

4. Auflage

Spering • Schmidt

Allgemeine Psychologie 1

KOMPAKT

Wahrnehmung • Aufmerksamkeit •
Denken • Sprache

 Online-Material

BELTZ

Anschrift der Autor:innen:

Prof. Dr. Miriam Spering, Dipl.-Psych.
University of British Columbia
Department of Psychology
2136 West Mall
Vancouver, V6T 1Z4
Kanada
E-Mail: mspering@mail.ubc.ca

Prof. Dr. Thomas Schmidt
TU Kaiserslautern-Landau
Center for Cognitive Science
Erwin-Schrödinger-Str. Geb. 57
67 663 Kaiserslautern
E-Mail: thomas.schmidt@sowi.uni-kl.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Die Verlagsgruppe Beltz behält sich die Nutzung ihrer Inhalte für Text und Data Mining im Sinne von § 44b UrhG ausdrücklich vor.



Dieses Buch ist auch erhältlich als:
ISBN 978-3-621-29132-3 Print
ISBN 978-3-621-29341-9 E-Book (PDF)

4., vollständig aktualisierte Auflage 2025

1. Auflage 2009, Beltz Verlag, Weinheim
2. Auflage 2012, Beltz Verlag, Weinheim
3. Auflage 2017, Beltz Verlag, Weinheim

© 2025 Programm PVU Psychologie Verlags Union
Verlagsgruppe Beltz
Werderstraße 10, 69469 Weinheim
service@beltz.de
Alle Rechte vorbehalten

Lektorat: Dagmar Kühnle Zerpa
Herstellung: Sonja Droste
Satz: Reemers Publishing Services GmbH, Krefeld
Druck und Bindung: Beltz Grafische Betriebe, Bad Langensalza
Beltz Grafische Betriebe ist ein Unternehmen mit finanziellem Klimabeitrag (ID 15985-2104-1001).
Printed in Germany

Weitere Informationen zu unseren Autor:innen und Titeln finden Sie unter: www.beltz.de

Inhaltsübersicht

Vorwort zur 4. Auflage	11
1 Einführung	13
2 Wahrnehmung	17
3 Aufmerksamkeit, Bewusstsein und kognitive Kontrolle	99
4 Denken	141
5 Sprache	210
Literatur	256
Hinweise zum Online-Material	270
Glossar	271
Sachwortverzeichnis	277

Inhalt

Vorwort zur 4. Auflage	11
1 Einführung	13
1.1 Was ist Allgemeine Psychologie?	13
1.2 Die Themen des Buches	13
1.3 Hinweise zur Arbeit mit diesem Buch	16
2 Wahrnehmung	17
2.1 Psychophysik	18
2.1.1 Sinnesmodalitäten und Wahrnehmungsspezifität	18
2.1.2 Methoden der Psychophysik	19
2.1.3 Signalentdeckungstheorie	23
2.1.4 Entscheidungsmodelle und Criterion Content	24
2.2 Visuelle Wahrnehmung	25
2.2.1 Licht und optische Aspekte der Wahrnehmung	25
2.2.2 Die Netzhaut	28
2.2.3 Von der Netzhaut zum Gehirn	31
2.2.4 Grundprinzipien der visuellen Verarbeitung	34
2.2.5 Konvergenz und Divergenz	34
2.2.6 Multiple Karten des visuellen Felds	39
2.2.7 Spezialisierte Verarbeitungspfade	41
2.2.8 Spezifische Wahrnehmungsleistungen	45
2.3 Auditive Wahrnehmung	64
2.3.1 Schall und akustische Aspekte der Wahrnehmung	65
2.3.2 Auditives System	66
2.3.3 Grundprinzipien der auditiven Verarbeitung	69
2.3.4 Physikalische und psychologische Messgrößen	71
2.3.5 Spezifische Wahrnehmungsleistungen	71
2.4 Gleichgewicht und Propriozeption	80
2.5 Taktile Sinne	82
2.6 Chemische Sinne	84
2.7 Synästhesie	86
2.8 Wahrnehmung und Handlung	87
2.8.1 Augenbewegungen	87
2.8.2 Handbewegungen	91
2.8.3 Motorisches Lernen und kortikale Plastizität	94
Zusammenfassung	95

3	Aufmerksamkeit, Bewusstsein und kognitive Kontrolle	99
3.1	Auditive Aufmerksamkeit	100
3.1.1	Dichotisches Hören und Filtermodelle	100
3.1.2	Frühe oder späte Selektion?	102
3.2	Visuelle Aufmerksamkeit	103
3.2.1	Räumliche und merkmalsbasierte Aufmerksamkeit	103
3.2.2	Neuronale Grundlagen der visuellen Aufmerksamkeit	106
3.2.3	Visuelle Suche	108
3.2.4	Modalitätsübergreifende Aufmerksamkeit	113
3.2.5	Das Neglekt-Syndrom	115
3.3	Visuelles Bewusstsein	116
3.3.1	Unbewusste Wahrnehmung	117
3.3.2	Neuronale Grundlagen des Bewusstseins	120
3.3.3	Aufmerksamkeit und Bewusstsein	124
3.3.4	Das Bindungsproblem	126
3.4	Kognitive Kontrolle	128
3.4.1	Kognitive Kontrolle und exekutive Funktionen	128
3.4.2	Doppelaufgaben und Aufgabenwechsel	128
3.4.3	Automatisierung	130
3.4.4	Neuronale Grundlagen von Planen und Handeln	133
3.4.5	Freier Wille?	134
	Zusammenfassung	137
4	Denken	141
4.1	Gegenstand der Denkpsychologie	142
4.2	Kurze Geschichte der Denkpsychologie	145
4.2.1	Denken bei Menschen und Tieren	145
4.2.2	Forschungstraditionen der Denkpsychologie	146
4.3	Wissen als Baustein des Denkens	148
4.3.1	Was ist Wissen?	148
4.3.2	Repräsentation von Wissen in Kategorien	151
4.3.3	Architektur der Wissensrepräsentation	155
4.4	Schlussfolgern	159
4.4.1	Deduktives Schlussfolgern	160
4.4.2	Induktives Schlussfolgern	167
4.5	Problemlösen und Entscheiden	174
4.5.1	Einfaches Problemlösen und Statisches Entscheiden	175
4.5.2	Komplexes Problemlösen und Dynamisches Entscheiden	190
4.6	Planen	199
4.7	Intelligenz und Kreativität	202

4.7.1	Intelligenz	202
4.7.2	Kreativität	203
	Zusammenfassung	205
5	Sprache	210
5.1	Was ist Sprache?	211
5.2	Laut- und Wortverarbeitung	213
5.2.1	Wortproduktion	215
5.2.2	Wortverstehen	218
5.3	Satzverarbeitung	222
5.3.1	Strukturelles Wissen	222
5.3.2	Modelle der Satzverarbeitung	225
5.3.3	Semantisches Wissen	228
5.4	Textverarbeitung	229
5.5	Sprachentwicklung	230
5.5.1	Stufen des Spracherwerbs	233
5.5.2	Kritische Periode für den Spracherwerb	234
5.5.3	Bilingualismus: Können Kinder zwei Sprachen gleich gut sprechen?	236
5.6	Sprachstörungen und die neuronale Grundlage von Sprache	240
5.6.1	Störungen in der Sprachentwicklung	240
5.6.2	Neurologisch bedingte Sprachstörungen	242
5.6.3	Sensorisch bedingte Sprachstörungen	245
5.6.4	Sprachstörungen bei kognitiv anders entwickelten Kindern	246
5.7	Lateralisierung von Sprache im Gehirn	247
5.8	Können Tiere sprechen (lernen)?	250
5.9	Beeinflusst Sprache unser Denken?	250
	Zusammenfassung	253
	Literatur	256
	Hinweise zum Online-Material	270
	Glossar	271
	Sachwortverzeichnis	277

Vorwort zur 4. Auflage

Allgemeine Psychologie macht Spaß! Wir haben dieses Lehrbuch verfasst, weil wir unseren Leser:innen diese Freude vermitteln möchten. Wahrnehmung, Aufmerksamkeit, Denken und Sprache sind keineswegs öde Themen, durch die man sich zu Beginn des Psychologiestudiums quälen muss, bevor man endlich zu Themen der angewandten Psychologie gelangt. Zum einen sind viele Ergebnisse aus der Allgemeinen Psychologie außerordentlich hilfreich für das Verständnis angewandter Probleme, z.B. in der Klinischen Psychologie: Nur wenn man ein klares Verständnis davon hat, wie das kognitive System normalerweise funktioniert, kann man verstehen, welche kognitiven Funktionen etwa bei Schizophrenie, Depression oder Demenz gestört sind. Zum anderen sind viele Befunde auch für sich genommen faszinierend: Immerhin versucht die Allgemeine Psychologie herauszufinden, wie der menschliche Geist funktioniert, welchen Beschränkungen er unterliegt, aber auch welche Möglichkeiten er besitzt.

