

Wahrnehmungspsychologie

1 Einführung

Die Wahrnehmung ist einer der grundlegendsten Prozesse, mit denen Psychologen sich beschäftigen. Es gibt keinen kognitiven Vorgang, der nicht direkt oder indirekt von der Wahrnehmung abhängig wäre. Lernen, Denken, Emotionen, all das ist ohne Wahrnehmung unmöglich, ohne Informationen aus der Umwelt. Man kann kognitive Vorgänge besser verstehen, wenn bekannt ist, welche Information auf welche Weise wahrgenommen wird. Umgekehrt muß man allerdings auch sagen, daß die Wahrnehmung von der übrigen Kognition nicht unabhängig ist. Was wir wissen, und (vor allem) was wir erwarten hat große Bedeutung für die Interpretation unserer Umwelt.

In der praktischen Anwendung sind Wahrnehmungspsychologische Erkenntnisse zahlreich einsetzbar. Ob es darum geht defekte Sinnesorgane zu ersetzen (z.B. durch Hörgeräte) oder die Akustik eines Konzertsaaes zu verbessern oder wohlriechende und anziehende Düfte zu erfinden; überall ist es wichtig zu wissen, wie wir auf solche Reize reagieren.

1.1 Wahrnehmen und Empfinden

In der Wahrnehmungspsychologie wird zwischen Wahrnehmung und Empfindung unterschieden¹. Empfinden meint das bloße Umsetzen externer Stimuli in interne **neuronale Repräsentationen**, kognitive Komponenten sind hier ausgeklammert. Im Gegensatz dazu die Wahrnehmung. Sie beinhaltet das Verständnis der Stimuli, die Umwelt bekommt einen Sinn.

Empfindung wäre beispielsweise ein Lichtpunkt am Himmel, erst durch die Wahrnehmung wird vermittelt, daß es sich bei dem Lichtpunkt um einen Stern handelt.

1.2 Wahrnehmung geschieht nicht einfach

Wahrnehmung erleben wir ständig, sie ist allgegenwärtig und (scheinbar) unkompliziert. Es bereitet uns keinerlei Mühe wahrzunehmen. Eigentlich ist Wahrnehmung jedoch ein sehr komplexer Vorgang.

In Tabelle 1 ist ein Modell dieses Vorgangs dargestellt. Es ist stark vereinfacht und kann der Komplexität der wirklichen

Tabelle 1

- | |
|---|
| 1. Ein Objekt reflektiert Licht |
| 2. Das Licht fällt im Auge auf die Netzhaut. |
| 3. Umformung in ein elektrisches Signal an den Rezeptoren |
| 4. Weiterleitung über Nervenzellen |
| 5. Ankunft im Kortex |
| 6. Analyse des Reizes |
| 7. Die Person nimmt das Objekt wahr. |

¹ Ich bin mir allerdings sicher, daß ich beide Begriffe in dieser Zusammenfassung völlig unsystematisch verwendet habe.

Prozesse nicht gerecht werden, verdeutlicht aber das Prinzip. Die Bewegung eines Objektes macht die Sache z.B. viel komplizierter, da sich eintreffende Signale ständig wandeln.

Darüber hinaus sind auch andere Funktionen des Gehirns in die Wahrnehmung eingebunden. Um ein Objekt zu identifizieren, müssen wir in unserem *Gedächtnis* nach entsprechendem Wissen suchen und für die weitere Verarbeitung des Reizes sind *Denkprozesse* notwendig.

Schließlich resultiert Wahrnehmung in einer *Reaktion*. Damit verändern wir erlebte Reize, oder es kommen neue hinzu, worauf der ganze Ablauf von vorne beginnt.

1.3 Theoretische Ansätze

Es gibt keine 'Theorie von der Wahrnehmung'. Jede Theorie beschränkt sich auf einen kleinen Bereich, wie etwa Farbsehen oder optische Täuschungen. Aber gibt es Theorien, die definieren aus welcher Perspektive Wahrnehmung betrachtet werden sollte. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten dieser Ansätze kurz angesprochen.

1.3.1 Strukturalismus

Der Strukturalismus ist nicht mehr von praktischer Bedeutung und nur noch historisch interessant. Nach dessen Auffassung setzt sich die Wahrnehmung additiv zusammen aus vielen Einzelteilen, den Elementarempfindungen.

1.3.2 Gestalttheorie

Das Credo der Gestaltpsychologie lautet: „*Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.*“ Damit ist dieser Ansatz eine Reaktion auf den Strukturalismus gewesen, der auch bald als unzureichend erkannt wurde. Begründer der Gestalttheorie ist MAX WERTHEIMER.

1.3.3 Konstruktivismus

Während Gestaltpsychologen nur untersuchten, welchen Einfluß verschiedene Stimuli auf die Wahrnehmung haben, untersuchten die Konstruktivisten darüber hinaus die Rolle des Beobachters. Sie verstehen Wahrnehmung als *aktives Konstruieren*. Zum Beispiel werden aktiv Informationen zu einem Bild gesammelt, indem es mit den Augen abgesucht wird, um jedes Detail der Szene zu erfassen.

1.3.4 Ökologischer Ansatz

Diese Betrachtungsweise wendete sich vom Konstruktivismus ab. Psychologen dieser theoretischen Richtung sind der Meinung, daß die Umwelt genügend Informationen bereitstellt, die direkt ableitbar sind; komplizierte Konstruktionen seien unnötig.

1.3.5 Kognitivismus

Im Kognitivismus wird die Rolle des Beobachters und seine Vorerfahrung betont. Personen haben Erwartungen, die einen erheblichen Einfluß darauf haben, welche Bedeutung einem Stimulus beigemessen wird.

2 Forschungsansätze

Wenn man sich mit Wahrnehmung auseinandersetzt, dann gibt es im Prinzip zwei Wege, nach Regelmäßigkeiten zu suchen: *physiologisch* oder *psychologisch*. Beide Ansätze sind für die Forschung wichtig. Es hängt vom Problem ab, welche Richtung man einschlagen muß, denn nicht jedes Problem, kann auf jede Art und Weise gelöst werden. Analog dazu wäre es, wenn jemand vor einem Computer sitzt und eine Datei löschen möchte. Natürlich könnte er sich mit den logischen Gattern des Mikroprozessors beschäftigen, aber er wird auf diese Art nicht herausfinden, wie er vorgehen muß. Beide Forschungsansätze ergänzen sich, Probleme die hier aufgeworfen werden, lassen sich dort lösen.

Der Forschungsprozeß verläuft in zwei Schritten. Zuerst werden Wahrnehmungsphänomene ausfindig gemacht, dann sucht man Erklärungen dafür. Ursachen für ein Phänomen können entweder *im Reiz* lokalisiert sein, oder in der Person. Und wenn in der Person, dann ist entweder der Wahrnehmungsapparat (die *Physiologie*) dafür verantwortlich, oder die *Kognition*. Das bedeutet, das drei Ursachenbereiche berücksichtigt werden müssen.

- a) die Ebene der Stimuli, die Psychophysik
- b) die Ebene der Physiologie
- c) die Ebene der Kognition

2.1 Psychophysik

2.1.1 Schwellen

Absolute Wahrnehmungsschwellen

1869 veröffentlichte G. FECHNER das erste Buch, in dem nach Zusammenhängen zwischen den physikalischen Eigenschaften eines Reizes und der erlebten Wahrnehmung untersucht wurde.

FECHNERS Arbeit handelte von **absoluten Wahrnehmungsschwellen**, dem kleinsten notwendigen Betrag an Intensität, um einen Reiz noch entdecken zu können. Damit stellt die Absolutschwelle eine Art Nullpunkt für die Wahrnehmung dar.

Die Schwelle ist in erster Linie von der Reizintensität abhängig. Ist die Intensität zu gering, ist kein Reiz auszumachen. Zusätzliche Eigenschaften des Stimulus haben aber zusätzlich Einfluß. Das

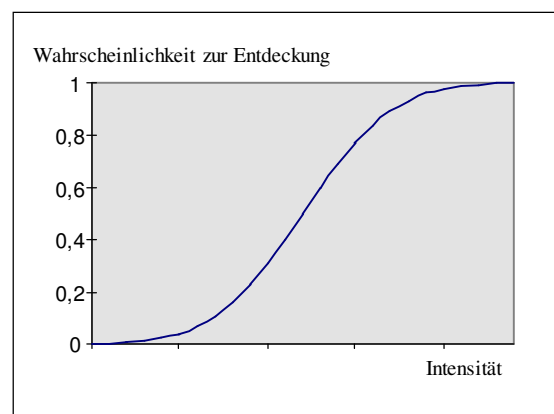


Abbildung 1

menschliche Auge ist beispielsweise nicht für jede Farbe in gleichem Maße empfindlich.

Wenn eine Wahrnehmungsschwelle ermittelt wird, ergibt sich ein Zusammenhang, wie er in dargestellt ist. In der klassischen Schwellentheorie FECHNERS war man noch von einem diskreten, abrupten Übergang ausgegangen. Eine solche Vorstellung ist jedoch unrealistisch, da auch stochastische Prozesse (Wahrscheinlichkeiten) eine Rolle spielen. Die Schwelle wird daher definiert als diejenige Intensität, die es in 50% der Fälle erlaubt, einen Stimulus zu entdecken.

FECHNER beschrieb drei Methoden, um absolute Wahrnehmungsschwellen zu ermitteln. Sie werden als **klassische psychophysikalische Methoden** bezeichnet.

- a) **Grenzverfahren:** Die Intensität eines Stimulus wird bei wiederholter Darbietung langsam gesteigert, bis die Versuchsperson ihn erkennen kann. In einem zweiten Durchgang wird mit einer hohen Intensität angefangen, die langsam gesenkt wird, bis die Versuchsperson sagt, sie könne ihn nicht mehr sehen. Diese Prozedur wird in beide Richtungen mehrere Male wiederholt. Der Mittelwert ergibt die Wahrnehmungsschwelle.
- b) **Herstellungsverfahren:** Die Intensität des Stimulus wird langsam kontinuierlich verändert, bis die Versuchsperson anzeigt, gerade etwas zu erkennen. Die momentane Intensität ergibt die Schwelle, über die in vielen Durchgängen gemittelt werden muß.
- c) **Konstanzverfahren:** Diese Methode ist dem Grenzverfahren ähnlich, nur daß die Intensität des Reizes randomisiert variiert, und nicht in steigender/fallender Folge. Auf diese Weise läßt sich eine Kurve, wie in Abbildung 1 erzeugen. Einige Intensitäten werden nie entdeckt, andere immer und dazwischen steigt die Wahrscheinlichkeit einen Reiz zu entdecken kontinuierlich an. Das Konstanzverfahren ist von den drei klassischen Methoden das verlässlichste, allerdings gibt es inzwischen Prozeduren, die es noch an Genauigkeit übertreffen.

