Geleitwort

Noch ein weiteres Lehrbuch – „workbook“ – zur Allgemeinen Psychologie? Ist der Markt nicht mit Lehrbüchern gesättigt? Hat sich so viel Neues in der Forschung ergeben, dass ein neues Buch notwendig wird? Diese und ähnliche Fragen gehen mir durch den Kopf, wenn ich das neue Buch „Allgemeine Psychologie“ von Miriam Spering und Thomas Schmidt in die Hand nehme.

Tatsächlich gibt es gleich mehrere Gründe für ein neues Buch. Zum einen hat sich durch die Einführung von Bachelor-Studiengängen die Unterrichtssituation an den Hochschulen geändert: Module sind jetzt als Ersatz für die alten Prüfungsfächer angetreten, das Wissen unseres Faches in handhabbare Portionen zu zerteilen. Zugleich ist eine Entschlackung der Inhalte gefordert, da die um ein Jahr auf drei Jahre verkürzte Studienzeit nicht den gesamten ursprünglichen Inhaltsstoff des Diplomstudiengangs aufnehmen kann. Außerdem wird Anwendungsnähe gefordert – auch das muss jetzt bei der Stoffvermittlung beachtet werden.

Thomas Schmidt und Miriam Spering haben sich dieser Herausforderung gestellt und verfolgen mit dem vorliegenden Ausschnitt aus der Allgemeinen Psychologie die genannten Ziele. Für die Teilgebiete der Wahrnehmung, Aufmerksamkeit, Denken und Sprache geben sie einen Ausschnitt wieder, der für die jeweiligen Gebiete repräsentative Ansätze und experimentelle Befunde auswählt. Gut gefällt mir, dass sowohl überblicksartige Darstellungen als auch punktuelle Vertiefungen (in den Kästen) einander abwechseln. Auch die Darstellung spezifischer allgemeinpsychologischer Methoden kommt nicht zu kurz. Das empirisch-experimentelle Vorgehen, das für die Allgemeine Psychologie so charakteristisch ist und sie z.B. von korrelativen Techniken der Differentiellen Psychologie abhebt, lernt man bei der Lektüre dieses Buches sozusagen im Vorbeigehen.

Die Allgemeine Psychologie ist ein so umfassendes Teilgebiet der Psychologie, dass die in diesem Buch versammelten Inhalte keine vollständige Abdeckung der jeweiligen Bereiche liefern. Dennoch mag die vorgenommene Auswahl als „Appetizer“ dienen, die Lust auf mehr Allgemeine Psychologie macht. Etwas Besseres kann ich mir kaum vorstellen. In diesem Sinne wünsche ich dem Buch viele Leserinnen und Leser, die durch die Lektüre angeregt werden zur weiteren Vertiefung der einzelnen Gebiete.

Joachim Funke (Heidelberg)

Vorwort

Allgemeine Psychologie macht Spaß! Wir haben dieses Lehrbuch verfasst, weil wir unseren Leserinnen und Lesern 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 bietet.

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 das Vordiplom bzw. 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 Leserinnen und Leser in die Lage versetzen, das experimentelle 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: „Warum wurde genau dieses Experiment durchgeführt, sind die Schlussfolgerungen überzeugend, und welche weiteren Fragen ergeben sich daraus?“

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 (Braunschweig), an dieser Stelle ganz herzlich danken. Wir danken außerdem Letizia Gauck, Tanja Grewe, Lisa Irmen und Frank Jäkel, die zu einzelnen Kapiteln dieses Buches hilfreiche Rückmeldung gegeben haben. Das Buch verdankt seine Lesbarkeit jedoch in erster Linie der kompetenten Hilfe von Seiten des Beltz Verlags in Weinheim, insbesondere Heike Berger, Anja Renz und Marion Sonnenmoser, bei denen wir uns für die vorzügliche Unterstützung und viele hilfreiche Ratschläge bedanken möchten. 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.