Das vorliegende Buch soll dazu anregen, sich interaktiv und kritisch mit den Themen der Allgemeinen Psychologie zu befassen. Die Stoffauswahl konzentriert sich auf den klassischen Prüfungsstoff für den Bachelor-Studiengang Psychologie. Darüber hinaus bietet dieses Buch Fallstudien, Selbstversuche sowie Praxis- und Hintergrundwissen. Die meisten Erkenntnisse der Allgemeinen Psychologie basieren auf Experimenten, und viele dieser Experimente sind intellektuell reizvoll: Sie sind meistens intelligent konzipiert, oft trickreich und haben manchmal sogar so etwas wie eine Pointe. Deshalb wollen wir hier nicht nur Befunde und Theorien abarbeiten, sondern unsere Leser:innen in die Lage versetzen, experimentelles Denken nachzuvollziehen und selbst wissenschaftliche Fragen zu stellen. Die Grundfrage beim Lesen sollte also nicht sein: »Was muss ich mir hier für die Prüfung merken?«, sondern: »Was für Schlussfolgerungen ziehe ich aus diesem Experiment, wie passen sie zu meinem bisherigen Wissen, und was für Fragen würde ich als Nächstes stellen?«

Für die vierte Auflage haben wir alle Kapitel gründlich überarbeitet, aktuelle Forschungsbefunde und Literatur einbezogen sowie ausgewählte Themenbereiche, u. a. »Bewusstsein«, erweitert. Wie zuvor gibt es Online-Material zu verschiedenen Themen des Buches, die zum Ausprobieren und selbstständigen Weiterarbeiten einladen. Noch ein Hinweis zur Sprache: Im Sinne einer diskriminierungsfreien Sprache nutzen wir den Gender-Doppelpunkt.

Wir hatten das Glück, dass uns diese Sichtweise der Allgemeinen Psychologie schon früh im Studium und in der wissenschaftlichen Arbeit vermittelt wurde. Dafür möchten wir unseren akademischen Lehrern, Joachim Funke (Heidelberg),

Karl Gegenfurtner (Gießen), Gerd Lüer (Göttingen) und Dirk Vorberg (Münster), an dieser Stelle ganz herzlich danken. Das Buch verdankt seine Lesbarkeit jedoch in erster Linie der kompetenten Hilfe von Seiten des Beltz Verlags in Weinheim. Für die vorzügliche Unterstützung und die hilfreichen Ratschläge bei der Erstellung der vierten Auflage bedanken wir uns bei Dagmar Kühnle Zerpa. Und nicht zuletzt gilt unser ganz besonderer Dank den vielen Studierenden, die unsere Lehrveranstaltungen besucht haben und die mit ihren Fragen und Ideen unsere Darstellung der Allgemeinen Psychologie geprägt haben.

Vancouver und Kaiserslautern, im Frühjahr 2025

Miriam Spering
Thomas Schmidt

1 Einführung

1.1 Was ist Allgemeine Psychologie?

Die Allgemeine Psychologie hat das Ziel, das kognitive System des Menschen zu beschreiben und zu erklären. Sie hat sich in ihrer modernen Form im 19. Jahrhundert entwickelt. Zum Teil stellte sie eine Gegenbewegung zur weitgehend empiriefreien philosophischen Erkenntnistheorie dar, zum Teil entwickelte sie sich auch aus der Physiologie heraus, die sich zu jener Zeit erstmals an die Untersuchung »höherer Funktionen« des Menschen heranwagte. Die neue Generation der Wissenschaftler:innen wollte damals der philosophischen Erkenntnistheorie ein empirisches Fundament geben und beschäftigte sich damit, wie Menschen tatsächlich Informationen aufnehmen, Entscheidungen treffen und Handlungen generieren. Plötzlich wurden allerorts neue Lehrstühle und Institute geschaffen, psychologische Laboratorien eingerichtet, Testaufgaben erfunden und an Versuchspersonen getestet. Die feinen Messgeräte aus poliertem Messing, deren Präzision die mancher computergestützter Messungen von heute übertrifft, kann man in vielen Sammlungen bewundern.

Die Allgemeine Psychologie in ihrer heutigen Form ist Teil eines multidisziplinären Forschungsprogramms, das man wohl am besten mit dem Begriff »Kognitive Neurowissenschaften« beschreiben kann. Dabei spielen neben den eigentlichen Neurowissenschaften auch so unterschiedliche Wissenschaftszweige wie Physiologie, Chemie, Informatik, Robotik, Linguistik, Philosophie, Soziologie und Wirtschaftswissenschaften eine Rolle. Auch Physik, Ingenieurwissenschaften und Mathematik sorgen für eine ständige Weiterentwicklung der Forschungsmethoden, z. B. im Bereich der bildgebenden Verfahren der Hirnforschung. Psychologische Experimente nehmen hier eine Schlüsselstellung ein, denn nur sie liefern Daten von menschlichen Versuchspersonen (auch wenn es nicht mehr immer Psycholog:innen sind, die diese Daten erheben). Der interdisziplinäre Charakter der Kognitionsforschung wird sich auch in diesem Buch bemerkbar machen, vor allem im ständigen Rückgriff auf Methoden und Befunde aus der Physiologie, Hirnforschung und Neuropsychologie.

1.2 Die Themen des Buches

Abbildung 1.1 dient dazu, die in diesem Buch angesprochenen Themen zu ordnen. Dabei möchten wir die einzelnen Themenbereiche nicht isoliert behandeln, sondern interessieren uns besonders für die Schnittstellen und Überlappungen.

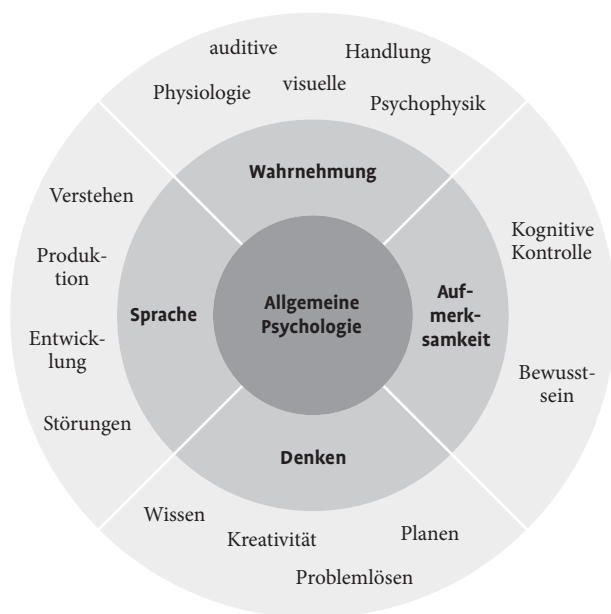


Abbildung 1.1 Vier Themen der Allgemeinen Psychologie

Kapitel 2. Die Grundlagen der Wahrnehmung in verschiedenen Sinnessystemen werden in diesem Kapitel erläutert. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der visuellen und der auditiven Wahrnehmung, aber auch Tastsinne, Gleichgewichtssinn sowie die chemischen Sinne Riechen und Schmecken werden kurz behandelt. Dieses Kapitel stützt sich stärker als die restlichen Kapitel auf Befunde aus Sinnesphysiologie und Neurowissenschaften und erläutert auch die physikalischen Grundlagen von Sinnesreizen. Es behandelt zudem die mannigfaltigen Funktionen unserer Wahrnehmung, z. B. die visuelle Wahrnehmung von Helligkeit, Farbe, Bewegung und räumlichen Beziehungen, die auditive Wahrnehmung von Tonhöhe, Lautstärke und Musik, die Analyse visueller und auditiver Szenen und das Zusammenspiel zwischen Wahrnehmung und Handlung. Ein übergreifendes Thema von Kapitel 2 ist die Doppelfunktion der Wahrnehmung: Sie ermöglicht uns einerseits das schnelle und sichere Handeln in unserer Umwelt, andererseits führt sie zum Aufbau einer komplexen Repräsentation dieser Umwelt im Bewusstsein. Diese bewussten Wahrnehmungsinhalte sind vom unmittelbaren Handeln abgekoppelt und können als Grundlage von komplexen, sprachlich mitteilbaren Denk- und Entscheidungsprozessen dienen. Durch diese Möglichkeiten gewinnt die Wahrnehmung eine soziale Dimension, die über das unmittelbare Reagieren auf Außenreize hinausgeht.

Kapitel 3. Dieses Kapitel behandelt die Grundlagen von Aufmerksamkeit, Bewusstsein und kognitiver Kontrolle. Aufmerksamkeit versetzt uns in die Lage, aus einer Vielzahl von Reizen die für uns wichtigen Informationen herauszufiltern, und sie hält das kognitive System flexibel, indem sie seine Verarbeitungsprozesse an die

augenblicklichen Arbeitserfordernisse anpasst. Beachtete Reize werden schneller und genauer verarbeitet als unbeachtete, unbeachtete Reize können von der bewussten Wahrnehmung ausgeschlossen bleiben. Deshalb spielen Theorien der Aufmerksamkeit auch eine Rolle für die Erklärung von visuellem Bewusstsein und der Bindung von einzelnen visuellen Merkmalen zu komplexen Objekten. Und noch in einem weiteren Sinne ist Aufmerksamkeit an unserer Handlungssteuerung beteiligt: Sie wird eingesetzt, um Handlungsteile auszuwählen, zu verwerfen, zu koordinieren und in die richtige Reihenfolge zu bringen. In diesem weiteren Sinne wird Aufmerksamkeit zur kognitiven Kontrolle von Handlungen eingesetzt, die zu komplex sind, um in automatisierter Weise abgewickelt werden zu können, und die Denk- und Entscheidungsprozesse erfordern. Die Aufmerksamkeit besetzt also eine Schlüsselstellung in unserer kognitiven Architektur an der Schnittstelle von Wahrnehmung, Denken, Sprache und Handlungen. Die bewusste Wahrnehmung kognitiver Kontrollprozesse kann Täuschungen unterliegen, die Fragen zu unserer grundsätzlichen Willens- oder Handlungsfreiheit aufwerfen.

