträge zur Verbesserung von Therapie- und Behandlungsansätzen bei einer Vielzahl psychologischer, psychiatrischer und neurologischer Erkrankungen des Aufmerksamkeitsystems, darunter auch der Aufmerksamkeitsdefizit-Hyperaktivitätsstörung (ADHS) bei Kindern leisten.

## Systeme der Selektion

Der Einfluss von Aufmerksamkeit auf die visuelle Wahrnehmung

**Stefan Treue**

### Unser Sehvermögen als evolutionäre Glanzleistung

Das visuelle System von Primaten und damit auch das des Menschen, ist eine evolutionäre Glanzleistung, denn als Allround-System kann es in einer Vielzahl von Situationen und unter sehr unterschiedlichen Nutzungsbedingungen Höchstleistungen erbringen. Diese Fähigkeit spiegelt die zentrale Rolle wider, die es für die Aufnahme und Analyse von Informationen aus der Umwelt hat. Dabei werden die Spitzenleistungen, die manche Tiere durch Spezialisierung realisiert haben, zwar nicht erreicht, einige Beispiele sollen dennoch die Leistungsfähigkeit des menschlichen Sehens verdeutlichen.

Ein wichtiges Maß für die Sehleistung ist die Auflösung, also die Fähigkeit, kleinste Strukturen unterscheiden zu können. Unter optimalen Bedingungen und im zentralen Blickfeld liegt diese beim Menschen bei etwa einem Sehwinkelgrad. Bei bester Sehfähigkeit lässt sich beispielsweise ein Muster aus einem Millimeter breiten schwarzen und weißen Streifen noch aus einer Entfernung von sieben Metern von einer gleichmäßig grauen Fläche mit derselben durchschnittlichen Helligkeit unterscheiden. Bei einem offenen C (Landold-Ring)

mit einem Durchmesser von drei Zentimetern ist eine nur sechs Millimeter große Lücke noch aus einer Entfernung von über 15 Metern sichtbar. Bei bewegten Reizen können wir Bewegungsrichtungen unterscheiden, die nur um ein Grad voneinander abweichen, das heißt, man kann die Neigung einer Bewegung, der man auf Armlängenabstand für wenige Zentimeter folgt, gegenüber der perfekten Horizontalen erkennen, wenn sie nur einen einzigen Millimeter an Höhe gewinnt oder verliert. Ähnlich beeindruckend ist die Fähigkeit unseres visuellen Systems, unter extrem unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen zu funktionieren. So gelingt ein Spaziergang bei Vollmond ebenso wie auf einem von der Sonne beschieneenen Schneefeld, obwohl die Helligkeit der Vollmondnacht weniger als ein Millionstel der des Schneefeldes beträgt.

Das weite Spektrum seiner Leistungen erbringt das visuelle System durch die Kombination von hoch entwickelten Augen mit einem hoch entwickelten Nervensystem. Das Auge selbst kann in seinem Aufbau mit einer Kamera verglichen werden: eine Hornhaut, die das Licht bündelt, eine Pupille, die die Menge des einfallenden Lichtes kontrolliert, eine

Linse, die das Bild scharf stellt und eine Netzhaut, auf der das einfallende Bild abgebildet wird. Jede unserer beiden Netzhäute enthält dabei über 100 Millionen Photorezeptoren, die die visuellen Informationen aufnehmen und in Nervensignale umsetzen.

### Keine vollständige und korrekte Abbildung der Umwelt

Diese Leistungsfähigkeit des visuellen Systems legt die Schlussfolgerung nahe, dass der Vorteil, den ein Organismus von einem einer Fotografie ähnlichen, möglichst korrekten und kompletten Abbild der Umwelt hat, die evolutionäre Entwicklung bestimmt. So einleuchtend diese Hypothese ist, so trifft sie überraschenderweise in keinem der beiden Aspekte, also weder für die Korrektheit noch die Vollständigkeit des Abbildungsvorganges, zu. Vielmehr verdeutlichen eine Vielzahl von Illusionen und Fehlwahrnehmungen, dass das visuelle System die aufgenommenen Informationen in vielfältiger Weise abwandelt (siehe Abb. 2). Diese Veränderungen dienen dazu, die Wahrnehmung relevanter Informationen zu verbessern. Durch diese Abweichungen von einer fotografischen Abbildung unserer Umwelt erhöhen sich unsere Überlebenschancen, von einer korrekten Wahrnehmung kann aber keinesfalls gesprochen werden. Auch die Annahme, dass es dem visuellen System darum geht, eine möglichst komplette Repräsentation unserer Umwelt darzustellen, muss aufgegeben werden. Vielmehr wird der allergrößte Teil der von unseren Au-