Signal-Detektions-Theorie (SDT)

Auf der Suche nach Absolutschwellen stößt man vor allem auf zwei Probleme.

- a) Versuchspersonen haben Ja-/Nein-Sage-Tendenzen
- b) Spontanaktivität des Wahrnehmungsapparates kann eine Versuchsperson zu Fehlalarmen veranlassen. Denn nach der SDT unterliegt die Wahrnehmung einem ständigen Rauschen, das selbst in seiner Intensität normalverteilt schwankt. Es gilt daher nicht ein Signal zu entdecken, sondern die Summe von Signal und Rauschen. Und da die Spontanaktivität schwankt, ist es möglich, daß ein Reiz einmal entdeckt und das andere mal nicht, wenn der Reizintensität nur nah genug an der Schwelle liegt.

Die Wahrnehmungsschwelle ist nicht bei allen Menschen gleich, einige sind sensitiver als andere. Das Problem ist dabei, daß sich mit den klassischen Meßverfahren nicht entscheiden läßt, ob Unterschiede zwischen Versuchspersonen auf deren Neigung zu Fehlentscheidungen zurückzuführen ist, oder tatsächlich auf deren Sensitivität.

Die SDT schlägt **Tabelle 2** eine experimentelle Vorgehensweise vor, mit deren Hilfe sich dieses Problem lösen läßt: man manipuliert

	Ja-Tendenz erhöhen	Nein-Tendenz erhöhen	Ø
Treffer	+30	+10	+10
korrekte Zurückweisung	+10	+30	+10
Fehlalarm	-10	-10	-10
Fehler	-10	-10	-10

die Ja-/Nein-Tendenzen der Versuchsperson. Ein schwer wahrnehmbares Signal wird dargeboten in randomisiertem Wechsel mit Nulldurchgängen. Das Antwortverhalten wird dabei über Belohnungen verändert (Tabelle 2). Auf diese Weise erhält man unterschiedliche Verhältnisse von Treffern zu Fehlalarmen, die man in die **ROC-Kurve** einträgt (Abbildung 2). Sind die Kurven zweier Versuchspersonen identisch, dann sind ihre Sinnesorgane gleichermaßen sensitiv. Je näher die Kurve der 1. Winkelhalbierenden, desto weniger sensitiv ist diese Person. Entspräche eine ROC-Kurve der 1. Winkelhalbierenden, dann wäre die Person blind oder hat aus irgendwelchen Gründen nur geraten.

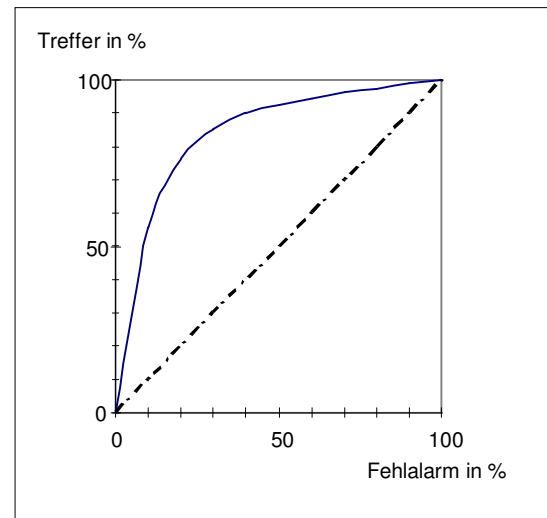


Abbildung 2

Unterschiedsschwellen

Eine Unterschiedsschwelle ist die kleinste Differenz in der Ausprägung einer Reizdimension, die es erlaubt, Reize als voneinander verschieden wahrzunehmen. Daher auch die englische Bezeichnung **JND, Just Noticable Differences**.

FECHNER veröffentlichte in seinem Buch „Elemente ...“ die Forschungen von E.H. WEBER zu diesem Thema. WEBER hatte die Beobachtung gemacht, daß JNDs nicht konstant sind, sondern von der absoluten Ausprägung der Reize abhängt. Je stärker die Reize selbst ausgeprägt sind, desto mehr müssen sie sich voneinander unterscheiden, um auch wirklich als unterschiedlich erkannt zu werden. Die Formel des **Weberschen Gesetzes** lautet:

$$\frac{S_1 - S_s}{S_1} = \frac{\delta S}{S_1} = konst.$$

Für die meisten Modalitäten konnte das Webersche Gesetz bereits bestätigt werden, zumindest wenn die Reize nicht allzu nah an der absoluten Wahrnehmungsschwelle liegen.

FECHNER erweiterte diesen Zusammenhang und forderte, daß die wahrgenommene Intensität proportional sein muß zum Logarithmus der physikalischen Intensität: $P = k \cdot \log S^2$ Damit verbunden ist, daß physikalische und subjektive Intensität nicht mit gleicher Geschwindigkeit ansteigen, subjektiv nimmt sie immer langsamer zu. Damals war das eine bloße Vermutung, denn über die Richtigkeit des Weberschen Gesetzes war nichts bekannt, aber inzwischen sind beide Zusammenhänge gut bestätigt.

2.1.2 Skalierung

Wie läßt sich die subjektive Intensität messen, wie kann man einen Maßstab dafür entwickeln? Eine **direkte Methode** ist es, wenn Versuchspersonen zu jedem Reiz einen Wert auf einer Rating-Skala angeben. Über alle Ratings wird schließlich das arithmetische Mittel gebildet.

Andere Skalierungsverfahren arbeiten **indirekt**. Eine Methode von S.S. STEVENSON ist im nächsten Kapitel beschrieben. Daneben gibt es Verfahren mit den Bezeichnungen Paarvergleiche, Meßtheorie, multidimensionale Skalierung.

2.1.3 Relevante Reizmerkmale für die Wahrnehmung

Welche Merkmale eines Reizes sind für eine spezifische Wahrnehmung notwendig? Welche Merkmale verursachen beispielsweise einen Eindruck von Tiefe und dreidimensionalität?

- a) Überlappung: ein Gegenstand verdeckt einen anderen, also muß er näher sein.
- b) Texturgradient: Damit ist ausgedrückt, wie grob eine Oberfläche strukturiert ist. Je näher ein Ausschnitt, desto gröber die Oberflächenstruktur.
- c) Auch in der akustischen Wahrnehmung läßt sich aus den Reizen räumliche Information gewinnen. Wir können die Richtung eines Geräusches schätzen, da das Signal meist nicht beide Ohren gleichzeitig erreicht. Aus diesen Zeitdifferenzen läßt sich eine Richtung der Geräuschquelle ausmachen.

2.2 Physiologie

(Die Grundlagen über Neuronen und Nervenleitung werde ich hier nicht aufwärmen. Im Goldstein sind folgende Begriffe fettgedruckt: Zellkörper, Dendrit, Axon, Ion, Ruhepotential, Refraktärzeit, Alles-Oder-Nichts-Prinzip, Permeabilität, Spontanaktivität, Synapse.)

2.2.1 Gehirn

Der Thalamus spielt für die Wahrnehmung eine große Rolle. Zum einen steuert er die Aufmerksamkeit. Zum anderen übertragen fast alle Modalitäten ihre Signale dorthin, wo sie dann an die entsprechenden **primären sensorischen Areale** weitergeleitet werden.

² P ist die subj. Intensität, S die physikalische

Ein primäres sensorisches Areal ist das Gebiet auf dem Kortex, das als erstes Sinnesreize empfängt und verarbeitet. Ein Großteil der Forschung ist damit beschäftigt herauszufinden, welche Prozesse in welchen Hirnstrukturen ablaufen, denn es ist z.B. jeder Sinnesqualität ist ein solches Areal zugeordnet. Die TOP-Merkregel dient als Eselsbrücke, um sich zu merken, wo die wichtigsten Areale zu finden sind.

T - Temporal, Töne, Tones (seitlich)

O - Okzipital, Optik, Objects (Hinterkopf)

P - Parietal, Berührung, Pressure (oben)

außerdem liegen die Areale für olfaktorische Reize zum einem okzipital und zum anderen frontal.

2.2.2 Rezeptive Felder

(Die Grundlagen über rezeptive Felder werde ich ebenfalls nicht mehr aufwärmen. Im Goldstein sind folgende Begriffe fettgedruckt: Rezeptoren, bipolare Zelle, Ganglionzelle, horizontale -, amakrine Zelle, Erregung, Hemmung. An-Aus-Felder, Konvergenz. Zu Konvergenz siehe auch 3.4.1)

2.2.3 Sensorische Kodierung

Hier wird nun der Frage nachgegangen, wie ein Stimulus in elektrische Signale umgewandelt wird, so daß das Gehirn aus den elektrischen Signalen wieder auf die Eigenschaften des Reizes schließen kann.

Es muß vom Gehirn unterscheidbar sein, ob ein Signal von Rezeptoren im Auge oder im Ohr herrührt. Eine alte Theorie forderte, daß das Gehirn ständig die sensorischen Nerven überwacht. Später fand man jedoch heraus, daß Reize aus verschiedenen Sinnesorganen auf unterschiedliche Areale des Kortex projizieren. Eine solche Trennung der Sinnesqualitäten auf topologischer Basis hat sich inzwischen eindeutig durchgesetzt.

Bezüglich der sensorischen Kodierung gibt es zwei Theorien, nach denen das Gehirn Reize umwandelt.

1. **Neuronen-Muster-Theorie:** das Muster, nach dem eine Gruppe von Neuronen feuert, entspricht einer spezifischen Wahrnehmungen. Beispiele sind das Farbsehen und der Geschmack.
2. **Spezifitätstheorie:** ein bestimmtes Neuron reagiert auf eine ihm zugeordnete Reizdimension. Allerdings gibt es hierfür zahlreich Kritik. Zum ersten wären viel zu viele Neuronen für die Kodierung nötig. Zum anderen hat man beobachtet, daß einzelne Neuronen auf verschiedene Stimuli reagieren und das die Intensität des Reizes die Feuerungsraten beeinflußt. Das würde bedeuten, daß mit einem Intensitätswechsel auch ein Qualitätswechsel verbunden wäre. Trotz dieser Kritik meint GOLDSTEIN (1996), daß sie gelegentlich auch ihren Zweck hat.

Zum Ausklang dieses Kapitels sei noch das Leib-Seele-Problem angesprochen, das Psychologen immer wieder gerne diskutieren, obwohl sie doch eigentlich nichts rechtes dazu zu sagen wissen. Wie entsteht Bewußtsein aus Kohlenstoff und Wasser? Wie verwandeln sich strömende Natrium-Ionen in den Genuß eines Dr.Oetker™-Schokoladenmüslis? Die Antworten liegen seither noch völlig im Dunkeln und es erscheint mir daher recht müßig darüber zu diskutieren und zu spekulieren. Auch wenn ich nicht abstreiten kann, daß es eine faszinierende Frage ist.