Kapitel 4. Hier wird die spezifisch menschliche Fähigkeit des Denkens behandelt. Dazu gehören logisches Schlussfolgern (deduktives Denken), Urteilen und Entscheiden (induktives Denken), einfaches und komplexes Problemlösen, Planen sowie Intelligenz und Kreativität. Denken ermöglicht es uns, Handlungen vorausschauend zu planen und an die Erfordernisse einer sich verändernden Umwelt anzupassen. Auf diese Weise können wir Handlungen innerlich durchspielen, bevor wir sie tatsächlich ausführen. Die Denkpsychologie ist seit ihren Ursprüngen mit einem methodischen Problem konfrontiert: Wie kann man den innerlich ablaufenden Prozess des Denkens sichtbar machen? Forscher:innen haben ganz unterschiedliche Strategien entwickelt, um Denkprozesse zu messen. Experimentelle Paradigmen zur Untersuchung von Denkprozessen bilden daher einen Schwerpunkt in diesem Kapitel.

Kapitel 5. In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Sprachverarbeitung dargestellt. Sprache in all ihren Erscheinungsformen – gesprochene Sprache, geschriebene Sprache, Gebärdensprache – ist eine genuin menschliche Fähigkeit und erlaubt es uns, mit anderen Menschen zu kommunizieren und sozial zu interagieren. Diese soziale Komponente bedeutet eine ungeheure Verstärkung unserer kognitiven Fähigkeiten, denn sie versetzt uns in die Lage, die Wahrnehmungen und Denkergebnisse anderer Menschen zu nutzen. Die Psycholinguistik befasst sich damit, wie Menschen Sprache verwenden (also produzieren und verstehen), wie Sprache erlernt wird und was im Gehirn passiert, wenn bestimmte Aspekte der Sprachverarbeitung gestört sind. Die Themenbereiche Sprachverarbeitung, Spracherwerb und Sprachstörungen stellen somit den Kern des Kapitels dar. Darüber hinaus werden spezifische Fragen behandelt: Was passiert, wenn Kinder mit zwei Sprachen aufwachsen und ist Bilingualität wirklich förderlich? Sind auch Tiere in der Lage, Sprache zu erlernen?

1.3 Hinweise zur Arbeit mit diesem Buch

Wie alle Bücher der Kurzlehrbuchreihe »Psychologie kompakt« ist auch dieses darauf ausgerichtet, dass Sie eine aktive Rolle beim Erarbeiten der Inhalte übernehmen. Es beinhaltet daher eine Reihe von Selbstversuchen, Praxisbeispielen und weiterführenden Fragen, die dazu gedacht sind, das Gelernte zu überdenken, zu hinterfragen und zu festigen. Hierzu gibt es zusätzliche Online-Materialien, die weiterführende Weblinks und Selbstversuche bieten, um selbstständig an verschiedenen Themen weiterzuarbeiten. Die Literaturhinweise am Ende jedes Kapitels sind ebenfalls als eine Einladung gedacht, sich mit den faszinierenden Aspekten der Allgemeinen Psychologie weiter zu beschäftigen. Darüber hinaus soll die lockere Struktur des Textes mit Definitionen, verschiedenen Kästen und Zusammenfassungen Anlässe bieten, einzelne Themen herauszugreifen und Anhaltspunkte zum gezielten Lernen zu finden. Außerdem haben wir uns bemüht, eine Darstellungsform zu finden, die nicht nur bloßes Faktenwissen enthält, sondern auch die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Themenbereichen aufzeigt: Wahrnehmung, Aufmerksamkeit und kognitive Kontrolle, Denken und Sprache sind einzeln gar nicht vorstellbar, sondern ergeben erst durch ihr Zusammenspiel einen Sinn.

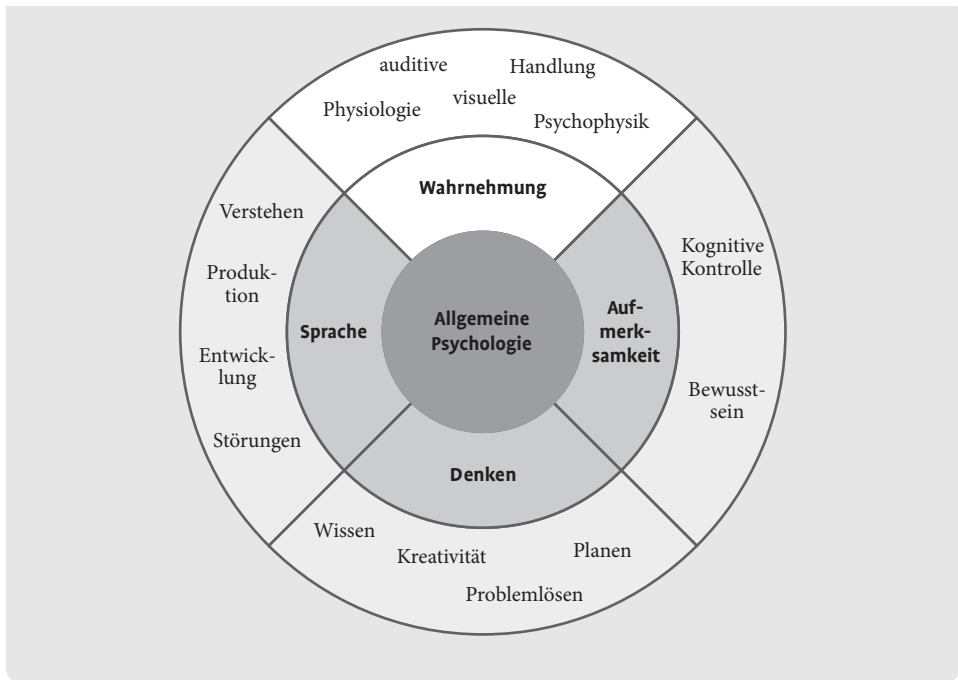
2 Wahrnehmung

Was Sie in diesem Kapitel erwartet

Wenn wir unsere Augen öffnen, fällt Licht auf unsere Netzhaut. Dieses Licht ist durch die vielen Gewebeschichten unseres optischen Apparats gewandert, dabei immer wieder gestreut und gebrochen worden und stellt jetzt ein etwas unscharfes Abbild unserer visuellen Umwelt dar. Während diese Umwelt sich in drei Raumdimensionen erstreckt, ist das Abbild nur zweidimensional. Da dasselbe zweidimensionale Bild aber durch eine Vielzahl von dreidimensionalen Objekten erzeugt werden kann, ist die Interpretation nicht eindeutig, und das visuelle System ist darauf angewiesen zu erraten, welcher Reiz dem Netzhautbild am plausibelsten zugrunde liegen könnte. Der Künstler Shigeo Fukuda hat diese Probleme illustriert, indem er eine auf den ersten Blick unförmige Skulptur aus über 2.000 miteinander verlöteten Nagelscheren konstruierte (die Zahl der benötigten Heftpflaster ist nicht bekannt). Wird diese Skulptur aus einem ganz bestimmten Winkel beleuchtet, wirft sie den Schatten eines Segelschiffs mit fein herausgearbeiteten Konturen von Tauwerk und Takelage (Seckel, 2005; s. weiterführende Literatur, »Webseiten zum Thema«). Wie findet das visuelle System die richtige Interpretation zum mehrdeutigen Bild auf der Netzhaut?

Wir werden in diesem Kapitel immer wieder sehen, dass unsere Wahrnehmungsfunktionen stark auf Eigenschaften unserer Umwelt abgestimmt sind. Außerdem werden wir erkennen, dass der eigentliche Zweck unserer Wahrnehmungsfunktionen nicht ein »Kino im Kopf« ist, d. h. eine Revue von Bildern und Klängen. Stattdessen ist unsere Wahrnehmung darauf ausgerichtet, uns das Handeln in unserer wahrgenommenen Umwelt zu erlauben. Manchmal ist diese Verknüpfung so schnell und automatisch wie beispielsweise bei der Abwehr eines Schneeballs, manchmal ist sie hingegen von der unmittelbaren Reaktion abgekoppelt und gestattet uns überlegtes, reflektiertes Handeln. Wahrnehmung ist also nicht nur unser »Fenster« zur Welt, sondern auch unsere »Tür«: Sie erlaubt es uns, aus der Privatheit unseres Sinneserlebens hervorzutreten und auf unsere Umwelt einzuwirken.

Wir beschränken uns weitgehend auf die beiden am besten erforschten Sinnessysteme: das visuelle und das auditive System. Darüber hinaus besitzen wir eine Reihe von weiteren Sinnessystemen, die wir hier nur kurz behandeln können: die chemischen Sinne (Riechen und Schmecken), den Gleichgewichtssinn, den Tastsinn sowie Temperatur- und Schmerz Wahrnehmung.



2.1 Psychophysik

2.1.1 Sinnesmodalitäten und Wahrnehmungsspezifität

Unsere Sinnesorgane wandeln physikalische Signale (z.B. Lichtsignale oder mechanische Schwingungen) in elektrische Impulse (Aktionspotenziale) von Nervenzellen um. Den im Gehirn eintreffenden Aktionspotenzialen kann man es aber nicht ansehen, aus welchem Sinnesorgan sie stammen. Der deutsche Physiologe Johannes Müller hat zur Lösung dieses Zuordnungsproblems bereits im 19. Jahrhundert das Gesetz der »spezifischen Sinnesenergien« postuliert: Information aus jedem Sinnessystem kommt zunächst in eindeutig bestimmten Empfangsgebieten des Gehirns an. So landet Information aus dem Auge zunächst im primären visuellen Kortex, Information aus dem Ohr im primären auditiven Kortex usw.