## Abbildungen

Es handelt sich um eine Fehleinschätzung, wenn wir glauben, dass unser visuelles System alle Eindrücke aus unserer Umwelt auch verarbeitet. Bei den beiden Bildpaaren dieses Artikels bedarf es so eines sorgfältigen Abgleichs verschiedener Bildbereiche, um die jeweilige Veränderung zu bemerken. Dies ist ein Hinweis darauf, dass das interne Abbild unserer äußeren Umwelt nur eine grobe Skizze ist und wir uns detaillierte Informationen nur bei Bedarf durch eine entsprechende Ausrichtung unserer Aufmerksamkeit holen.

Fotos: Stefan Treue

gen aufgenommenen Informationen nicht verarbeitet. Dass unsere Wahrnehmung der Umwelt sehr unvollständig ist, entspricht zwar nicht unserem alltäglichen Eindruck, lässt sich aber leicht nachweisen (siehe Abbildungen). Die Lückenhaftigkeit unserer Wahrnehmung wird uns dabei von unserem Gehirn vorenthalten, der Alltagseindruck einer umfassenden Repräsentation der Umwelt erweist sich als Illusion.

## Konzentration auf relevante Informationen

Um die aufgenommene Information auch verarbeiten zu können, ist die Entwicklung von leistungsfähigen Sinnesorganen wie dem menschlichen Auge mit der Weiterentwicklung von Verarbeitungskapazitäten und -techniken des Gehirns einhergegangen. Die Natur hat dabei zwei Strategien eingesetzt. Zum einen verfügen vor allem Primaten über eine stark entwickelte Großhirnrinde. Doch für eine komplette Analyse

der Informationsflut ist selbst ein Gehirn von der Größe des menschlichen nicht ausreichend. Das zeigt sich beispielsweise in der Schwierigkeit, bestimmte Unterschiede zwischen zwei Bildern zu finden. Zum anderen hat sich ein System der Selektion ausgebildet: die Aufmerksamkeit. Damit können wir die Verarbeitungskapazitäten des Gehirns auf den Bruchteil der aufgenommenen Informationen konzentrieren, der zu einem gegebenen Zeitpunkt für den Organismus relevant ist. Denn nicht die vollständige Verarbeitung aller Informationen ist für das Überleben wichtig, sondern die Verarbeitung relevanter Information.

Fast poetisch beschreibt 1890 der berühmte Psychologe William James (1842 bis 1910) die Aufmerksamkeit: »Jeder weiß, was Aufmerksamkeit ist. Es ist die Besitzergreifung des Geistes, in klarer und lebendiger Form, durch eine von vielen scheinbar gleichzeitig möglichen Objekten oder Gedankengängen. Fokussierung, Konzentration des Bewusstseins sind seine Essenz. Aufmerksamkeit impliziert die Abwendung von einigen Dingen, um mit anderen effektiver umgehen zu können.«

Das Aufmerksamkeitssystem lässt sich in die »willentliche« und »automatische« Aufmerk-

samkeit unterteilen. Die willentliche Aufmerksamkeit befähigt uns, uns auf Informationen zu konzentrieren, die gerade wichtig erscheinen. Im Allgemeinen ist das ein bewusster Prozess, der im visuellen System dazu führt, dass wir unseren Blick dem Objekt unserer Aufmerksamkeit zuwenden. Damit fällt das Bild des Objekts in einen Bereich der Netzhaut, in dem die Auflösung am besten ist, und wir können daher die größtmögliche Menge an Informationen über das Objekt gewinnen. Aber diese Konzentration geht zu Lasten der sensorischen Informationen außerhalb unseres Aufmerksamkeitsfokus. Damit dies nicht dazu führt, dass wir für andere wichtige Ereignisse blind werden, geht die automatische Aufmerksamkeit Hand in Hand mit der willentlichen Aufmerksamkeit.