2.2.4 Subjektive Intensität

Zuerst müssen wir die Skalierungsmethoden (2.1.2) von STEVENS nachholen, mit deren Hilfe er seine Experimente durchführte. Zu Anfang stellte er den Versuchspersonen einen Standardreiz vor, an dem die Größe der Testreize gemessen werden soll, die Versuchsperson soll angeben, um wieviel mal der Testreiz größer oder kleiner ist. Schließlich nimmt man aus allen Schätzungen zu einem Reiz das geometrische Mittel (BORTZ S. 39) und erhält damit den Skalenwert.

In den Experimenten zeigte sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Reizintensität und der Impulsrate von Neuronen, der sich durch folgende Gleichung beschreiben läßt:

$$P = K \cdot S^n$$

$$\Leftrightarrow \log P = n \cdot \log S + \log K^3$$

Die **Stevensche Potenzfunktion** beschreibt den Zusammenhang zwischen subjektiver (P) und physikalischer Intensität (S) besser als das Weber-Fechner-Gesetz, denn sie gilt auch bei sehr kleinen und großen Intensitäten, nicht nur im mittleren Bereich.

In einigen Fällen zeigte sich auch ein proportionaler Zusammenhang zwischen der subjektiven Reizstärke und der Impulsrate der beteiligten Neuronen⁴. *Die Impulsrate dient also als direkter Anhaltspunkt für die Intensität.*

2.3 Kognition

Mit der kognitiven Wende in den 40er Jahren kam auch die Idee auf, daß Wahrnehmung auch von kognitiven Prozessen beeinflusst sein könnte. Kognitive Psychologen sprechen hier von **Top-Down-Prozessen**.

Ein Beispiel für Top-Down ist ein Experiment von S. PALMER (1975). Er zeigte Versuchspersonen eine Szene (z.B. Küche), seitlich davon wurden Zielreize sehr kurz eingeblendet (z.B. Hammer, Brot, ...). Den Versuchspersonen fiel es leichter den Zielreiz zu identifizieren, wenn er in die vorgegebene Szene paßte.

³ K bestimmt die absolute Schwelle des Reizes, n ist von der Reizart abhängig, P ist die subj. Intensität und S die physikalische.

⁴ z.B. Geschmack von Zitronensäure oder Zucker (Birbaumer & Schmidt S. 325).

Bottom-Up-Prozesse beschreiben dagegen die Analyse der Reizeigenschaften durch das Gehirn. Der Großteil der Wahrnehmungspsychologie beschäftigt sich mit diesen Prozessen.

3 Grundlegende Mechanismen der visuellen Wahrnehmung

Als Einleitung werden drei Termini eingeführt, die in der Wahrnehmungspsychologie üblich sind und es erleichtern, bestimmte Sachverhalte zu beschreiben.

•**Distaler Reiz.** Der Stimulus in der Umgebung, jedes wahrgenommene Objekt.

•**Proximaler Reiz.** Das Bild, der auf der Netzhaut liegt.

•**Sehwinkel.** Der Winkel, den die Höhe (oder Breite) eines Objektes einnimmt. Je weiter sich der Gegenstand entfernt, desto kleiner wird der Sehwinkel. Der Sehwinkel bestimmt die Größe des proximalen Reizes.

3.1 Fokussierung auf der Retina

Wie bei einem Fotoapparat muß das Bild auf der Retina vom Auge scharfgestellt werden. Dies ist möglich durch die Linse, die über den Ciliarmuskel gedehnt und entlastet wird. Wenn dieser Muskel angespannt wird, wird die Linse stärker gekrümmt. Man bezeichnet das als **Akkomodation**.

Es gibt allerdings eine Grenze, da die Linse sich nicht beliebig krümmen läßt. Rückt ein Objekt näher heran als den **Nahpunkt**, kann das Bild nicht mehr scharfgestellt werden. Der Nahpunkt bezeichnet diese kritische Distanz.

3.2 Übersicht über das visuelle System

Die Nerven werden im Auge gebündelt und verlassen den Augapfel am **blinden Fleck**. Dort befinden sich keine Rezeptoren auf der Retina und daher ist das Auge dort tatsächlich blind. Vom Auge ziehen die Sehnerven zum **Chiasma opticum (Sehnervkreuzung)**, wo sie sich zur Hälfte kreuzen und dann weiterziehen zum Gebiet des Thalamus, den **seitlichen Kniehöckern (nucleus geniculatum laterale)**. Vom Thalamus aus projizieren sie schließlich auf den Kortex.

3.3 Rezeptoren

Es gibt erster Linie zwei Rezeptortypen auf der Retina, Zapfen und Stäbchen. Die Zapfen sind für das Farbsehen und das Erkennen von Details besonders geeignet; Stäbchen

Tabelle 3

	Zapfen	Stäbchen
Anzahl	6 Mio.	120 Mio.
Verteilung	fovea & wenig in Peripherie	Peripherie
Dunkeladaption	schnell	langsam
spektrale Sensitivität	max. bei 560nm	max. bei 500nm
Sensitivität bei Dunkelheit	niedrig	hoch
Sehschärfe	hoch	gering

erledigen Hell-Dunkel-Sehen und sind auch bei wenig Licht zu gebrauchen.

Die beiden Rezeptortypen sind unterschiedlich auf der Netzhaut verteilt. Zapfen kommen hauptsächlich in der **Sehgrube (fovea centralis)** vor. Sie erstreckt sich über einen Sehwinkel von $0,5^\circ$ bis 1° und befindet sich an der Stelle der Netzhaut, auf der das jeweils fokussierte Objekt liegt. Die Stäbchen sind überall sehr häufig anzutreffen, nur nicht in der Sehgrube. Die Sehgrube enthält nur Zapfen.

3.3.1 Dunkeladaption

Zapfen und Stäbchen passen sich unterschiedlich schnell an die Dunkelheit an. Zapfen erreichen ihre maximale Sensitivität nach bereits 6 Minuten, Stäbchen erst nach 30 Minuten. Das hat zur Folge, daß Dunkeladaption in zwei Schritten abläuft.

Die Dunkeladaptionkurve in Abbildung 3 läßt sich mit Hilfe dreier Experimente ermitteln.

Im ersten Experiment soll der generelle Verlauf der Adaption ermittelt werden, unabhängig vom Rezeptortyp. Im Vorfeld wird die Versuchsperson an helle Umgebung gewöhnt (Helligkeitsadaption). Danach wird die Umgebung verdunkelt. Die Sensitivität der

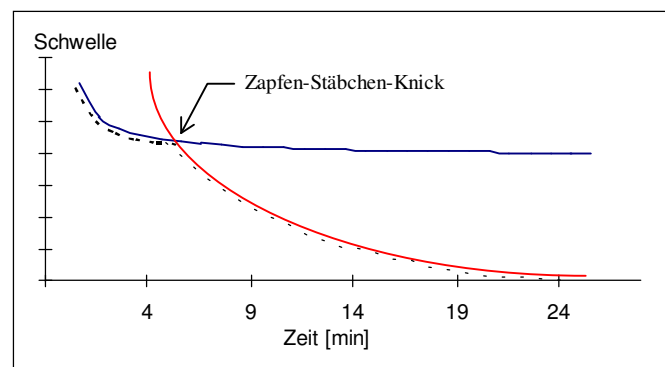


Abbildung 3

Netzhaut wird über die absolute Wahrnehmungsschwelle ermittelt⁵. Die Versuchsperson soll einen Punkt fixieren, der sich neben einem kleinen Licht befindet, so daß das Licht in die Peripherie einfällt. Dann sollen sie das Licht in regelmäßigen Abständen so einstellen, daß es gerade noch sichtbar ist. Das Ergebnis entspricht der gestrichelten Linie in Abbildung 3. Zuerst sinkt die Schwelle schnell ab und erreicht nach 3-4 Minuten ein Plateau. Nach 7-10 Minuten sinkt sie erneut bis sie nach 20 bis 30 Minuten ihr Minimum erreicht hat. Die Sensitivität ist dann ca. 100000 mal so groß, wie in Helligkeitsadaptiertem Zustand.

Den Adaptionsverlauf zu den Zapfen läßt sich mit derselben Prozedur bestimmen, nur daß die Versuchspersonen diesmal direkt das Licht fokussieren sollen. Und auch für Stäbchen läßt die Prozedur sich fast wiederverwenden. Nur sind hierfür Versuchspersonen von Nöten, die aufgrund eines genetischen Defekts nur Stäbchen auf ihrer Netzhaut haben (Stäbchen-Monochromaten). Mit diesen Versuchspersonen wiederholt man Experiment eins und erhält eine Adaptionkurve spezifisch für Stäbchen.

Dunkeladaption ist nichts anderes als eine Regeneration von Sehfärbstoff. Bei heller Umgebung bleicht der Sehfärbstoff aus und pendelt sich auf einem Niveau ein, auf dem ebensoviel Farbstoff

⁵ Sensitivität = $1/\text{Schwelle}$

regeneriert wie gebleicht wird. Sinkt die Helligkeit der Umgebung, kann wieder mehr Farbstoff hergestellt werden; damit wächst die Wahrscheinlichkeit, daß ein Lichtteilchen von der Netzhaut registriert wird.

3.3.2 Spektrale Sensitivität

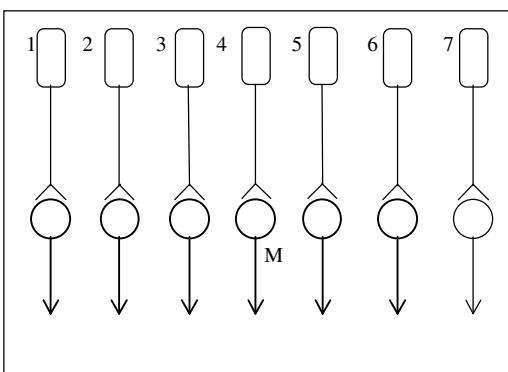
Die Sensitivität für weißes Licht unterscheidet sich von der Sensitivität für einzelne Farben im Farbspektrum. Die Verteilung der Sensitivität über verschiedene Farben hinweg wird **spektrale Sensitivität** genannt. Bei Zapfen läßt sie sich bestimmen, indem man Licht auf die Fovea projiziert. Es ergab sich eine maximale Empfindlichkeit für Licht der Wellenlänge 560 nm (zwischen grün und gelb). Zur Messung der spektralen Sensitivität für Stäbchen muß erst dunkeladaptiert werden. Hier liegt das Maximum bei 500 nm (grün), Stäbchen sind also für kurzwelligeres Licht sensitiver. Das bedeutet, daß Blautöne im Zustand der Dunkeladaptation besser wahrgenommen werden als Rottöne.

Untersuchungen zu den **Absorptionsspektren** der Sehfärbstoffe belegten die Zusammenhänge oben auf anderem Wege. Man hat dabei gemessen, wie gut Licht einer bestimmten Wellenlänge absorbiert wird. Wird ein Lichtteilchen absorbiert und nicht reflektiert, dann wurde es auf der Retina registriert. Daher kann vom Absorptionsspektrum direkt auf das Sensitivitätsspektrum schließen.