Das Prinzip der Wahrnehmungsspezifität ist nur deswegen sinnvoll, weil die Rezeptoren im Lauf der Evolution so verbessert wurden, dass sie optimal nur von einer bestimmten Art von Reiz, dem »adäquaten Reiz«, erregt werden können (Lichtreize im visuellen, Schallwellen im auditiven System). Wird ein Aktionspotenzial auf andere Art als vorgesehen ausgelöst, z. B. durch mechanischen Druck aufs Auge, dann führt auch dies zu visuellen Empfindungen.

Die Empfindlichkeit einiger unserer Sinnessysteme ist erstaunlich groß. Das visuelle System ist unter besonders günstigen Umständen wahrscheinlich in der Lage, ein einzelnes Photon (die kleinste physikalisch vorstellbare Lichtmenge) in eine bewusste Sinnesempfindung umzuwandeln (Hecht et al., 1942). Solche herausragenden Leistungen des Auges lassen sich heute mithilfe adaptiver optischer Verfahren genau untersuchen (Harmening et al., 2014; Hunter et al., 2011). Auch die Sensitivität des auditiven Systems bewegt sich an der Grenze des physikalisch Möglichen: Wäre unser Gehör noch empfindlicher, würden wir das Prasseln der Luftatome auf unserem Trommelfell hören können.

2.1.2 Methoden der Psychophysik

Die Psychophysik ist eine Forschungstradition innerhalb der Wahrnehmungspsychologie und beschäftigt sich mit dem Zusammenhang zwischen physikalischen Reizen und bewusster Wahrnehmung. Dabei geht es vor allem darum, einen quantitativen Zusammenhang zwischen Reiz und Empfindungsstärke herzustellen. Damit kann man dann z. B. die Frage beantworten, wie klein der kleinste Reiz ist, der gerade noch wahrgenommen werden kann (Absolutschwelle), und wie klein der kleinste Unterschied zwischen zwei Reizen sein kann, der gerade noch bemerkt wird (Differenzschwelle). Diese Ziele mögen zunächst bescheiden klingen, aber psychophysische Methoden verraten viel über die Funktionsweise des sensorischen Systems. Darüber hinaus gibt es viele Anwendungsmöglichkeiten der Psychophysik in all jenen Bereichen, in denen Informationstechnologien und menschliche Sinneswahrnehmung aufeinandertreffen.

Verschiedene Methoden. Psychophysiker:innen verwenden verschiedene Methoden, um die Absolutschwelle etwa für Lichtblitze oder Töne zu bestimmen (Gescheider, 2015; Abb. 2.1). Bei der *Methode der konstanten Reize* werden unterschiedlich starke Reize in zufälliger Reihenfolge dargeboten, und die Versuchsperson muss angeben, ob sie den jeweiligen Reiz wahrgenommen hat oder nicht. Bei der *Grenzmethode* werden verschieden starke Reize in auf- oder absteigender Reihenfolge dargeboten, und die Versuchsperson muss den Punkt angeben, an dem sie den Reiz zum ersten Mal wahrnimmt oder nicht mehr wahrnimmt. Bei der *Herstellungsmethode* schließlich kann die Versuchsperson den Reiz selbst so einstellen, dass er gerade sichtbar oder hörbar ist. Auf ähnliche Weise kann man auch die Differenzschwelle bestimmen: Hier wird der Reiz nicht allein, sondern zusammen mit einem Referenzreiz dargeboten, und es gilt zu beurteilen, bei welchem physischen Reizunterschied die Reize verschieden erscheinen.

Methoden: Psychometrische Funktion und Schwellenmessung

Psychometrische Funktionen beschreiben den Zusammenhang zwischen der Stärke eines Reizes und der Wahrscheinlichkeit, den Reiz entdecken oder klassifizieren zu können. Dabei wird die Reizstärke systematisch in vielen Zwischenschritten variiert.

Abbildung 2.1 beschreibt ein sog. Entdeckungsexperiment, bei dem immer wieder sehr kurzzeitig ein schwacher Lichtpunkt vor dunklem Hintergrund präsentiert wird. Die Aufgabe der Versuchsperson ist es, in jedem Durchgang anzugeben, ob ein Lichtpunkt präsentiert wurde oder nicht. Die Intensität des Lichtpunkts wird systematisch verändert; die verschiedenen Intensitäten werden in zufälliger Reihenfolge präsentiert (Methode der konstanten Reize).

Wahrnehmungsschwellen können anhand psychometrischer Funktionen definiert werden. Um eine Schwelle zu errechnen, wird zunächst ein Wert festgelegt, der von der psychometrischen Funktion überschritten werden muss: In Abbildung 2.1 ist dies der gebräuchliche 50-%-Punkt. Der Schwellenwert liegt dann bei derjenigen Reizintensität, bei der die psychometrische Funktion den 50-%-Punkt überschreitet. Unter einer Schwelle versteht man also die Reizstärke, bei der die Versuchsperson eine bestimmte Erkennungsleistung erreicht. Liegt ein Reiz unterhalb der Wahrnehmungsschwelle, ist er dadurch nicht etwa »unsichtbar«, sondern seine Entdeckungswahrscheinlichkeit ist einfach kleiner als 50 %.

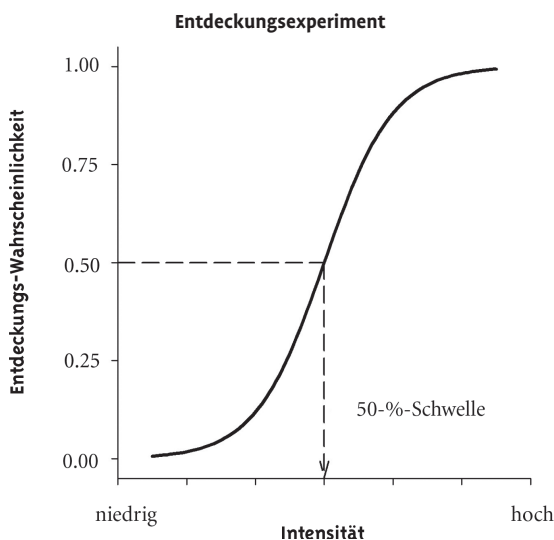


Abbildung 2.1 Psychometrische Funktion in einem Entdeckungsexperiment. Eine Versuchsperson soll in jedem Durchgang angeben, ob ein Reiz präsentiert worden ist oder nicht. Die Wahrscheinlichkeit, diesen Reiz zu entdecken (auf der y-Achse abgetragen) wächst mit der Intensität des Reizes an (auf der x-Achse abgetragen). Dieser Zusammenhang ist typischerweise s-förmig, da sehr intensive Reize ja fast mit Sicherheit entdeckt und sehr schwache Reize übersehen werden sollten. Die Intensität, bei der die Versuchsperson den Reiz in 50 % der Fälle entdeckt, wird 50%-Schwelle genannt.

Webersches Gesetz. Bei der Bestimmung von Differenzschwellen ergibt sich ein interessantes Phänomen: Je höher die Intensität zweier Reize, desto schlechter wird ihre Unterscheidbarkeit. Wenn man z. B. entscheiden muss, ob eine Tasse Kaffee ein oder zwei Stück Zucker enthält, ist dies viel leichter, als wenn man entscheiden muss, ob sie elf oder zwölf Stück Zucker enthält. Obwohl die Reizdifferenz zwischen den beiden Tassen in beiden Fällen gleich groß ist, fällt die Unterscheidung im zweiten Fall viel schwerer. Der Mediziner Ernst Heinrich Weber (1864) postulierte als erster eine quantitative Regel für das Unterscheidungsvermögen zweier Reize. Er bezeichnete die Wahrnehmungsschwelle zweier Reize (also den physikalischen Unterschied, der gerade noch wahrnehmbar ist), als *gerade merkblichen Unterschied* (just noticeable difference, JND), und postulierte, dass der JND immer proportional zur Größe des Vergleichsreizes ist. Wenn man ein Gewicht von 1.000 g z. B. um 10 % (100 g) erhöhen muss, damit der Unterschied gerade wahrnehmbar ist, dann muss man ein Gewicht von 2.000 g ebenfalls um 10 % erhöhen – also um 200 g. Dieser Zusammenhang ist als Webersches Gesetz bekannt. Das Webersche Gesetz beschreibt die empirischen Daten über einen breiten Wertebereich recht genau, nur für sehr schwache Reize gilt es nicht.

Definition

Webersches Gesetz: Die Unterschiedsschwelle ΔS zweier Reize ist proportional zur Größe des Vergleichsreizes S , also $\Delta S = k \cdot S$. Dabei ist k die sog. Weber-Konstante (in unserem Beispiel 10 %), die für jede Reizmodalität unterschiedlich ist.