Die automatische Aufmerksamkeit wird immer dann aktiviert, wenn ein besonders auffälliges oder von seiner Umgebung abweichendes Objekt oder Sinnesindruck auftaucht oder eine entsprechende Änderung in der Umwelt auftritt. Dieser Sinnesindruck zieht dann die Aufmerksamkeit automatisch auf sich. Wichtig ist dabei aber weniger die absolute Stärke des Reizes als vielmehr der Unterschied zum restlichen Reizumfeld. Deshalb kann die automatische Aufmerksamkeit schon durch das leise Geräusch eines tropfenden Wasserhahns ausgelöst werden, wenn es in einer ansonsten stillen Umgebung auftritt. Das gleiche Prinzip machen sich Polizei und Rettungsdienste mit dem Martinshorn zu Nutze.

Die Leichtigkeit, mit der sich der Einsatz von Aufmerksamkeit im Alltag beschreiben lässt, täuscht über die Tragweite dieses Systems und die Komplexität seiner Umsetzung im Gehirn hinweg. Denn das Gehirn muss imstande sein, die Informationsverarbeitung, abhängig von den je-

weiligen Verhaltensbedingungen, so zu selektieren und zu modulieren, dass im Wesentlichen nur die Informationen aus dem Aufmerksamkeitsfokus weiterverarbeitet werden.

### Wahrnehmung als Interaktionsprodukt

Die komplexe Interaktion des sensorischen Systems mit dem Aufmerksamkeitssystem ist der Forschungsschwerpunkt der Abteilung Kognitive Neurowissenschaften am Deutschen Primatenzentrum in Göttingen. Wir untersuchen in Kooperation mit Wissenschaftlern der Georg-August-Universität diese Interaktion an dem Teil des visuellen Systems, der für die Wahrnehmung von visuellen Bewegungsinformationen zuständig ist. Es handelt sich dabei um eine Kette von Arealen in der Großhirnrinde, die besonders viele Nervenzellen enthalten, die selektiv auf visuelle Bewegungen im Gesichtsfeld reagieren. Dabei ist jede Zelle nur für einen kleinen Ausschnitt des Blickfeldes zuständig, der als »rezeptives Feld« bezeichnet wird. Die Summe aller rezeptiven Felder bildet dabei ein Mosaik, das die Wahrnehmung des kompletten Blickfeldes sicherstellt. Dabei werden die so genannten richtungsselektiven Zellen durch bewegte Reize aktiviert, die in das rezeptive Feld dieser Zelle fallen.

Wie schon William James feststellte, geht die Zuwendung von Aufmerksamkeit auf etwas mit ihrer Abwendung von etwas anderem einher. Wir sprechen daher von selektiver Aufmerksamkeit. Wenn Aufmerksamkeit bei der Wahrnehmung von visuellen Bewegungen eine Rolle spielt, dann sollte eine Verteilung von Aufmerksamkeit auf mehrere Bewegungen dazu führen, dass auf die einzelne Bewegung weniger dieser kostbaren Ressource entfällt. Dies wiederum würde die Wahrnehmung gegenüber der Situation schwächen, in der alle Auf-



merksamkeit auf einen einzelnen Reiz gelenkt wird. Wir haben diese Fragestellung mit Leistungsmessungen untersucht, indem wir Versuchspersonen auf einem Computerbildschirm einen zentralen Punkt, den Fixationspunkt, sowie zwei bewegte Muster präsentiert haben. Wenn die Versuchspersonen aufgefordert waren, beide Bewegungsrichtungen zu beurteilen, war die Genauigkeit ihrer Wahrnehmung reduziert. Wenn Ihnen jedoch vorher mitgeteilt wurde, dass nur jeweils eine Bewegung relevant sei, zeigten unsere Messungen präzisere Wahrnehmungsleistungen. Zusammen mit den Daten aus anderen Studien zeigen diese Ergebnisse, dass zwar Spitzenleistungen bei der Bewegungswahrnehmung nur mit Aufmerksamkeit möglich sind, dass aber auch ohne Aufmerksamkeit eine grobe Bewegungswahrnehmung stattfindet. Möglicherweise handelt es sich bei dieser Restwahrnehmung um das oben erwähnte automatische System, das uns zum Beispiel darauf hinweist, dass beim Autofahren vor uns plötzlich ein Ball auf die Straße rollt. Die genaue Richtung spielt in einer solchen Situation eine geringe Rolle, die Wahrnehmung der Bewegung an sich verhindert aber möglicherweise einen Unfall.