3.4 Neuronale Verschaltung

3.4.1 Schaltungsprinzipien

Um das Folgende verständlicher zu gestalten seien vorab die grundlegenden Schaltungen



beschrieben, die in neuronalen Schaltkreisen häufig vorkommen. In den Abbildungen sind Nervenzellen durch Kreise dargestellt, Rezeptoren durch Rechtecke.

Also betrachte man Abbildung 4: Jede Reaktion eines Rezeptors wird 1:1 weitergeleitet. Für die Reaktion des Neurons 'M' ist es gleich, ob Rezeptor 4 alleine feuert oder gemeinsam mit den Rezeptoren 3-5 oder sogar 1-7.

Abbildung 4

Das Prinzip, das in Abbildung 5 veranschaulicht ist, nennt sich **Konvergenz**: mehrere Rezeptoren

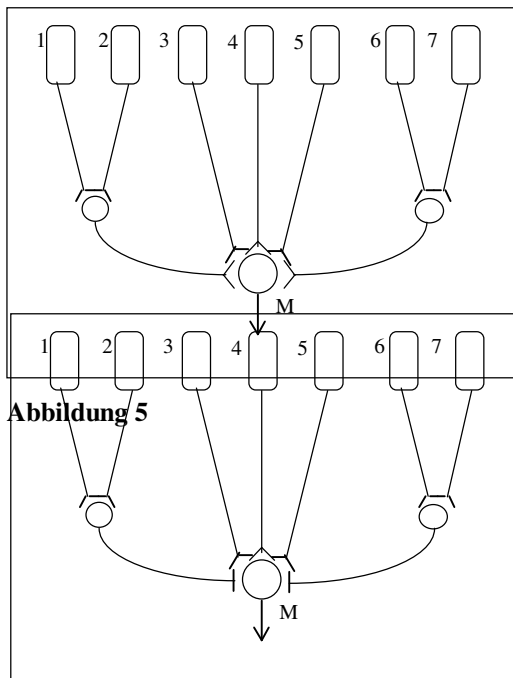


Abbildung 6

steuern ein einzelnes Neuron an. Das bedeutet, daß die Aktivität des Neurons mit der Anzahl der Rezeptoren wächst, die momentan feuern. Feuern statt dem einzelnen Rezeptor 4 alle von 3-5, so ist das Neuron 3 mal so stark erregt. Diese Erregung wächst entsprechend, wenn die Rezeptoren 2-6 oder 1-7 gemeinsam aktiv sind.

Abbildung 6 zeigt eine besondere Form der Konvergenz. Die beiden äußeren Neuronen wirken hier hemmend auf M. Für die Rezeptoren 3-5 gilt also, daß sie M erregen, die übrigen Rezeptoren verursachen eine Hemmung. Werden von Rezeptor 4 ausgehend immer mehr Rezeptoren angeregt, dann steigt die Aktivität von M bis 3-5 gemeinsam feuern. Werden noch mehr Rezeptoren stimuliert, dann sinkt die Aktivität wieder aufgrund der hemmenden Wirkung der äußeren

Rezeptoren und sie sinkt weiter, wenn die Stimulation auf alle Rezeptoren ausgedehnt wird. Auf diese Weise sind in der Retina rezeptive Felder möglich. In unserem Fall eines mit On-Zentrum und Off-Umfeld.

3.4.2 Sensitivität

Zapfen und Stäbchen unterscheiden sich in dunkeladaptiertem Zustand sehr in ihrer Sensitivität. Das liegt in erster Linie an den unterschiedlichen Graden von Konvergenz, mit der die Rezeptoren verschaltet sind. Weniger von Bedeutung sind Eigenschaften der Rezeptoren selbst.

Jede Ganglionzelle in der Netzhaut erhält im Durchschnitt Information von 120 Stäbchen, aber nur von 6 Zapfen. In der Sehgrube sind sogar viele Zapfen ganz ohne Konvergenz verschaltet. Je mehr Lichtteilchen auf ein rezeptives Feld treffen, desto wahrscheinlicher wird die Lichtquelle wahrgenommen. Und da die rezeptiven Felder der Stäbchen weit größer sind, nehmen sie den Lichtreiz viel eher wahr.

3.4.3 Sehschärfe

Was die Stäbchen bei der Empfindlichkeit voraus haben, das hinken sie ihnen in der Sehschärfe hinterher. Denn die Konvergenz legt fest, wie fein die Rezeptoren ein Bild auflösen.

Die rezeptiven Felder der Zapfen sind kleiner, es befinden sich auf derselben Fläche der Netzhaut viel mehr davon. Daher können auch Lichtpunkte voneinander getrennt werden die sehr nahe beieinander liegen, solange sie auf unterschiedliche rezeptive Felder fallen.

Um die Sehschärfe zu messen bedient man sich der Snellen-Buchstabentafeln, wie man sie vom Augenarzt her kennt. Aus psychologischen Gründen wären die Landoldt-Ringe für die Messung allerdings geeigneter.

Messungen bestätigen den Zusammenhang zwischen Sehschärfe und Konvergenz. In der Sehgrube ist die Schärfe am größten, je weiter man in die Peripherie wechselt, desto unschärfer wird das Bild.

3.5 Ganglionzellen

Sämtliche Informationen, die die Netzhaut verlassen, wird von den **Ganglionzellen** ausgesandt. Diese repräsentieren die rezeptiven Felder der Netzhaut.

Bei Untersuchungen zu den rezeptiven Feldern fiel auf, daß einige von ihnen bei konstanter Stimulation auch konstant feuerten, während andere in ihrer Aktivität langsam nachließen. Die Forscher nannten konstant aktive Zelle **X-Zellen**, die anderen **Y-Zellen**. Diese beiden Zelltypen unterscheiden sich in zwei wichtigen Punkten. Zum einen in dem Ort auf der Retina, an dem sie zu finden sind, zum anderen in

der Art der Stimuli, auf die sie optimal reagieren. Die Eigenschaften der beiden Zelltypen sind in Tabelle 4 zusammengefaßt.

Tabelle 4

	X-Zellen	Y-Zellen
Verteilung	primär in der Fovea	überall
Antagonismen	ja	nein
Nervenleitung		besser als X
Funktion	Form-, Detail-, Mustersehen	Bewegung
Name	Parvo-Zellen	Magno-Zellen

Besonderheit der Y-Ganglionzellen ist, daß sie nicht den üblichen Zentrm-Umfeld-Antagonismus aufweisen.

3.6 Die seitlichen Kniehöcker

Die Nervenfortsätze der Ganglionzellen ziehen zu den seitlichen Kniehöckern. Die Eigenschaften der Neuronen dort sind mit den Ganglionzellen vergleichbar. Auch sie repräsentieren rezeptive Felder und auch sie lassen sich in zwei Typen X und Y unterscheiden.

Die Kniehöcker sind in sechs Schichten organisiert, wobei jede Schicht dadurch gekennzeichnet ist, welche Art von Informationen sie erhält. Die Schichten 1,4 und 6 sind für das contralaterale Auge zuständig, die übrigen für das ipsilaterale⁶. Zudem erhalten die ersten beiden Schichten nur Informationen aus Y-Ganglionzellen, die Schichten 3 bis 6 sind nur für X-Zellen zuständig.

Neben dieser Organisation in Schichten sind die Kniehöcker auch **topographisch** gegliedert. Benachbarte Punkte auf der Retina findet man auch in den Kniehöckern nah beieinander.

⁶ Das ipsilaterale bezeichnet das Auge auf derselben Seite des Kopfes.

3.7 *Der visuelle Kortex*

Die Fasern von den Kniehöckern treffen in Schicht IVc des visuellen Kortex ein. Von dort aus werden die Signale an die übrigen sechs Schichten des Striatum übertragen. Die Schichten sind (wie im seitlichen Kniehöcker) topographisch angelegt und man findet auch hier die rezeptiven Felder wieder.

3.7.1 Zelltypen

Allerdings ist der Aufbau des visuellen Kortex komplexer als in vorhergehenden Strukturen. Man entdeckte dort Zellen, die auf die Orientierung von Linien und deren Bewegung reagierten.

Einfache kortikale Zellen

Sie bestehen aus erregenden und hemmenden Arealen, die nebeneinander angeordnet sind. Auf diese Weise sind diese Zellen in der Lage, die Richtung von Linien zu entdecken, sie reagieren optimal auf genau eine Ausrichtung einer Linie.

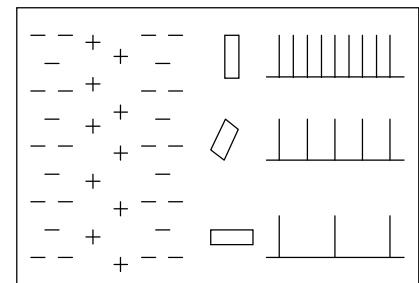


Abbildung 7

Komplexe kortikale Zellen

Wie die einfachen Zellen bevorzugen komplexe Zellen eine bestimmte Ausrichtung von Linien, allerdings nur, wenn diese auch in Bewegung sind. Die meisten komplexen Zellen sind zudem wählerisch, was die Bewegungsrichtung angeht.

Hyperkomplexe kortikale Zellen

Dieser Zelltyp reagiert auf Linien einer bestimmten Länge oder auf Ecken, die sich in eine bestimmte Richtung fortbewegen.

3.7.2 Gibt es spezifische Merkmalsdetektoren?

Nachdem schon Zellen für Ecken und Kanten und Bewegung entdeckt worden sind, liegt die Frage nach komplexeren Merkmalsdetektoren nahe. Bei Affen fand man Neuronen, die vornehmlich auf Gesichter reagierten, am besten auf Affengesichter.

Trotz dieser Hinweise ist es jedoch sehr unwahrscheinlich, daß sämtliche Reize des Alltags über spezifische Neuronen kodiert werden. Mit der Vielfalt und Komplexität aller möglichen Stimuli wäre das Gehirn restlos überfordert. Man benötigte eine riesige Anzahl verschiedener Nervenzellen, wie sie im ganzen Gehirn nicht vorhanden sind. Zudem gibt es zweideutige Reize, die wir dem Kontext entsprechend wahrnehmen (Folien Abb. 4.9).

3.7.3 Organisation des Kortex

Die topographische Struktur des Striatums und dessen Aufteilung in sechs Schichten wurden bereits oben angesprochen. Jede der Schichten ist weiter untergliedert in **Hypersäulen**. Jede Hypersäule ist in zwei Hälften aufgeteilt, die jeweils dem rechten oder linken Auge zugeordnet sind. Diese halben Säulen sind wiederum aufgeteilt in **Orientierungssäulen**. In jeder Säule befinden sich Zellen, die alle auf dieselbe Orientierung von Linien und Kanten reagieren.