Fechnersches Gesetz. Der Physiker und Philosoph Gustav Theodor Fechner (1860) weitete das Webersche Gesetz zu einem Zusammenhang zwischen Erlebnisstärke und Reizstärke aus. Er nahm an, dass die Unterschiedsschwelle nicht nur ein konstanter Prozentsatz der Reizstärke sei, sondern dass die einzelnen Unterschiedsschwellen auch erlebnismäßig gleich seien und insofern ein Maß der Erlebnisintensität E darstellen könnten. In diesem Fall könnte man die erlebte Intensität des Reizes ausdrücken, indem man einfach die Zahl der JNDs zählt, die in diesem Reiz enthalten sind. Aus dieser Idee ergibt sich ein logarithmischer Zusammenhang, das Fechnersche Gesetz:

Definition

Fechnersches Gesetz: Die Empfindungsstärke E ist proportional zum natürlichen Logarithmus der Reizstärke S , also $E = c \cdot \ln S$. Dabei ist c wieder eine für jede Reizmodalität verschiedene Konstante, die sog. Fechner-Konstante.

Stevensches Gesetz. Das Fechnersche Gesetz ist leider nicht voll gültig. Es sagt unter anderem voraus, dass ein Reiz, der z. B. 20 JNDs über der Absolutschwelle liegt, als genau doppelt so stark erlebt werden sollte wie einer, der nur 10 JNDs über der Absolutschwelle liegt. Diese Voraussage hat sich aber empirisch nicht bestätigt.

Der Psychophysiker Stanley S. Stevens schlug daher einen anderen quantitativen Zusammenhang vor: Er meinte, dass sich der Zusammenhang zwischen Reiz- und Empfindungsstärke am besten als eine Potenzfunktion darstellen lässt, die durch die sog. Stevens-Konstante charakterisiert ist. Ist die Stevens-Konstante kleiner als 1, dann werden immer weitere Zunahmen als immer unerheblicher wahrgenommen (wie in unserem Zucker-Beispiel, wo das Hinzufügen des zwölften Stücks Zucker zu einer viel kleineren wahrgenommenen Differenz führt als das Hinzufügen des zweiten Stücks). Ist die Stevens-Konstante hingegen größer als 1, dann werden immer weitere Zunahmen als immer erheblicher wahrgenommen (das ist z. B. für die Schmerzwahrnehmung bei elektrischen Schocks der Fall). Die wahrgenommene Länge von einzelnen Linien hat übrigens eine Stevens-Konstante von ungefähr 1, wird also unverfälscht oder »veridikal« wahrgenommen.

Definition

Stevensches Gesetz: Die Empfindungsstärke E ist eine Potenzfunktion der Reizstärke S , also $E = b \cdot S^a$ (Stevens, 1957). Dabei ist die Konstante b nur zur Skalierung nötig, um die E - und S -Variablen in den gleichen Einheiten ausdrücken zu können; die eigentlich wichtige Größe ist die Stevens-Konstante a , die wieder für jede Reizmodalität unterschiedlich ist. Ist a kleiner als 1, steigt die Empfindungsstärke mit zunehmender Reizstärke immer langsamer an. Ist a größer als 1, steigt sie immer schneller. Das Gesetz sagt voraus, dass der Logarithmus der Empfindungsstärke linear vom Logarithmus der Reizstärke abhängen sollte, $\ln E = \ln b + a \cdot \ln S$.

2.1.3 Signalentdeckungstheorie

Während in den bisher geschilderten psychophysischen Ansätzen lediglich die Eigenschaften des sensorischen Systems betrachtet werden, berücksichtigt die Signalentdeckungstheorie auch das Entscheidungsverhalten der beobachtenden Person (Green & Swets, 1966). Wenn man z. B. entscheiden soll, ob ein schwacher Lichtreiz präsentiert wurde oder nicht, muss die Entscheidung unter Unsicherheit getroffen werden. Die Signalentdeckungstheorie nimmt an, dass die Versuchsperson dabei ein feststehendes Kriterium benutzt: Wenn eine Empfindungsstärke dieses Kriterium übersteigt, entscheidet sie, dass ein Reiz präsentiert wurde; ist die Empfindungsstärke dagegen geringer als das Kriterium, entscheidet sie, dass kein Reiz präsentiert wurde. Mit dieser Strategie kann die Versuchsperson richtig oder falsch liegen. Wird korrekterweise entschieden, dass ein Reiz präsentiert wurde, nennt man das einen *Treffer*; wird dagegen irrtümlich die Präsentation eines Reizes gemeldet, nennt man das einen *Falschen Alarm* (Tab. 2.1). Je besser die Versuchsperson entscheiden kann, ob ein Reiz präsentiert worden ist (je höher also ihre *Sensitivität* ist), desto mehr Treffer und desto weniger Falsche Alarme werden erzielt. Je nachdem, ob ein strenges oder laxes Kriterium verwendet wird, kann aber selbst bei konstanter Sensitivität ein ganz unterschiedliches Antwortverhalten resultieren. Bei einem laxen Kriterium entscheidet die Versuchsperson schon bei sehr geringen Empfindungsstärken, dass ein Reiz präsentiert worden ist – das erhöht zwar die Zahl ihrer Treffer, führt aber auch zu vielen Falschen Alarmen. Bei einem strengen Kriterium hingegen entscheidet sie nur bei sehr hohen Empfindungsstärken zugunsten des Reizes: Damit werden zwar wenige Treffer, aber auch weniger Falsche Alarme erzielt. Stellen wir uns als Beispiel zwei Röntgenärztinnen vor, die Tumore auf Röntgenbildern entdecken sollen. Eine Ärztin mit einem strengen Kriterium wird nur in drastischen Fällen einen Tumor melden, eine Ärztin mit einem laxen Kriterium hingegen schon beim leisesten Verdacht. Der entscheidende Fortschritt der Signalentdeckungstheorie gegenüber früheren Verfahren ist daher, dass das tatsächliche Unterscheidungsvermögen der Versuchsperson (ihre *Sensitivität*) von ihrer generellen *Antwortneigung* (engl. *response bias*; strenges oder laxes Kriterium) getrennt werden kann.

Tabelle 2.1 Klassifikation von Antworten in der Signalentdeckungstheorie. Englische Begriffe werden in Klammern angegeben, da sie auch in der deutschsprachigen Literatur geläufig sind

	Reiz präsentiert	Kein Reiz präsentiert
Beobachter entscheidet: »Reiz präsentiert«	Treffer (Hit)	Falscher Alarm (False Alarm)
Beobachter entscheidet: »Kein Reiz präsentiert«	Verpasser (Miss)	Korrekte Ablehnung (Correct Rejection)

2.1.4 Entscheidungsmodelle und Criterion Content

Die Psychophysik versucht nicht nur, die subjektive Wahrnehmung zu quantifizieren und zu skalieren, sondern das gesamte Entscheidungsverhalten der Versuchsperson in einer Wahrnehmungsaufgabe zu verstehen (Green & Swets, 1966). Es gibt daher spezialisierte Entscheidungsmodelle für die verschiedensten Arten von psychophysischen Experimenten (Hautus et al., 2021). Allen diesen Modellen ist gemeinsam, dass sie das Entscheidungsverhalten der Versuchsperson in den psychophysischen Prozess einzurechnen versuchen. Dabei ist es auch entscheidend, welche Information die Versuchsperson tatsächlich für ihre Entscheidung heranzieht. Falls die Aufgabe etwa verlangt, freundliche Gesichter von unfreundlichen zu unterscheiden, ist es nicht garantiert, daß die Versuchsperson tatsächlich die gezeigte Emotion erfasst, sondern vielleicht löst sie die Aufgabe, indem sie lediglich einen kleinen Bildausschnitt im Bereich des Mundwinkels betrachtet. Der spätere Nobelpreisträger Daniel Kahneman hat 1968 den Begriff des *Criterion Content* eingeführt, um die Information zu beschreiben, die die Versuchsperson tatsächlich für ihre Entscheidung verwendet. Criterion Content und Entscheidungsmodell sind die wichtigsten Eigenschaften, die eine psychophysische Aufgabe charakterisieren.

Praxiswissen

Psychologie trifft auf Technologie

Psychophysische Methoden und Modelle sind nicht nur im Wahrnehmungslabor interessant. Sie spielen eine entscheidende Rolle an den vielfältigen Schnittstellen zwischen Informationstechnologie und menschlicher Wahrnehmung. Hier einige Beispiele:

- ▶ Bedienungsfreundliche Lautstärkeregler sind so gestaltet, dass gleichmäßiges Drehen des Reglers zu einer proportionalen Erhöhung der wahrgenommenen Lautheit führt.
- ▶ Bei der Konstruktion von Hörgeräten muss die Sensitivität des auditiven Systems für bestimmte Tonfrequenzen in verschiedenen Hörsituationen berücksichtigt werden.
- ▶ Bei der Kompression von Bild- und Toninformation in Computermedien (z.B. JPG-Bilder und MP3-Audiodateien) wird vor allem die Information eingespart, für die die menschliche Wahrnehmung am wenigsten empfindlich ist.

Fazit

Die Psychophysik verwendet verschiedene Methoden, um physikalische Reize in quantitative Beziehung zur subjektiven Wahrnehmung zu setzen (z.B. Webersches und Fechnersches Gesetz). Besonders umfassend ist das Stevenssche Gesetz, das die wahrgenommene Reizgröße als Potenzfunktion der physikalischen Reizstärke darstellt. Methoden der Signalentdeckungstheorie können eingesetzt werden, um die tatsächliche Sensitivität von Beobachter:innen von ihren persönlichen Antwortneigungen zu trennen. Eine psychophysische Aufgabe wird durch Entscheidungsmodell und Criterion Content charakterisiert. Psychophysik spielt eine entscheidende Rolle an der Schnittstelle zwischen Informationstechnologie und menschlicher Wahrnehmung.