Die Untersuchung von Wahrnehmungsleistungen bei Versuchspersonen ist nur ein erster Schritt hin zu einem grundlegenden Verständnis der Interaktion von Aufmerksamkeit und Wahrnehmung. Wir wollen auch einen Einblick in die zu Grunde liegenden neuronalen Mechanismen gewinnen. Die Abteilung Kognitive Neurowissenschaften untersucht daher die Gehirnprozesse, die der Aufmerksamkeit zu Grunde liegen. Dazu trainieren wir Rhesus-Affen und stellen ihnen visuelle Aufgaben, die denen der Versuchspersonen ähneln. Mit elektrophysiologischen Methoden lässt sich die Aktivität einzelner Nervenzellen während der Durchführung dieser Aufgaben bestimmen. Wir gehen dabei der Frage nach, ob und - wenn ja - wo im Gehirn der Aufmerksamkeitszustand die Reaktion von Nervenzellen auf einen visuellen Reiz beeinflusst. Diese und ähnliche Untersuchungen haben wesentliche Fortschritte in unserem Verständnis der Wahrnehmung gebracht. So ist durch vergleichende Untersuchungen verschiedener Hirnareale klar geworden, dass Aufmerksamkeit in die Verarbeitung sensorischer Informationen schon bei sehr frühen Verarbeitungsschritten eingreift. Bei der Analyse der Um-

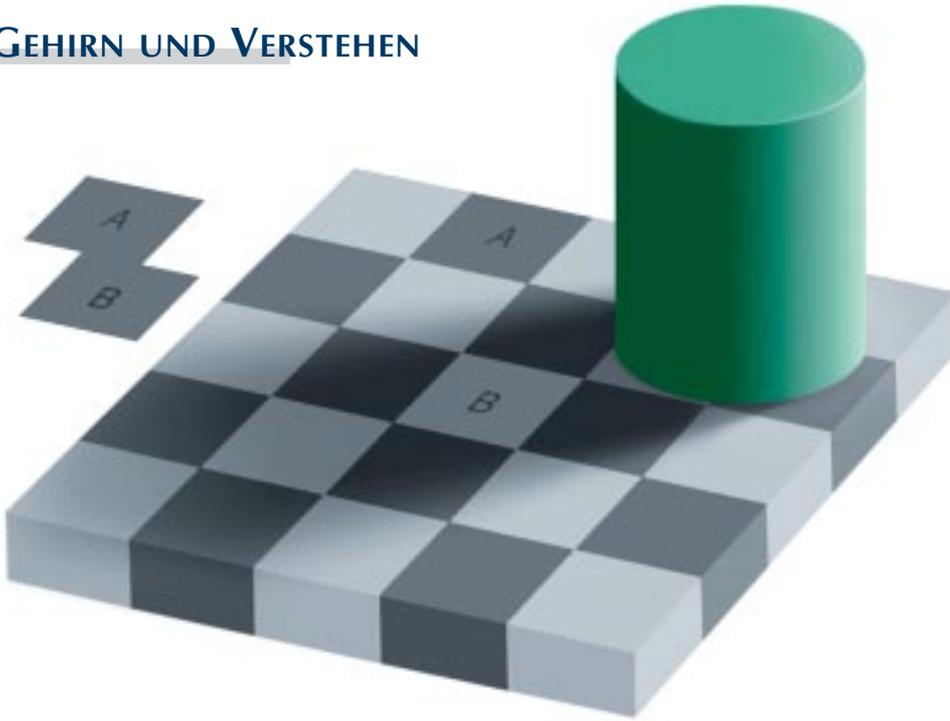


Abb. 2  
Optische Illusionen als Hinweise auf eine aktive Veränderung unserer Wahrnehmung durch das Gehirn. Die Abbildung ist ein Beispiel für eine solche Veränderung anhand der Fähigkeit des Gehirns, in unserer Wahrnehmung eine automatische Korrektur für zufällige Lichtverhältnisse (hier durch Schattenswurf) durchzuführen, um die Hell-Dunkel-Muster von Objekten korrekt wahrnehmen zu können. So nehmen wir das Schachbrettmuster als normal wahr, d. h. alle dunklen und alle hellen Quadrate erscheinen uns jeweils von gleicher Helligkeit, obwohl der Schatten des Zylinders solch große Helligkeitsunterschiede erzeugt, dass alle vier mit Buchstaben markierten Quadrate die selbe Lichtmenge reflektieren. Grafik: E. A. Adelson und Stefan Treue

welt wird der Organismus also immer von seinen eigenen Annahmen und kognitiven Fähigkeiten beeinflusst. Zu einer *objektiven* Auswertung unserer Umgebung sind wir nicht fähig. Angesichts der zentralen Rolle von kognitiven Einflüssen auf die Verarbeitung von Sinneseindrücken

wird klar, warum Störungen des Aufmerksamkeitssystems zu grundlegenden Wahrnehmungsstörungen führen.