4 Farbwahrnehmung

4.1 *Wie viele Farben gibt es?*

Aus dem Farbspektrum kann das menschliche Auge 200 Wellenlängen differenzieren. Neben dem Kriterium der Wellenlänge können wir Farben in ihrer **Helligkeit** und **Sättigung** unterscheiden. In der Helligkeit können wir 500 Stufen voneinander trennen. Die Sättigung beschreibt den Anteil an weißem Licht in einer Farbe. Pink ist beispielsweise rot mit einem gewissen Anteil weiß. An Sättigungsgraden kann man 20 unterscheiden. Aus diesen Angaben können wir nun ausrechnen, wie viele Farben das visuelle System kennt: $200 \text{ mal } 500 \text{ mal } 20 = 2 \text{ Mio.}$ ⁷

Schätzungen gehen davon aus, daß es nur etwa 7500 Bezeichnungen für unterschiedliche Farbtöne gibt. Obwohl wir damit nicht alle Farben benennen können, ist dies trotzdem eine beachtliche Zahl. Und diese Zahl ist zu groß, daß Forscher sich mit all diesen Farbschattierungen auseinandersetzen könnten. Wissenschaftler beschränken sich in ihren Untersuchungen meist auf die vier Farben Rot, Gelb, Blau und Grün als Vertreter der **chromatischen Farben**; und auf die **achromatischen Farben** Schwarz und Weiß. Denn mit Hilfe dieser sechs Farben läßt sich jede beliebige Farbe reproduzieren.

4.2 *Farbe und Wellenlänge*

Tabelle 5

400-450 nm	violett
450-500 nm	blau
500-570 nm	grün
570-590 nm	gelb
590-620 nm	orange
620-700 nm	rot

Die Farbe von Lichtstrahlen wird bestimmt durch deren Wellenlänge (Tabelle 5). Im Alltag hat Licht jedoch nicht nur Anteile einer einzelnen Wellenlänge, sondern ist gemischt. Weißes Licht ist ein Gemisch von allen Grundfarben. Die Sonne strahlt weißes Licht ab; Glühlampen sind leicht rötlich, was bedeutet, daß sie ein wenig mehr langwelliges Licht abstrahlen.

Das ankommende Licht wird von den Gegenständen in der Umwelt zurückgeworfen. Allerdings hängt das von der Wellenlänge des ankommenden Lichtes ab. Trifft weißes Licht auf einen grünen Gegenstand, beispielsweise ein Pflanze, so werden alle Rotanteile von der Pflanze 'verschluckt'/absorbiert. Nur grünes Licht wird reflektiert und eben darum ist die Pflanze grün. Eine schwarze Tafel absorbiert alle Wellenlängen gleichermaßen und die weiße Kreide reflektiert dagegen alles.

Um die Reflexion eines Gegenstandes über das gesamte Spektrum hinweg zu veranschaulichen, bedient man sich der Reflexionskurven. Auf der Ordinate (X-Achse) wird die Wellenlänge

⁷ Goldstein '89 spricht hier noch von 7 Mio. Farben

abgetragen und auf der Abszisse die prozentuale Intensität an reflektiertem Licht (Goldstein '96 Abb. 4.5 & 4.6).

4.3 Farbmischung

Es gibt zwei Arten von Farbmischung:

1. **subtraktive** -: Als Farbe erscheint, was alle Mischfarben gemeinsam haben. Grün ist zum Beispiel den Farben gelb und blau als einziges gemeinsam. Alle Farben zusammen gemischt ergibt schwarz. Prinzip Waserfarbkasten.

2. **additive** -: Die Wellenlängen von Licht werden aufaddiert, so daß bei einer Mischung aller Farben weiß resultiert.

4.4 Physiologische Theorien zur Farbwahrnehmung

4.4.1 Trichromatische Theorie (YOUNG-HELMHOLTZ)

Nach dieser Theorie wird Farbsehen durch drei Typen von Farbrezeptoren in der Retina ermöglicht. Jede Farbe aktiviert die drei Rezeptoren nach einem spezifischen Muster. Die Theorie basiert auf der Beobachtung, daß Menschen mit Hilfe des Verhältnisses von genau drei Farben jede andere Farbe reproduzieren können.

4.4.2 Theorie der Gegenfarben (HERING)

E. HERING machte einige Untersuchungen, die den Schluß nahelegten, die Farben rot/grün und blau/gelb seien in der menschlichen Wahrnehmung miteinander verknüpft. Farbenblinde, die rot (blau) nicht sehen, können ebensowenig Grüntöne (Gelb-) unterscheiden.

???Nachbilder & Simultankontraste???

4.4.3 Physiologische Untersuchungen

Die beiden vorhergehenden Theorien wurden allein auf der Basis psychophysikalischer Experimente aufgestellt. Um aber zu entscheiden, welche Theorie die richtige ist, waren physiologische Untersuchungen nötig.

BROWN & WALD (1964) fanden drei Typen von Rezeptoren durch den Einsatz von Mikrospektrographie. Die Empfindlichkeit dieser Rezeptortypen zeigt, daß ankommendes Licht in drei Komponenten rot, grün und blau zerlegt wird. Wenn Licht auf die Retina fällt, das die drei Farbrezeptoren in gleicher Weise erregt, das aber unterschiedlich aus Spektralfarben zusammengesetzt ist, dann nehmen Menschen diese Farben als identisch wahr. Man nennt zwei solche Lichter **Metamere**.

Neben diesen Belegen für die Trichromatische Theorie gibt es allerdings auch physiologische Beobachtungen, die für die Gegenfarbtheorie sprechen. Man fand sogenannte **opponente Zellen**, die sich in der Netzhaut, in den seitlichen Kniehöckern und auch dem Striatum befinden. Von diesen Zellen gibt es vier Typen, die von einer der vier Grundfarben jeweils erregt oder gehemmt werden: rot+/grün-; grün+/rot-; gelb+/blau-; blau+/gelb-. Im Striatum fand man darüber hinaus noch einen weiteren Typen. Diese ‘doppelten Gegenfarbzellen’ repräsentieren jeweils ein rezeptives Feld mit rot/grün bzw. gelb/blau-Antagonismus.

4.4.4 Kombination der Erkenntnisse

Die Frage ist, wie sich die beschriebenen Ergebnisse auf einen Punkt bringen lassen, denn sie scheinen sich doch zu widersprechen. Die Lösung lieferte DEVALOIS. Er konstruierte einen Schaltplan (Abbildung 8), der die drei Farbrezeptoren in einer Art verschaltet, daß schließlich opponente Zellen daraus resultieren.

Der Mechanismus für Rot/Grün-Zelle ist recht einfach. Fällt rotes Licht ein wird sie erregt; fällt gelbes Licht ein, dann gleichen sich Erregung und Hemmung durch die Zapfen aus, und fällt grünes Licht ein, dann wird die Zelle aufgrund des Blauanteils gehemmt.

Die Blau/Gelb-Zelle wird über den Rezeptor für Blau erregt, und über eine Zelle (hier genannt) A gehemmt. Diese Zelle A überträgt Input von gelbem aber auch rotem

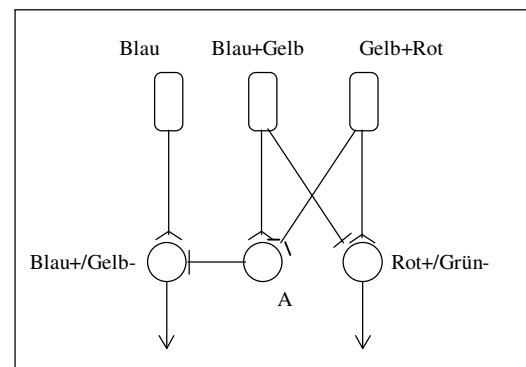


Abbildung 8

Licht auf die opponente Zelle. Sie wird daher auch gelegentlich als Blau+/(Rot&Grün)- bezeichnet.

Abbildung 8 stellt den wirklichen Schaltplan nur stark vereinfacht dar, veranschaulicht aber das Prinzip. Die Natur hat es sich ‘ausgedacht’, um Kontraste zwischen Farben zu betonen. Eine kleine Veränderung der Wellenlänge eines Lichtstrahls wird in den meisten Fällen eine große Veränderung in der Aktivität der opponenten Zellen hervorrufen.

4.5 Farbsehschwächen

Die meisten Menschen sind **Trichromaten**, was bedeutet, daß sie normalem Farbsehen befähigt sind. Daneben gibt es aber Menschen, die zum Teil oder ganz Farbenblind sind. Der **anomale Trichromat**, kann zwar prinzipiell alle Farben erkennen, aber die Farbanteile werden in verkehrten Verhältnissen auf die opponenten Zellen verschaltet. Bei anomaler Trichromasie können daher eng beieinander liegende Farbtöne nicht differenziert werden.

Die **Dichromaten** können nur zwei der vier Grundfarben wahrnehmen. Dichromasie läßt sich in drei Kategorien einteilen.

•**Protanopia:** Jede Farbe <492 nm erscheint blau, alles darüber ist gelb. Solche Menschen sind rotblind und verwechseln rot mit schwarz, grau, braun oder grün.

•**Deuteranopia:** Hier erscheint jede Farbe <498 nm als blau, alles darüber ist gelb. Solche Menschen sind grünblind.

•**Tritanopia:** Dieser sehr seltene Fall von Farbenblindheit läßt alle Farben <570 nm grün⁸ erscheinen, die Farben darüber als rot.

Neben den Farbenblinden, deren Wahrnehmung auf zwei Farbtöne beschränkt ist, gibt es die **Monochromaten**. Solche Menschen haben keinerlei Zapfen in der Netzhaut, sie kennen nur Grautöne.

4.6 Farbkonstanz

Es sei mir verziehen, wenn ich zur Veranschaulichung des Problems eine Erfahrung meiner Wenigkeit einbringe. Ich denke viele haben schon Dinge fotografiert, die mit Glühlampen beleuchtet waren. Ich jedenfalls wollte ein Objektiv meines Fotoapparates knipsen, dessen Linsen - angestrahlt von einer Nachttischlampe - bunt die Farben des Spektrums spiegelten. Doch wo mein Auge schillerndes blau und leuchtendes grün sah, lieferte der Film nur fahles gelb. Das ist es, was mit Farbkonstanz gemeint ist. Unter verschiedenen Lichtverhältnissen nehmen wir Farben identisch war, obwohl sie sich physikalisch unterscheiden. Drei mögliche Mechanismen werden beschrieben, die diese „Sinnestäuschung“ hervorrufen.

Chromatische Adaption: Ist in einer Umgebung mehr langwelliges (rot/gelb) vorhanden, so adaptieren die Rezeptoren für diesen Farben auch stärker. Das bedeutet, daß die Rezeptoren für blau und grün empfindlicher reagieren als es die Rezeptoren für rotes Licht tun. Damit wird der Unterschied teilweise aufgehoben.