2.2 Visuelle Wahrnehmung

2.2.1 Licht und optische Aspekte der Wahrnehmung

Licht. Wir können ein Objekt sehen, wenn Licht von der Oberfläche des Objekts reflektiert wird, in unser Auge fällt und im Gehirn eine Helligkeitsempfindung hervorruft. Unter Licht versteht man elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 400 und 700 Nanometern (nm, 1 nm = 1 Millionstel mm). Elektromagnetische Strahlung außerhalb dieses engen Bereichs können wir nicht visuell wahrnehmen; es gibt aber Lebewesen, die auch Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung oberhalb von 700 nm; z.B. einige Schlangenarten) oder ultraviolette Strahlung (unterhalb von 400 nm; z.B. Honigbienen) wahrnehmen können. Licht geringer Wellenlänge erscheint uns blau, Licht hoher Wellenlänge rot; dazwischen liegen die Spektralfarben (Regenbogenfarben), die man z.B. bei einem Blick durch ein Prisma wahrnehmen kann. Im Allgemeinen ist das Licht, das auf unsere Augen trifft, aber aus vielen Wellenlängen gemischt.

Wellenlängen. Wir können Objekte sehen, wenn diese das Licht in ihrer Umgebung so reflektieren, dass ein Teil davon auf unsere Augen trifft. Die Wellenlängen, die vom Objekt reflektiert werden, bestimmen seine wahrgenommene Farbe, während andere Wellenlängen absorbiert werden und unser Auge nicht erreichen. Ein Stoppschild sieht also deshalb rot aus, weil es rot erscheinendes Licht hoher Wellenlängen reflektiert und Licht aller anderen Wellenlängen absorbiert. Ähnlich ist es bei transparenten Gegenständen: Ein rotes Glasfenster lässt Licht hoher Wellenlängen durch das Glas treten, aber absorbiert die restlichen Wellenlängen. Weiße Oberflächen reflektieren alle Wellenlängen ungefähr gleichmäßig; schwarze

Flächen absorbieren alle Wellenlängen ungefähr gleichmäßig. Weil Licht bei der Absorption in Wärme umgewandelt wird, heizen sich dunkle Oberflächen im Sonnenlicht auf.

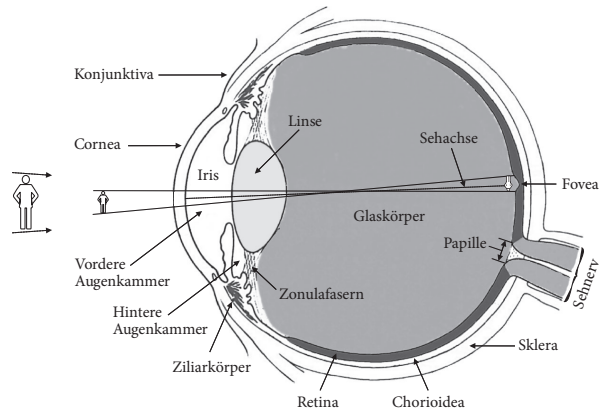
Evolution optischer Systeme. Das visuelle System hat sich aus einer Art Wettrüsten konkurrierender Arten entwickelt (Land & Nilsson, 2002). Einfachste Lebewesen sind zwar ohne visuelle Wahrnehmungsfähigkeiten lebensfähig, aber sie sind darauf angewiesen, dass ihnen ihre Beute quasi in den Mund schwimmt. Doch schon die einfachsten Wahrnehmungsleistungen verschaffen diesen Tieren einen evolutionären Vorteil vor konkurrierenden Arten. Die einfachsten visuellen Systeme bestehen aus sog. Augenflecken auf der Körperoberfläche von Einzellern, die so mit den Fortbewegungsmechanismen des Tierchens verschaltet sind, dass es sich z. B. von der hellen Meeresoberfläche wegbewegt. Fortgeschrittenere Systeme bestehen aus mehreren Augenflecken, die schon eine grobe Ortung von Licht und Schatten ermöglichen. Diese Ortungsfähigkeiten verbessern sich drastisch, wenn die Sinneszellen in einer Art Grube angeordnet sind. Macht man den Eingang der Grube sehr eng, kann das System sogar wie eine Lochkamera funktionieren, und es kann ein scharfes Bild auf die Sinnesrezeptoren projiziert werden. Leider ist die verbleibende Lichtmenge dann sehr schwach. Es bietet daher einen Vorteil, wenn sich in der Öffnung eine Linse entwickelt, die mehr Licht einlässt und die das Licht bündeln und fokussieren kann. Eine solche Aufrüstung des visuellen Systems findet auch auf neuronaler Ebene statt: Während das visomotorische System von Einzellern aus einer direkten biochemischen Kopplung der Augenflecken mit dem Fortbewegungssystem besteht, ist bei Säugetieren und besonders Primaten der größte Teil ihres riesigen Gehirns mit visueller Wahrnehmung und visuell gesteuerter Motorik beschäftigt.

Das Auge

Unser Auge ist ein komplizierter optischer Apparat, der die Funktion hat, ein möglichst scharfes Bild unserer Umgebung auf die lichtempfindliche Netzhaut zu werfen. Damit muss das Auge ähnliche Anforderungen erfüllen, die auch für einen Fotoapparat gelten. Im Verlauf der Evolution haben sich tatsächlich Strukturen im Auge entwickelt, die mit den Komponenten einer modernen Kamera vergleichbar sind.

Optischer Apparat. Die Netzhaut oder Retina ist der lichtsensitive Teil des Auges. Sie entspricht dem Film in einer Kamera. Bevor das Licht die Retina erreicht, muss es einen komplizierten optischen Apparat durchlaufen: Es dringt zuerst durch die transparente Hornhaut, wird dann von der Linse gebündelt und dringt anschließend durch den gallertartigen Glaskörper. Schließlich muss das Lichtsignal noch mehrere Zellschichten der Netzhaut und ein Geflecht von Blutgefäßen durchqueren, bevor es die lichtempfindlichen Elemente der Netzhaut, die Photorezeptoren, erreicht. Wie in einer Kamera gibt es eine Blende, die Iris, die eingesetzt

Abbildung 2.2 Querschnitt durch das menschliche Auge. Das von einem Objekt reflektierte Licht wird durch die Linse gebündelt. Wird das Objekt fixiert, liegt es auf der Sehachse, d.h. es wird in der Fovea der Retina scharf abgebildet. Die Retina (Netzhaut) ist die lichtempfindliche Schicht des Auges; sie ist von weiteren Hautschichten umhüllt (Sklera und Chorioidea). An der Stelle, an der der Sehnerv das Auge in Richtung Gehirn verlässt, befindet sich der blinde Fleck des Auges (hier Papille genannt). Das Licht fällt zunächst durch die transparente Cornea



(Hornhaut), die das Auge vor mechanischen Reizen schützt und ein Fortsatz der Conjunctiva (Bindehaut) ist. Es dringt dann durch die flüssigkeitsgefüllte vordere Augenkammer und die Pupille der Iris (Regenbogenhaut), die wie die Blende einer Kamera funktioniert: Die Iris kontrolliert die Größe der Pupille und reguliert auf diese Weise, wieviel Licht auf die Retina fällt. Dann passiert das Licht die Linse und den gallertartigen Glaskörper, der dem Auge seine stabile runde Form gibt. Damit auf der Retina ein scharfes Bild erzeugt werden kann, muss die Dicke der Linse je nach Abstand des Objektes verstellt werden. Dies geschieht im Bereich der hinteren Augenkammer durch einen ringförmigen Muskel (Ziliarkörper), der über die Zonulafasern an den Rändern der Linse zieht (nach Schmidt & Schaible, 2001).

werden kann, um den Lichteinfall ins Auge zu regulieren: Bei starkem Licht ist sie eng gestellt, sodass die Pupillen klein werden, bei schwachem Licht öffnet sie sich weit. (Da Personen mit großen Pupillen als sympathischer beurteilt werden, finden Rendezvous am besten bei schummrigen Licht statt.)

Linse. Auch die Linse ist verstellbar. Sie bewegt sich allerdings nicht wie in einer Kamera vor und zurück, sondern ändert ihre Dicke durch den Zug eines ringförmigen Muskels, in den sie eingespannt ist. Fixieren wir ein weit entferntes Objekt, wird dieser Muskel entspannt. Der Muskelring weitet sich dabei und zieht an der Linse, sodass diese sich abflacht und ihren Brennpunkt so verändert, dass das fixierte Objekt scharf auf der Netzhaut abgebildet wird. (Die meisten anderen Objekte werden tatsächlich unscharf abgebildet.) Fixieren wir hingegen einen nahen Gegenstand, muss unsere Linse kugelig sein, um die Lichtstrahlen stärker brechen zu können. In diesem Fall wird der Ringmuskel der Linse angespannt und dadurch enger, sodass der Zug auf die Linse vermindert wird und die Linse kugelig wird. Durch diesen Mechanismus kann auch ein dicht vor dem Auge gelegenes Objekt noch scharf auf der Netzhaut abgebildet werden.