Wir konnten mit unseren elektrophysiologischen Untersuchungen zeigen, dass die Einflüsse von Aufmerksamkeit sowohl räumliche Aufmerksamkeit, das heißt, die Ausrichtung von Aufmerksamkeit auf eine bestimmte Position in der Umwelt, als auch eigenschaftsbasierte Aufmerksamkeit, das heißt, die Verteilung von Aufmerksamkeit im Raum auf der Suche nach bestimmten Reizeigenschaften wie Farbe oder Bewegungsrichtung, repräsentieren. Die eigenschaftsbasierte Aufmerksamkeit nutzen wir, wenn wir eine visuelle Suche durchführen und nach einem bekannten Objekt in einer Szene mit vielen anderen Objekten suchen. Dabei verstärken die neuronalen Mechanismen von Aufmerksamkeit all jene Objekte, die dem gesuch-

## Göttinger Zentrum für Neurobiologie des Verhaltens (ZNV)

(red.) Das Göttinger Zentrum für Neurobiologie des Verhaltens (ZNV) der Georg-August-Universität Göttingen verbindet Forschungseinrichtungen und Arbeitsgruppen aus den Fakultäten Biologie, Humanmedizin und Physik mit Abteilungen des Deutschen Primatenzentrums und den drei Max-Planck-Instituten für biophysikalische Chemie, experimentelle Medizin und Strömungsforschung. Im Mittelpunkt der Forschungen am ZNV, das im letzten Jahr gegründet wurde, stehen die biologischen Grundlagen des menschlichen und tierischen Verhaltens ausgehend von einzelnen Neuronen und deren Verbindungen zu funktionellen Netzwerken. Zur mentalen Initiierung, Planung

und Durchführung von Verhalten stehen dem Organismus instinktive, automatische und kognitive Funktionen zur Verfügung. Dazu zählen Wahrnehmung, Lernen, Aufmerksamkeits- und Gedächtnisleistungen, sowie motorische Programme. Diese Funktionen haben ihre neurobiologischen Entsprechungen im Nervensystem beziehungsweise setzen sich aus Einzelleistungen zusammen, die in unterschiedlichen Gehirnarealen lokalisiert sind. Um derart komplexe Fähigkeiten und Systeme verstehen zu können, ist ein multidisziplinärer Ansatz erforderlich, der vor allem für die system-orientierten Neurowissenschaften von zentraler Bedeutung ist. Es soll eine Brücke

geschlagen werden zwischen molekular-genetischen Ansätzen, neurobiologischer Forschung an wirbellosen Tieren und Primaten sowie der Erforschung menschlicher Hirnleistungen, wie sie in der Psychologie, beispielsweise bei der Erforschung von Lern- und Gedächtnisleistungen, oder in der Psychiatrie erfolgt.

In der Lehre sind außerdem die Weichen gestellt, im Rahmen des ZNV einen neuen internationalen Studiengang Systems Neurosciences zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses einzurichten. Dies geschieht in enger Koordination mit bestehenden Strukturen – beispielsweise dem internationalen Intensivstudiengang Neurosciences.

ten besonders ähnlich sehen, und reduzieren gleichzeitig die Verarbeitung der unähnlichen Objekte. Diese Kombination aus Verstärkung einerseits und Abschwächung andererseits wirkt dabei wie ein Scheinwerfer, der Objekte in seinem Lichtkegel sichtbar macht, indem er deren Helligkeit gegenüber dem Hintergrund anhebt. So entsteht eine Repräsentation der Umwelt im Gehirn, die eine Kombination der von den Rezeptoren eingehenden Signale mit der momentanen Erwartungs- und Interessenlage des Organismus ist. Auch wenn uns diese Interaktionen selten bewusst wer-

den, laufen sie ständig ab. Ein Effekt dieser selektiven Wahrnehmung ist die in den Spielplatz-Fotografien visualisierte Schwierigkeit, Veränderungen in unserer Umwelt zu bemerken, wenn das Objekt oder der Bildbereich nicht zuvor bereits unsere Aufmerksamkeit auf sich gezogen hat.