Farbengedächtnis: Sind die Dinge uns bekannt, deren Farben wir betrachten, so können wir auf unsere Erinnerungen zurückgreifen. Allerdings ist dieser Effekt nicht allzu groß, er spielt für die Farbkonstanz eine untergeordnete Rolle.

Umgebungsreize: Der Effekt durch Umgebungsreize ist wieder bedeutender. Er scheint darauf hinauszulaufen, daß komplizierte Vergleiche zwischen vielen Farbtönen aus der Umgebung angestellt werden. Farbkonstanz ist daher umso stabiler, je bunter die Umgebung ist. Der Mechanismus ist im Goldstein allerdings nur unzureichend beschrieben.

⁸ Goldstein 1996 behauptet 'blau'. Das ist gänzlich unlogisch und wird auch von Birbaumer & Schmidt und auf den Folien anders gesehen.

5 Helligkeit und Kontrast

Die Helligkeit ist gleichbedeutend mit dessen Intensität. Die Intensität von Licht hängt zum einen davon ab, wieviel Licht generell vorhanden ist, also von der Stärke der Lichtquelle. Zum Anderen wird die Helligkeit eines Objektes davon bestimmt, wieviel Licht das Objekt reflektiert.

Der Kontrast ist bestimmt durch den Unterschied zweier Bereiche in ihrer Intensität. Der wahrgenommene Kontrast muß nicht gleich dem physikalischen sein (und entsprechendes gilt auch für die Helligkeit).

5.1 Psychophysik und Helligkeit

5.1.1 Mach'sche Bänder



Abbildung 9

Liegen zwei Flächen unterschiedlicher Helligkeit nebeneinander, so scheint in der Mitte die helle Fläche noch heller und die dunkle Fläche noch dunkler zu sein. Man nennt das **Kontrastüberhöhung**. Es kommt zustande, indem horizontale und amakrine Zellen benachbart liegende Zellen hemmen und zwar abhängig von deren jeweiliger Aktivierung (Goldstein '89 Abb. 5.7; '95 Abb. 2.48).

5.1.2 Simultankontrast



Abbildung 10

Dasselbe Objekt erscheint in Abhängigkeit vom Hintergrund heller oder dunkler. Der Effekt ähnelt dem der Mach-Bänder, der allerdings nur in den Randbereichen auftritt. In Fall des **Simultankontrasts** verändert sich die Helligkeit des gesamten Objekts, auch im Zentrum. Daher läßt sich dieses Beispiel auch schlecht mit lateraler Inhibition erklären.

5.1.3 WERTHEIMERS Kreuz

Auch den Effekt des WERTHEIMER Kreuzes läßt sich nicht mit lateraler Inhibition erklären (Siehe GOLDSTEIN '89 Abb. 5.11).

5.2 Räumliche Frequenz

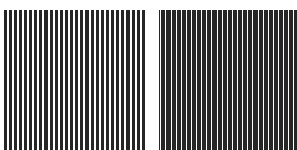


Abbildung 11

Die **räumliche Frequenz** beschreibt, wie fein ein Reiz gemustert ist. Sie ist (in Abbildung 11) um so größer, je mehr Linien sich auf derselben Fläche befinden.

Es wurde vorgeschlagen, daß es Neuronen gibt, die auf unterschiedliche Grade räumlicher Frequenz reagieren, die als **räumliche Frequenzkanäle** bezeichnet werden.

Um zu beschreiben, wie die Erkennung einer Maserung von der physikalischen räumlichen Frequenz abhängt, bedient man sich der **Kontrast-Sensitivitätsfunktion**. Die Messung läuft folgendermaßen ab: es werden Muster unterschiedlicher räumlicher Frequenz vorgelegt; anfangs ist der Kontrast so niedrig, daß er nicht erkennbar ist, und wird dann langsam erhöht, bis die Versuchsperson angibt, gerade ein Muster zu erkennen. Der Kehrwert der Wahrnehmungsschwelle (Y-Achse) wird in Abhängigkeit zur räumlichen Frequenz (X-Achse) abgetragen, wodurch sich ein umgekehrtes U ergibt.

5.3 Konturen

Die Schärfe von Konturen bestimmt die Wahrnehmung des Kontrastes. Eine Fläche mit verschwommenen Konturen bildet weniger Kontrast zu seinem Hintergrund, als eine Fläche derselben Helligkeit mit scharfen Konturen. Ursache dafür sind winzige unwillkürliche Augenbewegungen. Sie sind notwendig, um Konturen zu erkennen. Ein Rezeptor, der nahe der Kante liegt, wird bald viel, bald weniger Licht empfangen. Je niedriger diese Intensitätsdifferenz, desto schlechter läßt sich die Kontur erkennen. Sind die Umrisse eines Objektes hinreichend diffus, wird der Umriß sogar ganz verschwinden.

Man ist der Sache weiter nachgegangen, indem man die unwillkürlichen Augenbewegungen verhindert hat. PRITCHARD benutzte dazu eine spezielle Kontaktlinse, die mit einem Projektor fest verbunden war. Bereits nach drei Sekunden, waren sämtliche Konturen verschwunden.

Das visuelle System reagiert gut, wenn Reize sich verändern, aber nur schlecht auf konstante Stimulation.

5.4 Adaptionszustand

Wie wir Kontrast wahrnehmen hängt auch vom Adaptionszustand ab unserer Augen ab. Den Prozeß der Dunkeladaptation gibt es aus zwei Gründen:

1. Um einen möglichst großen Arbeitsbereich zu ermöglichen. Der Mensch muß in der Lage sein, sich sowohl bei gleißender Sonne zurechtzufinden, als auch bei Neumond.
2. Das Auge soll möglichst sensitiv auf Kontraste reagieren und auch geringe Intensitätsunterschiede erfassen können.

Mit den **Operating Curves** wird der Zusammenhang zwischen subjektiver und physikalischer Helligkeit in einem Schaubild greifbar gemacht (Goldstein '89 Abb. 5.29). Auf der Ordinate (X-Achse) wird die Intensität aufgetragen, auf der Abszisse die empfundene Helligkeit. Je steiler diese Kurve steigt, desto sensitiver ist das Auge hinsichtlich Intensitätsdifferenzen, desto kleiner ist aber auch der Arbeitsbereich. Wie ist es daher möglich, diese gegensätzliche Entwicklung zu umgehen und sowohl Arbeitsbereich als auch Sensitivität zu maximieren?

Die Lösung heißt eben Dunkeladaption. Das visuelle System des Menschen hat *praktisch mehrere Arbeitsbereiche*, aus denen je äußeren Bedingungen der optimale ausgewählt wird. Im Schaubild (Goldstein '89 Abb. 5.31) zeigt sich der Sachverhalt, indem mehrere operating curves über die Intensitätsspanne hinweg verteilt sind.

5.5 Helligkeitskonstanz

Obwohl sich die Beleuchtung über den Tag vielfach verändert, erleben wir die Dinge in unserer Umgebung ständig als gleich hell. Ein Blatt Papier erscheint weiß, egal ob es bewölkt ist oder die Sonne scheint.

Der Mensch orientiert sich hier nicht an absoluten Intensitäten, sondern setzt die Helligkeit ins Verhältnis mit umgebenden Reizen. Wenn die Verhältnisse übereinstimmen, werden Gegenstände als gleich hell oder zumindest ähnlich hell angesehen, auch wenn das physikalisch nicht der Fall ist.

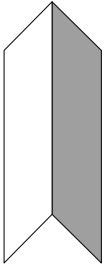
GELB belegte das in einem Experiment. Vor einem schwarzen Hintergrund befand sich eine schwarze Scheibe. Diese schwarze Scheibe wurde von einer versteckten Lampe aus beleuchtet. Versuchspersonen 'erkannten' diese Scheibe als weiß, da der Hintergrund für sie der einzige Anhaltspunkt für ihre Schätzung war. Und im Verhältnis zu diesem reflektierte die Scheibe sehr viel Licht. Hielt man dagegen ein weißes Papier zum Vergleich daneben, war die Täuschung entlarvt.⁹

5.6 Objekte im Schatten

Kontraste können auf zweierlei Art entstehen: Die Farbe einer Oberfläche ändert sich und damit deren Reflexion, was man **Reflexionsgrenze** nennt. Oder ein Objekt liegt teilweise im Schatten, was dann **Beleuchtungsgrenze** heißt. Wie können wir unterscheiden, ob ein Kontrast durch eine Veränderung der Oberfläche hervorgerufen wird, oder durch eine Veränderung in der Beleuchtung?

Eine wichtige Rolle spielt dabei die Helligkeitskonstanz. Sie kommt ins Spiel, wenn genügend Anhaltspunkte für einen Schattenwurf vorhanden sind. Natürlich wissen wir häufig, wo Schatten sein muß, es gibt aber noch einen weiteren Anhaltspunkt, die **Penumbra**. Die Kante eines Schattens ist nicht scharf umrissen sondern verwischt. E. HERING (1905) ist es gelungen durch die Beseitigung der Penumbra ein ganz anderes Erlebnis von einem Schattenwurf zu erzeugen. Auch ein wichtiger Anhaltspunkt für Schattenwürfe ist deren Form, die im Allgemeinen von den natürlichen Gegenständen her bekannt ist.

⁹ Für das Experiment von Burtzloff möchte ich auf Goldstein '89 verweisen.

**Abbildung 12**

Die **Mach'sche Karte** ist eine nette Demonstration dafür, wie Licht und Schatten sich auf die Wahrnehmung auswirken (Abbildung 12). Man nehme einen Streifen Papier, falte ihn in der Mitte und beleuchte die Karte von rechts (oder links). Dann blicke man von oben (ca. 45°-Winkel) auf die Karte. Beide Seiten sehen weiß aus, was auf den Effekt der Helligkeitskonstanz zurückzuführen ist.

In einem weiteren Schritt schließe man ein Auge und sei verblüfft. Die Wahrnehmung verändert sich sprunghaft, die Karte erscheint nun als offenes Buch. Die linke (rechte) Seite scheint von Licht getroffen zu sein, aber eine dunklere Farbe zu besitzen.

6 Objekt- und Formwahrnehmung

Formwahrnehmung läuft ist für uns Menschen ganz mühelos. Wenn man aber einmal versucht einem Computer Fähigkeiten der Formwahrnehmung beizubringen, sieht man bald, daß der Schein trügt. Der hat Probleme zweidimensionale Konturen in ein dreidimensionales Gebilde umzusetzen, oder er kann Konturen, die sich schneiden, nicht mehr dem einen oder anderen Gegenstand zuordnen. Aber vor allem ist der Computer nicht in der Lage ein halb verdecktes Objekt zu identifizieren.