Akkommodation. Die systematische Verstellung der Linse je nach Entfernung des fixierten Objekts wird Akkomodation genannt. Im Alter fällt die Akkomodation schwerer, weil der Ringmuskel an Spannung und die Linse an Elastizität verliert; sie wird beim Betrachten naher Objekte nicht mehr rund genug und beim Betrachten weit entfernter Objekte nicht mehr flach genug (Altersweitsichtigkeit, Presbyopie). Deshalb entfernt sich der Nahpunkt (der kleinste Abstand, in dem Objekte noch scharf gesehen werden können) mit zunehmendem Lebensalter immer weiter vom Auge, und wir müssen schließlich die mangelnde Brechkraft der Linse durch eine Lesebrille ausgleichen. Andere Fehlsichtigkeiten (Kurz- und Weitsichtigkeit) entstehen zumeist, wenn der Augapfel zu lang oder zu kurz für das optische System ist, sodass das Licht nicht mehr scharf auf der Netzhaut abgebildet wird. Auch in diesem Fall müssen wir mit künstlichen Linsen nachhelfen. Für das Akkomodationsproblem hat die Evolution übrigens auch andere Lösungen gefunden: Beim Oktopus z. B. bleibt die Form der Linse unverändert, stattdessen wird der gesamte Augapfel durch Muskeln plattgedrückt.

Fazit

Licht ist ein Gemisch von elektromagnetischen Strahlen unterschiedlicher Wellenlänge, das von Objekten der Umwelt in unser Auge reflektiert wird. Das Auge ist ein optisches System, das dazu dient, ein möglichst scharfes Bild der Umwelt auf die lichtensitive Netzhaut zu projizieren und dabei die Entfernung des fixierten Objekts und die Lichtmenge zu berücksichtigen.

2.2.2 Die Netzhaut

Transduktion von Licht in Nervenimpulse. Damit das Gehirn visuelle Information verarbeiten kann, müssen Lichtsignale in Nervenimpulse umgewandelt werden. Die Umsetzung von Licht in ein elektrisches Signal wird photoelektrische Transduktion genannt und findet in der Retina statt. Die Retina enthält zwei Typen von Photorezeptoren, *Stäbchen* und *Zapfen*. Diese enthalten spezialisierte Eiweißmoleküle, die Sehfärbstoffe, die bei der Absorption von Licht ihre Form ändern. Durch einen faszinierenden biochemischen Prozess (beschrieben bei Stryer, 1991) kann schon die Absorption eines einzelnen Photons eine Kaskade von Prozessen in Gang setzen, die am Ende zum Aufbau eines elektrischen Potenzials in der Membran der Zelle führt.

Dieses System muss letztendlich in der Lage sein, einzelne Photonen zu verarbeiten. Rodieck (1998) erklärt dies am Beispiel des Lichtstroms vom Polarstern. Wenn man sich diesen Lichtstrom als eine Säule vom Durchmesser der Pupille vorstellt, so fallen in einer Zehntelsekunde nur etwa 9.400 Photonen in unser Auge.

Die durchschnittliche Distanz zwischen ihnen auf ihrem Weg vom Polarstern zur Erde beträgt etwa drei Kilometer. Die Photonen dringen also einzeln ins Auge ein, und es ist extrem unwahrscheinlich, dass zwei von ihnen ungefähr zeitgleich das gleiche lichtaktive Molekül treffen. Trotzdem kann unser Auge diese schwachen Signale sammeln, die schließlich zur bewussten Wahrnehmung des Sterns führen.

Architektur der Netzhaut. Die Netzhaut besteht aus verschiedenen Typen von Zellen, die so miteinander verschaltet sind, dass schon hier die ersten Schritte der visuellen Verarbeitung stattfinden (Tessier-Lavigne, 1991). Die Photorezeptoren (Zapfen und Stäbchen) sind über die Bipolarzellen mit den Ganglienzellen verschaltet. Ganglienzellen sind die »Output-Zellen« der Netzhaut und geben die visuelle Information ans Gehirn weiter. Dabei ist das Verschaltungsverhältnis entscheidend. Werden sehr viele Rezeptoren mit einer einzigen Ganglienzelle verschaltet, hat das eine verstärkende Wirkung: Selbst bei schwachem Lichteinfall kann die Ganglienzelle aktiviert werden, auch wenn die einzelnen Rezeptorzellen nur schwach aktiv sind. Die Ganglienzelle ist dann aber auch für einen großen Teil der Netzhaut zuständig und trägt nur wenig zum räumlichen Auflösungsvermögen des Systems bei. Für ein gutes räumliches Auflösungsvermögen ist es hingegen nötig, jede Rezeptorzelle mit einer eigens für sie zuständigen Ganglienzelle zu verschalten; nur muss dann der Lichteinfall auch ausreichend sein, um schon einzelne Rezeptorzellen zu aktivieren.



Unsere **Retina** folgt einem Kompromiss zwischen Auflösungsvermögen und Lichtempfindlichkeit: Das **Zapfensystem** hat ein hohes räumliches Auflösungsvermögen, ist aber auf ausreichenden Lichteinfall angewiesen, während das **Stäbchensystem** auch bei sehr schwachem Licht funktioniert, dafür aber ein schlechtes Auflösungsvermögen hat.

Es gibt in jedem der beiden Augen eine Stelle, die weder Zapfen noch Stäbchen enthält: Das ist der sog. Blinde Fleck, an dem die Axone der Ganglienzellen den Sehnerv bilden und das Auge in Richtung Gehirn verlassen. Die an dieser Stelle fehlende visuelle Information wird mit Information aus der unmittelbaren Nachbarschaft ergänzt, sodass der Blinde Fleck normalerweise nicht auffällt. Außerdem liegen die Blinden Flecke der beiden Augen nicht an korrespondierenden Stellen der Netzhäute, sodass die blinde Stelle des einen Auges durch Information aus dem anderen Auge ergänzt wird.

Zapfen- und Stäbchensysteme. Die Zapfen sind vor allem im Bereich des schärfsten Sehens, der Fovea centralis, und deren unmittelbarer Umgebung konzentriert; in der Fovea ist tatsächlich jede Zapfenzelle mit einer einzigen Ganglienzelle verschaltet (Tessier-Lavigne, 1991). Außerdem ist die Dichte der Photorezeptoren (vor allem der Zapfen) dort sehr hoch (ca. 50.000 pro mm²). Zur Peripherie hin nimmt die Dichte der

Zapfen immer weiter ab (auf bis zu 1.000 pro mm^2). Gleichzeitig nimmt auch die Anzahl der Ganglienzellen zur Peripherie hin ab; jede Ganglienzelle ist in der Peripherie für immer mehr Photorezeptoren zuständig (Konvergenzprinzip). Entsprechend nimmt das räumliche Auflösungsvermögen zur Peripherie hin rasch ab. Das Vorhandensein von drei verschiedenen Zapfentypen erlaubt uns das Farbsehen (s. u.). In Dämmerung und Dunkelheit sind die Zapfen nicht zu gebrauchen. Hier kommen die Stäbchen ins Spiel. Sie sind gleichmäßiger über die Netzhaut verteilt als die Zapfen, kommen allerdings nicht in der Fovea vor (daher haben wir nachts Schwierigkeiten, einen lichtschwachen Stern zu fixieren). Da viele Stäbchen mit wenigen Ganglienzellen verschaltet sind, wirken ihre Signale bei der Aktivierung der Ganglienzelle zusammen, sodass bereits sehr schwache Lichtsignale entdeckt werden können. Das Vorhandensein der zwei verschiedenen Photorezeptortypen in der Retina bewirkt also, dass unsere Wahrnehmung unter ganz unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen funktioniert.

Hell- und Dunkeladaptation. Wenn wir vom hellen Tageslicht in einen dunklen Raum kommen, sehen wir zunächst einmal gar nichts: Das schwache Licht reicht nicht mehr aus, um das Zapfensystem zu aktivieren, und das empfindliche Stäbchensystem muss sich zunächst vom hellen Tageslicht erholen. Dies bedeutet, dass biochemische Vorgänge in den Stäbchen die Sehfärbstoffe wieder in ihren Ausgangszustand versetzen müssen, in welchem diese auf neue Lichtreize reagieren können. Für den ersten, schnellen Anstieg in der Dunkeladaptation während der ersten fünf Minuten ist die Erholung im Zapfensystem verantwortlich. Gleichzeitig erholen sich auch die Sehfärbstoffe im Stäbchensystem. Der sogenannte Kohlrausch-Knick markiert den Zeitpunkt, an dem das Stäbchensystem empfindlicher wird als das Zapfensystem. Nach ca. 30 Minuten ist schließlich die maximale Empfindlichkeit erreicht. Treten wir jetzt wieder ins Licht hinaus, werden beide Systeme von Aktivität überflutet, und wir fühlen uns geblendet: Wir benötigen eine kurze Phase der Helladaptation, um uns an die neuen Lichtverhältnisse anzupassen.

Die Vorstellung, dass Sinneszellen nach längerer Aktivität einfach »ermüden«, ist allerdings irreführend. Vielmehr sind Adaptationsphänomene ein Zeichen dafür, dass sich das System beim Aufenthalt in bestimmten Wahrnehmungsumwelten neu kalibriert: Es verschiebt seinen Empfindlichkeitsbereich so, dass die Umwelt mit größtmöglicher Effizienz wahrgenommen werden kann. Adaptation gibt es in allen Wahrnehmungssystemen, und sie kann verschiedenste Aspekte der Wahrnehmung betreffen.

Definition

Adaptation bezeichnet allgemein die Tatsache, dass wiederholte Reizung mit dem gleichen Stimulus zu einer Abnahme der Reizantwort führt. Adaptation stellt eine ständige Neukalibrierung dar, durch die sich das Wahrnehmungssystem auf die derzeitigen Umweltgegebenheiten einstellt.