New York und Gießen, im März 2008 — Miriam Spering und Thomas Schmidt

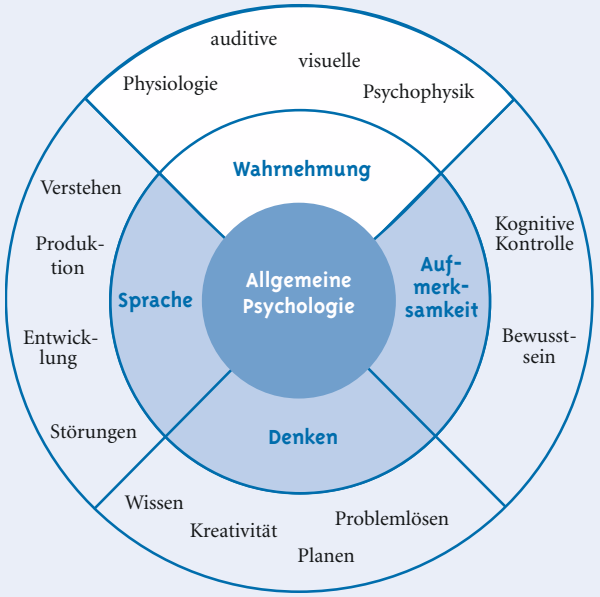
2 Wahrnehmung

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 Apparates 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 es nicht eindeutig, und das visuelle System ist darauf angewiesen, zu erraten, welcher Reiz dem Netzhautbild am plausibelsten zu Grunde 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 Segelschiffes 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 sehen, dass der eigentliche Zweck unserer Wahrnehmungsfunktionen nicht ein „Kino im Kopf“ ist, d. h. eine Revue von Bildern und Klängen. Statt dessen 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 herauszutreten 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 Schmerzwahrnehmung.



2.1 Psychophysik

2.1.1 Sinnesmodalitäten und Wahrnehmungsspezifität

Unsere Sinnesorgane wandeln physikalische Signale (z. B. Lichtsignale oder mechanische Schwingungen) in elektrische Impulse (Aktionspotentiale) von Nervenzellen um. Den im Gehirn eintreffenden Aktionspotentialen 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 Aktionspotential auf andere Art als vorgesehen ausgelöst, z. B. durch einen Schlag 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 in der Lage, ein einzelnes Photon (die kleinste physikalisch vorstellbare Lichtmenge) in eine bewusste Sinnesempfindung umzuwandeln (Hecht, Schlaer & Pirenne, 1942). 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 unser 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 bescheiden klingen, aber psychophysische Methoden verraten viel über die Funktionsweise des sensorischen Systems.

Verschiedene Methoden. Psychophysiker verwenden verschiedene Methoden, um die Absolutschwelle etwa für Lichtblitze oder Töne zu bestimmen (Gescheider, 1997; 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 alleine, sondern zusammen mit einem Referenzreiz dargeboten, und es gilt zu beurteilen, bei welchem physischen Reizunterschied die Reize verschieden erscheinen.

Experiment

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 Lichtpunktes 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 diesen festgelegten Wert überschreitet. Liegt ein Reiz unterhalb der Wahrnehmungsschwelle, ist er dadurch also noch nicht „unsichtbar", sondern seine Entdeckungswahrscheinlichkeit ist einfach kleiner als 50 %.