6.1 Gestaltpsychologie

Die Gestaltpsychologie wurde von Max WERTHEIMER begründet, der sich anhand seiner Experimente (z.B. zur scheinbaren Bewegung,) gegen den Strukturalismus wandte. Nach Meinung der Gestaltpsychologen muß ein Stimulus als Ganzes betrachtet werden. Es ist unmöglich ihn in Einzelteile zu zerlegen und die Wirkung jedes einzelnen auf die Wahrnehmung zu untersuchen, denn der Stimulus wird in einem aktiven Prozeß *organisiert*. Die **Gestaltgesetze** sind die grundlegenden Mechanismen, nach denen die Wahrnehmung einzelne Reize zu einem ganzen zusammenfügt.

6.1.1 Gestaltgesetze

Prägnanz: das Gesetz der guten Gestalt

Die Prägnanz ist das zentrale Gesetz der Gestaltpsychologie. Es besagt, daß jedes Muster von Reizen derart kombiniert wird, daß die daraus resultierende Struktur möglichst einfach ist.

Ähnlichkeit

Ähnliche Dinge werden wahrgenommen, als gehörten sie gemeinsam einer Gruppe an. Eine Ähnlichkeit von Dingen kann auf ihrer Form, auf der Farbe, Größe oder räumlichen Orientierung basieren. Gruppierung gibt es auch für auditorische Reize (siehe 0)

Gute Fortsetzung

„Wenn eine Anzahl von Punkten miteinander verbunden werden und sich daraus Geraden oder geschwungenen Kurven ergeben, so scheinen sie zusammen zu gehören. Diese einfachen Linien werden so gesehen, daß sie dem geringsten Widerstand folgen.“

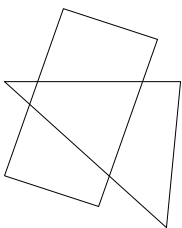


Abbildung 13

Meines Erachtens geht es hier darum, viele Einzelheiten zu gruppieren, so daß die Gruppen möglichst wenige und einfache geometrische Objekte bilden. Natürlich könnte man Abbildung 13 auch als Versammlung von einem kleinen Dreieck und vier unregelmäßigen Trapezen betrachten, aber ich denke kein

Mensch täte das unwillkürlich.

Nähe

Dinge, die nahe beieinander liegen, werden als zusammengehörig empfunden.

Gemeinsames Schicksal

Dinge, die sich in dieselbe Richtung bewegen, werden als zusammengehörig empfunden.

Vertrautheit oder Bedeutungsinhalt

Dinge werden gruppiert, wenn die Gruppierung einen Sinn ergibt und/oder uns vertraut ist.

6.1.2 Figur-Grund Unterscheidung

Auch ein zentrales Thema in der Gestaltpsychologie war die Fähigkeit des Menschen, ein Objekt von seinem Hintergrund zu unterscheiden. Einige Eigenschaften von **Figur/Grund** sind:

- a) Eine Figur hat mehr 'Objektcharakter'. Sie wird als etwas eigenständiges gesehen, und sie kann leichter erinnert werden.
- b) Im Gegensatz scheint der Grund sich *unförmig hinter* der Figur auszudehnen.
- c) Die Figur wird *vor* dem Grund gesehen.
- d) Die Kontur, die Figur und Grund voneinander trennt, wird der Figur zugeschrieben.

Welche Objekte eines Bildes als Figur und welche als Grund interpretiert werden hängt stark von den Objekten selbst ab. Es gibt aber zweideutige Bilder, an denen sich gut zeigen läßt, von welchen Faktoren die Figur-Grund-Unterscheidung abhängt.

Symmetrische Flächen werden bevorzugt als Figur angesehen. Ein Merkmal, das die Symmetrie noch übertrifft ist die **Konvexität**. Konvex bedeutet, daß die Umrisse eines Objektes nach außen gewölbt sind. **Kleinere** Dinge werden eher als Figur wahrgenommen, ebenso Dinge, die **vertikal oder horizontal ausgerichtet** sind.


Das wichtigste Kriterium ist allerdings der Bedeutungsgehalt.. Die Figur-Grund-Unterscheidung richtet sich in erster Linie danach, wie das Bild einen Sinn ergibt.

6.2 Neuere Untersuchungen zur Gestalttheorie

Obwohl die Gestalttheorie großen Einfluß auf die Wahrnehmungspsychologie hat, gibt es an ihr einiges zu bemängeln. So kann bei längerem Betrachten einer Szene die Wahrnehmung sich verändern. Die Gestaltpsychologie kann das nicht erklären. Auch sind die verwendeten Begriffe häufig zu unklar. Prägnanz verlangt, daß die Wahrnehmung Objekte möglichst einfach strukturiert; aber was ist mit einfach gemeint? Im Nachhinein sind solche Erklärungen sehr plausibel, doch läßt sich mit dieser Theorie nichts vorhersagen. Die Gestaltpsychologie beschreibt mehr, als daß sie

erklärt. Zudem sind die Beispiele der Gestaltpsychologen stark vereinfacht, so daß es schwerfällt einen rechten Bezug zum Alltag herzustellen.

Einige Wissenschaftler versuchen daher einen gestaltpsychologischen Ansatz zu realisieren, der experimentell ausgerichtet ist. N. WEISSTEIN & E. WONG (1955) gingen einer Idee von JULESE nach, laut der in der Figur mehr Details erkannt würden als im Grund. Sie bedienten sich eines Bildes, in dem Figur und Grund nicht eindeutig sind, dem **Rubins Kelch** (Goldstein '89 Abb. 6.24; '96 5.25). Auf dieses Bild wurden im Wechsel horizontale und vertikale Linien projiziert. Die Versuchsperson sollte jeweils die Ausrichtung der Linie nennen, und was sie als Figur gesehen hatte. Die Angaben waren im Schnitt dreimal so zuverlässig, wenn die Projektionen auf die Figur fielen.

In einer anderen Untersuchung wurden die Eigenschaften untersucht, die für Gruppierungen von Stimuli verantwortlich sind. Werden die drei Objekte in  **Abbildung 14** nach ihrer Ähnlichkeit beurteilt, dann werden das gerade und das schiefe T als ähnlicher gesehen. Werden größere Mengen von allen dreien Zeichen angezeigt, dann werden dagegen das T und das L gruppiert; die schiefen T's werden abgesondert. *Die Orientierung ist (zumindest in diesem Fall) für Gruppierungseffekte wichtiger als die Ähnlichkeit.*

BANKS & PRINZMETAL bestätigten das Gestaltgesetz der Gruppierung und der guten Fortsetzung, indem Versuchspersonen gebeten wurden aus einer Anzahl systematisch angeordneter Objekte einen Zielreiz zu identifizieren, wobei sie die Reaktionszeiten gemessen haben (Goldstein '89 Abb. 6.38 & 6.39).

6.3 Wahrnehmung als Konstruieren

Vertreter einer konstruktivistischen Wahrnehmungspsychologie sind weniger an der Beschaffenheit der Reize interessiert, als , sondern vielmehr an der Frage: Wie werden Wahrnehmungen durch das Gehirn geformt? Sie fragt also nach den Prozessen, die der Wahrnehmung zugrundeliegen. HERMANN VON HELMHOLTZ (vor ca. 100 Jahren) war der erste, der sich mit derartigen Fragen beschäftigte. Er stellte das **Wahrscheinlichkeitsprinzip** auf, das da lautet: „Wir werden genau das wahrnehmen, was mit größtmöglicher Wahrscheinlichkeit für die sensorische Stimulation verantwortlich ist.“ Was auch bedeutet, daß nicht nur der Stimulus selbst, sondern im Zweifelsfall die Situation entscheidet, was man sieht.

Eine moderne Weiterentwicklung dieses Prinzips stammt von GREGORY (1973), der Wahrnehmung als „*Testen von Hypothesen*“ beschreibt. Wir stellen also eine Hypothese auf, schauen hin, und sehen dann , ob wir recht hatten. Dieser Vorgang verläuft unbewußt.

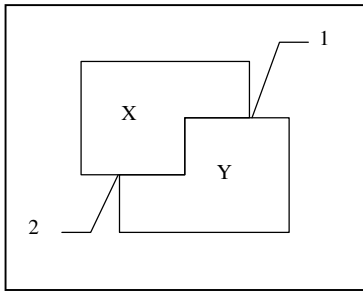


Abbildung 15

Von einer anderen Seite ging J. HOCHBERG auf die Suche nach Wahrnehmungsprozessen. Er zeichnete die Augenbewegungen von Menschen auf, wobei ihnen verschiedene Stimuli vorgelegt wurden. Nach seinen Vorstellungen haben die Augenbewegungen zwei Aufgaben. Die erste ist es, alle Details eines Bildes zu erfassen, die andere mittels dieser Informationen ein **mentales Abbild** davon zu erstellen. Die einzelnen Teile eines Bildes müssen zusammengesetzt/integriert werden. Wie das geschieht, hängt unter anderem davon ab, welcher Punkt in einem konkreten Augenblick anvisiert ist. In Abbildung 15 erscheint das Objekt Y vorne, wenn Punkt 1 fokussiert wird, bei Punkt 2 erscheint dagegen das Objekt X vorne.

6.4 Wahrnehmung als Analyse von Komponenten

Dieser Ansatz beruht auf der Annahme, daß Wahrnehmung in zwei Stufen erfolgt. In der ersten, **präattentiven Stufe** wird ein Reiz in viele Einzelteile, sogenannte **Primitive** zerlegt. Dieser Vorgang verläuft automatisch und sehr schnell. In der zweiten Stufe werden die Primitive zu einem Ganzen zusammengefügt. Diese Stufe **fokussierter Aufmerksamkeit** erfordert (wie der Name schon sagt) Aufmerksamkeit und verläuft keineswegs automatisiert ab.

6.4.1 Suche nach den Primitiven

Auf der Suche nach den Primitiven fragt man häufig nach Unterschieden in Reizstrukturen, die zu einer *unmittelbaren Trennung* dieser Reize führen. Dieser Pop-Out-Effekt deutet auf ein Primitiv hin. Eine andere typische Aufgabe besteht darin, aus einer Menge von Elementen (Buchstaben, Kreuze, Kringel) ein ganz bestimmtes zu entdecken.

TREISMAN identifizierte mit diesen beiden Methoden folgende Primitive.

- Kurven
- Orientierung
- Farben
- Begrenzung von Linien
- Bewegung
- Geschlossenheit von Flächen
- Kontrast
- Helligkeit

Diese Merkmale eines Stimulus werden in der präattentiven Stufe voneinander getrennt, sagt die Theorie. Um das zu beweisen bediente TREISMAN sich der **Technik fälschlicher Kombinationen**. Mehrere Reize werden mit einer Darbietungszeit von 1/5 Sekunden gleichzeitig angezeigt, zum

Beispiel ein rotes S, ein grünes T und ein blaues X. Danach wird maskiert¹⁰. In einem Drittel der Darbietungen geben die Versuchsperson verdrehte Antworten, das rote S wird als grün bezeichnet und das X als rot. Erklärung: Jedes Primitiv ist unabhängig von den anderen somit können diese auch falsch kombiniert werden, wenn die Reize nur sehr kurz zu sehen sind.