Selbstversuch

Farbadaptation

Schließen Sie die Augen und wenden Sie Ihr Gesicht der Sonne zu. Die Sonne scheint durch die geschlossenen Lider, und Sie sehen ein homogenes Rot. Wenn Sie jedoch eine Weile warten, lässt der Roteindruck nach und wird immer mehr zu einem neutralen Farbton. Wenn Sie jetzt die Augen öffnen, erscheint die Welt bläulich. (Machen Sie sich keine Sorgen: Der Effekt verschwindet innerhalb einer Minute.)

Sie können diesen Versuch variieren, indem Sie ein Auge abdecken, sodass nur wenig Sonnenlicht durch das geschlossene Lid dringt. Warten Sie, bis der Roteindruck im unbedeckten Auge nachgelassen hat, und schauen Sie dann Ihre Umgebung abwechselnd mit dem einen und dem anderen Auge an. Durch das zuvor abgedeckte Auge erscheint die Welt in normalen Farben, durch das rotadaptierte Auge sieht sie bläulich aus. Mit farbig getönten Brillen können Sie natürlich ähnliche Effekte erzielen: Nach längerer Adaptation an eine Brille bestimmter Farbe erscheint die Umgebung in der entsprechenden Komplementärfarbe.

Achtung: Schauen Sie niemals mit geöffneten Lidern in die Sonne – die starke Strahlung würde Ihre Netzhaut nachhaltig schädigen.

2.2.3 Von der Netzhaut zum Gehirn

Die besondere Bedeutung der visuellen Wahrnehmung für Menschen und andere Primaten kann man an der Größe und der Anzahl der beteiligten Gehirnareale abschätzen. Neben dem primären visuellen Kortex (V1), der etwa 15% der gesamten Großhirnrinde ausmacht, wurden bisher zahlreiche weitere visuelle Areale beschrieben (Felleman & Van Essen, 1991). Selbst Areale, die schwerpunktmäßig ganz andere Funktionen haben (wie z. B. der primäre motorische Kortex), besitzen häufig visuelle Zellen. Insgesamt sind etwa 60% der Großhirnrinde an der Wahrnehmung, Interpretation und Reaktion auf visuelle Reize beteiligt.

Nachdem die Lichtinformation im Auge in die elektrischen Signale der Ganglienzellen übersetzt worden ist, verlässt sie über den Sehnerv, der aus den Axonen der Ganglienzellen gebildet wird, das Auge in Richtung Gehirn. Kurz vor Eintritt ins Gehirn verzweigen sich die Sehnerven aus beiden Augen und bilden das Chiasma opticum (Sehnervkreuzung). Von dort gelangt die Information über verschiedene Faserverbindungen in den visuellen Kortex (Mason & Kandel, 1991). Die wichtigste Sehbahn verläuft über den im Thalamus liegenden Seitlichen Kniehöcker (Corpus geniculatum laterale; CGL) zum primären visuellen Kortex (V1) im Okzipitalkortex (Abb. 2.3 und 2.4).

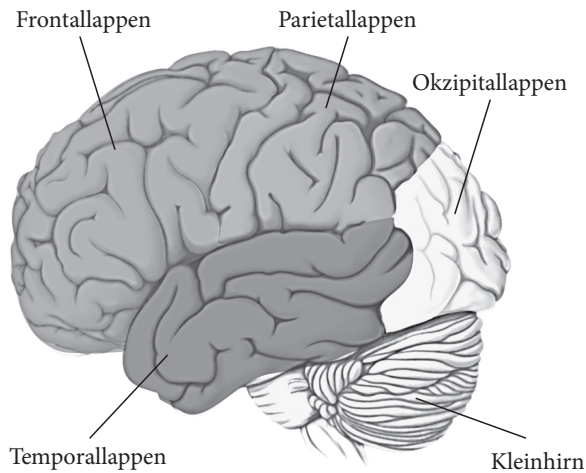


Abbildung 2.3 Kortex des Vorderhirns. Der Kortex lässt sich grob in Okzipitallappen, Parietallappen, Temporallappen und Frontallappen unterteilen. Der dorsale Pfad der visuellen Verarbeitung verläuft vom Okzipital- zum Parietallappen; der ventrale Pfad vom Okzipital- zum Temporallappen. Zusätzlich ist in der Abbildung das Kleinhirn (Cerebellum) zu sehen, das kein Teil des Vorderhirns ist (nach Schandry, 2003).

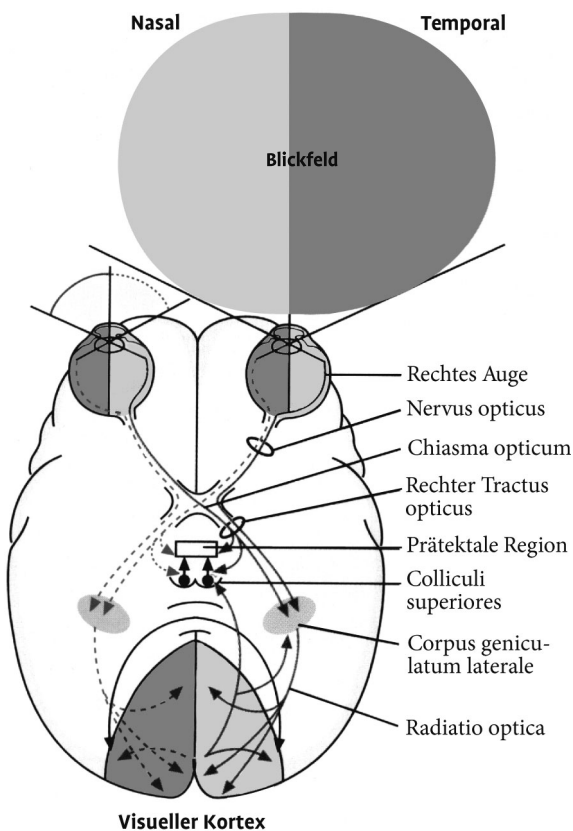


Abbildung 2.4 Querschnitt durch das visuelle System. Die Sehnerven (linker und rechter Nervus opticus) der beiden Augen kreuzen sich im Chiasma opticum und bilden dadurch einen linken und einen rechten optischen Trakt (Tractus opticus). Der größte Teil der Nervenfasern führt zum CGL im Thalamus; von dort fächern sich die Nervenfasern auf (Sehstrahlung oder Radiatio optica) und erreichen den primären visuellen Kortex. Eine weitere Bahn verläuft über die prätektale Region zum Colliculus superior, dem visuellen Zentrum des Mittelhirns. Da sich im Chiasma nur die Nervenfasern der nasenwärts gelegenen Teile der Netzhaut überkreuzen, nicht aber die der schläfenwärts gelegenen Teile, empfängt am Ende der rechte visuelle Kortex Information über die linke (kontralaterale) Hälfte des visuellen Feldes. Für den linken visuellen Kortex ist es entsprechend umgekehrt (nach Thews et al., 1999).

Das visuelle Signal wird in Areal V1 sowie in den angrenzenden Arealen V2, V3, V4 und V5 (auch mediotemporaler Kortex, MT genannt) in vielfältiger Weise analysiert. Dazu wird jeder Teil des Gesichtsfelds im Hinblick auf Farbe, Orientierung, Bewegung, räumliche Tiefe usw. untersucht. Von V1 ausgehend scheint die kortikale Verarbeitung der visuellen Information über zwei Hauptpfade zu verlaufen, über einen dorsalen Verarbeitungsweg, der zum Parietalkortex verläuft, und über einen ventralen Verarbeitungsweg, der zum Temporalkortex zieht. Parietal- und Temporalkortex sind wiederum mit dem Frontalkortex verbunden, der für komplexe Entscheidungsvorgänge und Handlungssteuerung zuständig ist. Ein alternativer Verarbeitungsweg verläuft über den Colliculus superior, das visuelle Zentrum des Mittelhirns. Dieser Kern spielt eine wichtige Rolle bei der Umsetzung von visueller Information in Blick- und Orientierungsbewegungen (Sparks, 1999).

Das Chiasma opticum sorgt zunächst dafür, dass das CGL auf jeder Seite des Gehirns Informationen aus beiden Augen erhält (Abb. 2.4). Das linke CGL erhält dabei die Informationen aus dem rechten visuellen Feld, während das rechte CGL Informationen aus dem linken visuellen Feld enthält. Im visuellen Kortex wird die Information aus beiden Augen wieder kombiniert, wobei aber jede Gehirnhälfte für Information aus dem ihr gegenüber liegenden (kontralateralen) Teil des visuellen Felds zuständig bleibt.

Fazit

Die Photorezeptoren der Netzhaut unterscheiden sich in ihrer Lichtempfindlichkeit: Die Zapfen sind für das Sehen von Farbe und Helligkeit bei Tageslicht verantwortlich, die Stäbchen für das Sehen unter schwachen Lichtverhältnissen. Der Übergang von einem Sehsystem zum anderen erfordert Licht- oder Dunkeladaptation. Unterschiedliche Konvergenz auf die retinalen Ganglienzellen führt dazu, dass nur die Zapfen das Sehen mit hoher räumlicher Auflösung erlauben. Visuelle Information erreicht das Gehirn über verschiedene Pfade. Der wichtigste davon führt über das Corpus geniculatum laterale (CGL) des Thalamus zum primären visuellen Kortex (V1). Durch die Beschaffenheit der Sehbahnkreuzung wird jede Hälfte des visuellen Felds in der kontralateralen Hirnhälfte verarbeitet.