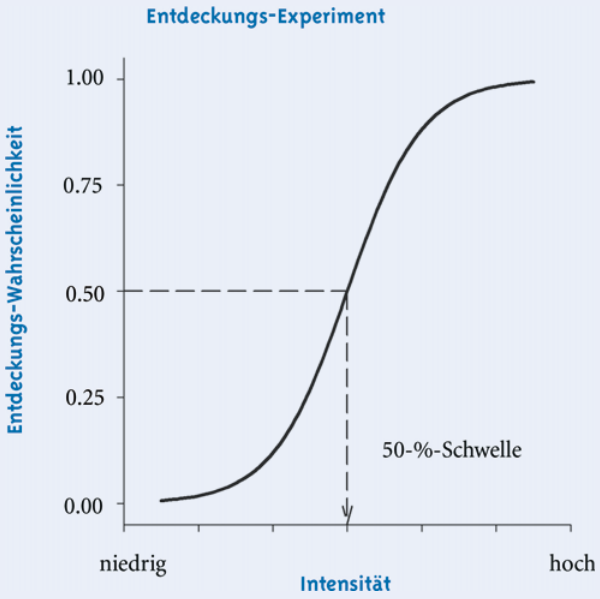


Abbildung 2.1 Psychometrische Funktion in einem Entdeckungsexperiment. Eine Versuchsperson soll in jedem Durchgang angeben, ob ein Reiz präsentiert worden ist oder nicht. Die Wahrscheinlichkeit, diesen Reiz zu entdecken (auf der *y*-Achse abgetragen) wächst mit der Intensität des Reizes an (auf der *x*-Achse 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 der 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 merklichen Unterschied (just noticeable difference, JND), und postulierte, dass der JND immer proportional zur Größe des Vergleichsreizes ist. Wenn man ein Gewicht von 1.000 Gramm z. B. um 10 % (100 g) erhöhen muss, damit der Unterschied gerade wahrnehmbar ist, dann muss man ein Gewicht von 2.000 Gramm ebenfalls um 10 % erhöhen – also um 200 Gramm. Dieser Zusammenhang ist als Webersches Gesetz bekannt.

Definition

Webersches Gesetz
Die Unterschiedsschwelle ΔS zweier Reize ist proportional zur Größe des Standardreizes 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 diese Regel 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.

Stevenssches Gesetz. Der Psychophysiker Stanley S. Stevens schlug noch 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).

Definition

Stevenssches 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.

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 des Beobachters (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 der Beobachter dabei ein feststehendes Kriterium benutzt: Wenn eine Empfindungsstärke das Kriterium über-

steigt, entscheidet der Beobachter, dass ein Reiz präsentiert wurde; ist die Empfindungsstärke dagegen geringer als das Kriterium, entscheidet er, dass kein Reiz präsentiert wurde. Mit dieser Strategie kann der Beobachter 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 der Beobachter entscheiden kann, ob ein Reiz präsentiert worden ist (je höher die Sensitivität des Beobachters 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 der Beobachter schon bei sehr geringen Empfindungsstärken, dass ein Reiz präsentiert worden ist – das erhöht zwar die Zahl seiner Treffer, führt aber auch zu vielen Falschen Alarmen. Bei einem strengen Kriterium hingegen entscheidet er nur bei sehr hohen Empfindungsstärken zugunsten des Reizes: Damit werden zwar viele Treffer, aber auch weniger Falsche Alarme erzielt. Stellen wir uns als Beispiel zwei Röntgenärzte vor, die Tumore auf Röntgenbildern entdecken sollen. Ein Arzt mit einem strengen Kriterium wird nur in drastischen Fällen einen Tumor melden, ein Arzt mit einem laxen Kriterium hingegen schon beim leisesten Verdacht.

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)

Der entscheidende Fortschritt der Signalentdeckungstheorie gegenüber früheren Verfahren ist, dass das tatsächliche Unterscheidungsvermögen des Beobachters (seine Sensitivität) von seiner generellen Antwortneigung (strenges oder laxes Kriterium) getrennt werden kann. Es gibt Signalentdeckungstheorien für die verschiedensten Arten von psychophysischen Experimenten (Macmillan & Creelman, 2004). Allen diesen Modellen ist gemeinsam, dass sie das Entscheidungsverhalten der Versuchsperson in den psychophysischen Prozess einzurechnen versuchen.

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 eines Beobachters von seinen persönlichen Antwortneigungen zu trennen.

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 Nanometer (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 niedriger 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- oder Schattenquellen 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 im Prinzip dieselben Anforderungen erfüllen, die auch für eine Filmkamera gelten. Im Verlauf der Evolutionen haben sich tatsächlich Strukturen im Auge entwickelt, die mit den Komponenten einer modernen Kamera vergleichbar sind.