#### Ausblick und Kooperationen

Ein weiterer Hinweis auf die zentrale Bedeutung des Einflusses von Aufmerksamkeit auf die Wahrnehmung ist die Vielzahl neurologischer und psychiatrischer Erkrankungen, bei denen das Aufmerksamkeitssystem ge-

schädigt ist. Eine erfolgreiche Therapie solcher Erkrankungen ist ohne das Verstehen der Funktionsweise des Aufmerksamkeitssystems kaum denkbar. Im Rahmen des interdisziplinären Zentrums für die Neurobiologie des Verhaltens (ZNV) werden Wissenschaftler der Abteilung Kognitive Neurowissenschaften des Primatenzentrums mit Kollegen der Universitätsklinik zusammenarbeiten und Kinder, die an der Aufmerksamkeitsdefizit-Hyperaktivitätsstörung (ADHS) leiden, sowie Patienten mit neurologischen Ausfällen, wie sie unter anderem durch den Verlust von Hirnfunktionen nach einem Schlaganfall auftreten, untersuchen. Auf dem Gebiet der Physik und Mathematik bestehen zudem Kooperationen mit der Universität und den Göttinger Max-Planck-Instituten. Mit modernsten Bildgebungsverfahren kann die Verteilung von Hirnaktivität über die Großhirnrinde gemessen werden, während die Versuchspersonen Aufmerksamkeitsaufgaben lösen. Weitere gemeinsame Aktivitäten bestehen auf dem Gebiet der so genannten Computational Neuroscience, dem Bereich der Neurowissenschaften, in dem mit Hilfe von mathematischen Modellen elektro-physiologische Daten interpretiert werden können, aber auch Hypothesen über die experimentell zu erwartenden Aufmerksamkeitseffekte entwickelt werden. ◀



*Prof. Dr. Stefan Treue, Jahrgang 1964, studierte Biologie in Frankfurt (Main), Heidelberg und an der Duke University, Durham (USA). Er promovierte 1992 am Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (USA), und war anschließend am Baylor College of Medicine, Houston (USA), tätig. 1995 wurde Prof.*

*Treue Nachwuchsgruppenleiter an der Neurologischen Universitätsklinik Tübingen und habilitierte sich im Jahr 2000. Seit 2001 ist Prof. Treue Direktor des Deutschen Primatenzentrums in Göttingen und leitet die Abteilung Kognitive Neurowissenschaften. An die Georg-August-Universität wurde er zum Professor für Kognitive Neurowissenschaften und Biopsychologie berufen. Prof. Treue ist Sprecher des Zentrums für die Neurobiologie des Verhaltens (ZNV).*

Visual perception is an active process in which the brain modulates and filters the information delivered by our sensory organs. This is necessary because the amount of information provided by the eyes far exceeds our ability for processing. Furthermore most of the information is irrelevant at a given moment. We therefore use attention as a powerful selection mechanism that concentrates our limited processing resources on the most relevant information. The Cognitive Neuroscience Laboratory at the German Primate Center uses psychophysical measurements of human perceptual abilities together with electrophysiological investigations of the activity of individual nerve cells in the cortex of

rhesus monkeys performing complex visual tasks to determine the perceptual consequences of attention and to understand the neuronal mechanism underlying attentional modulation of sensory information processing. This work is done in collaboration with clinicians, psychologists and physicists from the Georg-August-University as well as the Max-Planck-Institutes in Göttingen. Many psychiatric and neurological diseases include problems in the attentional systems of the brain. In addition to an understanding of the mechanisms of attentional processes, the research at the Cognitive Neuroscience Laboratory should provide insights into these diseases.

#### Literatur

**Treue, S.** Neuronale Grundlagen von Aufmerksamkeit. in: Karnath, H. O. and Thier, P., eds. Neuropsychologie. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag ; 2003; pp. 260-267.

**Treue, S.** Neural correlates of attention in primate visual cortex. Trends in Neuroscience. 2001; 24(5):295-300.

**Treue, S. and Martinez Trujillo, J. C.** Reshaping neuronal representations of visual scenes through attention. Current Psychology of Cognition. 1999; 18(5-6):951-972.