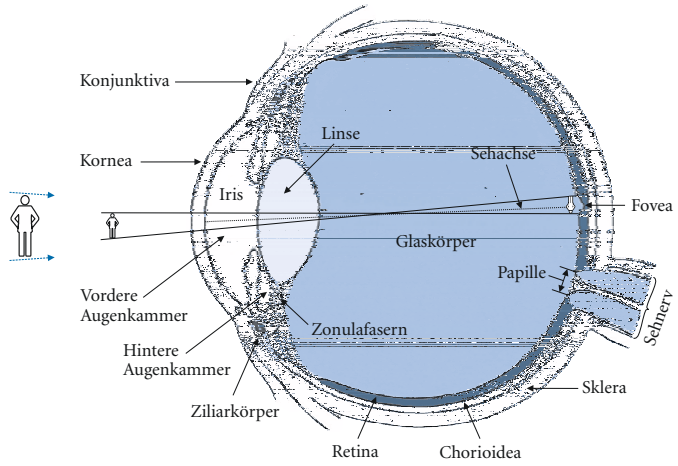


Abbildung 2.2 Querschnitt durch das menschliche Auge. Das von einem Objekt reflektierte Licht wird durch die Linse gebündelt. Wird das Objekt fixiert, liegt es auf der Sehachse, d. h. es wird in der Fovea der Retina scharf abgebildet. Die Retina ist die lichtempfindliche Schicht des Auges; sie ist von 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. 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).

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 werden kann, um den Lichteinfall ins Auge zu regulieren: Bei starkem Licht ist sie eng gestellt, so dass 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 schummrigem 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, so dass 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 kugeliger sein, um die Lichtstrahlen stärker brechen zu können. In diesem Fall wird der Ringmuskel der Linse angespannt und dadurch enger, so dass

der Zug auf die Linse vermindert wird und die Linse kugeliger wird. Durch diesen Mechanismus kann auch ein dicht vor dem Auge gelegenes Objekt noch scharf auf die Netzhaut abgebildet werden.

Akkomodation. Die systematische Verstellung der Linse je nach Entfernung des fixierten Objektes 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, so dass das Licht nicht mehr scharf auf der Netzhaut abgebildet wird. Auch in diesem Fall müssen wir mit künstlichen Linsen nachhelfen (Billig, Randall & Goldberg, 1998). Für das Akkomodationsproblem hat die Evolution übrigens auch andere Lösungen gefunden: Beim Oktopus z. B. bleibt die Form der Linse unverändert, und statt dessen 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 lichtsensitive Netzhaut zu projizieren.

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 Sehfarbstoffe, 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 Potentials in der Membran der Zelle führt.

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 Auflösungsvermö-

gen 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 Zapfen-System hat ein hohes räumliches Auflösungsvermögen, ist aber auf ausreichenden Lichteinfall angewiesen, während das Stäbchen-System 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, so dass der Blinde Fleck normalerweise nicht auffällt. Außerdem liegen die Blinden Flecke der beiden Augen nicht an korrespondierenden Stellen der Netzhäute, so dass 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 mm^2). Zur Peripherie hin nimmt die Dichte der Zapfen immer weiter ab (auf etwa 1.000 pro mm^2), und es sind immer weniger Ganglienzellen für immer mehr Zapfen zuständig. Entsprechend nimmt auch das räumliche Auflösungsvermögen zur Peripherie hin rasch ab. Das Vorhandensein von drei verschiedenen Zapfentypen erlaubt uns darüber hinaus das Farbensehen (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, so dass 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 Sehfarbstoffe 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 Sehfarbstoffe im Stäbchensystem. Der sog. 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.

Definition

Adaptation bezeichnet allgemein die Tatsache, dass wiederholte Reizung mit dem gleichen Stimulus zu einer Abnahme der Reizantwort führt. 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 den Empfindlichkeitsbereich der Sinneszellen so, dass die Umwelt mit größtmöglicher Effizienz wahrgenommen werden kann. Adaptation gibt es auch in der Farb- und der Bewegungswahrnehmung.

SELBST-VERSUCH

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 mehr als 30 verschiedene visuelle Areale beschrieben (Felleman & Van Essen, 1991). 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, dem Corpus geniculatum laterale (CGL), zum primären visuellen Kortex (V1) im Okzipitalkortex (Abb. 2.3). 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 unteren Temporalkortex zieht. Parietal- und Temporalkortex sind wiederum mit dem Frontalkortex verbunden, der für komplexe Entscheidungsvorgänge und Motorik 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 Feldes zuständig bleibt.