Dieses Ergebnis ist mit Blick auf physiologische Eigenschaften des visuellen Systems durchaus plausibel. Es gibt Neuronen, die auf Farbe oder Orientierung reagieren, Sie befinden sich in unterschiedlichen Säulen des Kortex. Diese Merkmale werden sicherlich miteinander kombiniert, doch bevor das geschieht sind sie (wie gesagt) in verschiedene Säulen getrennt.

6.4.2 Kombination der Primitive

Nun wechseln wir von der unbewußten präattentiven Verarbeitungsstufe auf die bewußte Stufe, in der die Primitive miteinander verknüpft werden. Das folgende Experiment basiert auf der Idee, daß es in dieser Stufe notwendig ist, seine Aufmerksamkeit auf einem Punkt zu konzentrieren. In Form eines Tic-Tac-Toe-Spielbretts werden mehrere rote O's, blaue X und *ein* grünes X kurzzeitig dargeboten und dann maskiert. Die Versuchsperson werden danach gefragt, ob ein grünes X vorhanden war und wenn Ja, wo es sich befand. Es machte im Allgemeinen keine Mühe die erste Frage zu beantworten, wenn man allerdings die Position nennen soll, sind Versuchspersonen überfordert. Nach TREISMAN genügt es, das Vorhandensein des Primitivs 'grün' zu testen, es ist nicht nötig, die Aufmerksamkeit auf die Position des Objektes zu lenken.

In einer zweiten Aufgabe befindet sich ein blaues O statt des grünen X auf dem Spielbrett. Hier ist es nötig sich stärker zu konzentrieren, da zur rechten Identifikation zwei Primitive verknüpft werden müssen: Farbe (blau) und Form (O). Um die Verknüpfung zu ermöglichen, muß sich die Versuchsperson zudem auf einen bestimmten Punkt des Spielbretts konzentrieren. Und tatsächlich konnte die Position des O's immer bestimmt werden, wenn auch dessen Vorhandensein erkannt wurde.

6.4.3 Bottom-Up und Top-Down

TREISMAN beschreibt die zwei Stufen der Verarbeitung auch mit den Begriffen Bottom-Up und Top-Down. Die präattentive Stufe stellt einen Bottom-Up-Prozeß dar, grundlegende Eigenschaften eines Reizes werden getrennt betrachtet. Darauf bauen dann die Top-Down-Prozesse der zweiten Stufe auf. Hier werden die Reizeigenschaften miteinander verknüpft, zum einen untereinander, zum anderen werden Erfahrungen, Erwartungen und Wissen einbezogen. Es ließ sich zeigen, daß Versuchspersonen ein Objekt schwieriger identifizieren konnten, wenn die Eigenschaften eines Reizes der alltäglichen Erfahrung widersprachen.

¹⁰ Um Effekte des ikonischen Gedächtnisses auszuschließen.

6.5 Erkennen durch Komponenten

IRVING BIEDERMANN'S Mechanismus „**Recognition-by-Components**“ (**RCB**) geht der Frage nach, wie der Mensch aus der Wahrnehmung einfacher dreidimensionaler Körper (Kugel, Zylinder) komplexe dreidimensionale Objekte ermittelt. Diese einfachen geometrischen Objekte werden **Geons** (geometric Icons) genannt und entsprechen (in etwa) den Primitiven aus den Überlegungen TREISMAN'S. Nach Biedermann gibt es 36 solcher Geons, aus denen sich viele tausende alltäglicher Gegenstände kombinieren lassen.

Kann der Mensch möglichst viele Geons eines Gegenstandes identifizieren, so ist es für ihn leicht, ihn zu benennen. Werden Gegenstände in ungewöhnlicher Perspektive dargestellt, lassen sie sich nicht so leicht identifizieren. Man nennt es das **Prinzip der Komponenten-Rückgewinnung** (**principle of componential recovery**). Ein Beleg dafür lieferte ein Gedächtnisexperiment. Gegenstände ließen sich leichter erinnern, je mehr Geons bei der Darbietung erkennbar waren.

6.6 Rechnerischer Ansatz

MARR geht in seinem Ansatz ebenfalls davon aus, daß Wahrnehmung in mehreren Stufen abläuft. In diesen Prozeßstufen wird der proximale Reiz¹¹ mathematisch analysiert. Am Ende der Verarbeitung resultiert eine dreidimensionale Repräsentation des realen Gegenstandes.

In der ersten Stufe wird die Helligkeitsverteilung analysiert. Die Kanten des Objektes werden ausgemacht, sowie einige Primitive. Alles zusammen ergibt sich hieraus die **raw primal sketch**. Sie ist theoretisch vorhanden, für uns Menschen aber nicht sichtbar, nicht bewußt.

In der zweiten Stufe werden die Primitive nach Gestalt-Prinzipien gruppiert und dann in Gruppen weiterverarbeitet. Die daraus hervorgehende **2½D-Skizze** (oder Sketch) repräsentiert die Oberfläche des Objektes und deren Beschaffenheit. Die 2½D-Skizze wird schließlich in das übersetzt, was wir sehen, in eine dreidimensionale Repräsentation.

Der rechnerische Ansatz ist der komplexeste, der hier beschrieben ist. Allzu komplex, um alle Details zu beleuchten. Im Gegensatz zu den anderen Theorien ist er auch der umfassendste, denn er ist z.B. auch in der Lage zu erklären, warum unter verschiedenen Lichtverhältnissen trotzdem dasselbe Objekt erkennen.

¹¹ das Netzhautbild.

7 Größen- und Raumwahrnehmung

Die Frage, der in diesem Kapitel nachgegangen wird, lautet: Wie wird ein zweidimensionales Bild auf der Netzhaut in unsere dreidimensionale Wahrnehmung der Umwelt übersetzt.

7.1 Der Hinweisreiz-Ansatz

Die naheliegendste Annahme ist, daß wir Merkmale heranziehen, die als Anhaltspunkt für die Tiefenwahrnehmung dienen. Solche Merkmale sind zum einen in der Umwelt vorhanden (ein Objekt verdeckt ein anderes), zum anderen in den Wahrnehmungsorganen selbst (Krümmung der Linse), oder in den Bildern auf der Netzhaut (korrespondierende Netzhautstellen).

7.1.1 Bildliche Reize

Wenn sich Gegenstände **überlappen**, läßt sich unmittelbar erschließen, welcher von ihnen uns näher gelegen ist.

Je **größer** ein Gegenstand **im Gesichtsfeld** ist, also je größer der Sehwinkel ist, desto näher erscheint er

Die **Höhe im Gesichtsfeld** spielt eine Rolle für die Entfernungswahrnehmung (siehe Abbildung 16). Je näher ein Objekt dem Horizont angesiedelt ist, desto weiter scheint es entfernt zu sein. Dinge die unter dem Horizont zu sehen sind erscheinen um so weiter weg, je höher sie

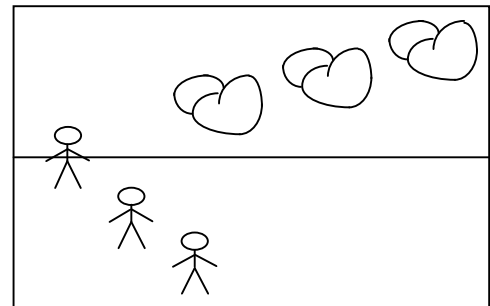


Abbildung 16

angesiedelt sind. Entsprechendes gilt, wenn das Objekt über dem Horizont zu sehen ist.

Ein weiterer **perspektivischer Effekt** ist der **Fluchtpunkt**, der von Psychologen als **lineare Perspektive** bezeichnet wird. Parallele Linien scheinen sich mit zunehmender Entfernung einander anzunähern.

Dinge, die sehr weit entfernt liegen (mehrere Kilometer) sind leicht unscharf zu erkennen und in ihren Farben leicht bläulich¹². Diese Tatsache wird als **atmosphärische Perspektive** bezeichnet. Die Luftteilchen streuen das Licht, das von diesen Dingen reflektiert wird. Der Effekt beruht also darauf, daß das Licht einen längeren Weg durch die Luft zurücklegen muß.

Wir **kennen** die **tatsächliche Größe** von den meisten Dingen, die uns ins Blickfeld geraten. Dies erleichtert es uns sehr, Entfernungen zu schätzen, indem wir wahre Größe und den Sehwinkel ins Verhältnis setzen.

¹² Ich kann aus persönlicher Erfahrung nicht sagen, daß mir weit Entferntes tatsächlich blau erschiene, aber theoretisch ist es so.

7.1.2 Okulomotorische Reize

Mit **Konvergenz** ist in diesem Fall gemeint, daß die beiden Augen meist nicht parallel ausgerichtet sind, die Pupillen sich also nicht im Zentrum des jeweiligen Auges befinden. Je näher ein Gegenstand rückt, desto mehr wandern die Pupillen in Richtung zur Nase. Die nötige Muskelbewegung dient als Hinweisreiz für die Entfernung des fokussierten Objektes.

Ebenfalls zur Entfernungsmessung dient die **Krümmung der Linse**, was allerdings nur bis zu einer Entfernung von drei Metern funktioniert. Über drei Meter hinaus ist die Linsenkrümmung konstant.

7.1.3 Bewegungsreize

Die **Bewegungsparallaxe** beschreibt, daß entfernte Objekte sich langsamer zu bewegen scheinen, nahe Objekte ziehen dagegen schnell vorüber. Beim Auto- oder Zugfahren hat das jeder schon mal beobachtet.

Eine Kombination des Prinzips der Bewegungsparallaxe und der Überlappung wird als **Interposition** bezeichnet. Wenn der Beobachter sich bewegt, dann verändert sich das Verhältnis, in dem die Gegenstände sich überdecken.

7.1.4 Binokulare Disparität

Jedes unserer beiden Augen betrachtet die Welt aus seiner eigenen Perspektive, was sie jeweils 'sehen' ist nicht identisch. Einen Umstand, der **Stereopsis** genannt wird. Auch daher gewinnt das Gehirn Information über Entfernungen in der Umwelt.

Mit einem speziellen Gerät - **Stereoskop** genannt - läßt sich eine Illusion von Tiefenwahrnehmung erzeugen, indem man jedem Auge 'sein eigenes' Bild präsentiert, wie dieses Auge es selbst aufnähme.

Jeder Punkt auf der Netzhaut hat einen **korrespondierenden Punkt** auf der Netzhaut des anderen Auges. Diese korrespondierenden Netzhautstellen sind Punkte, die im visuellen Kortex an derselben Stelle repräsentiert sind. Sie lassen sich ermitteln, indem man (gedanklich) die beiden Netzhäute übereinanderlegt. Diejenigen Punkte, die ihren Platz übereinander finden, sind korrespondierend.

Betrachtet man die Objekte, die auf korrespondierende Netzhautstellen fallen, so wird man (a) feststellen, daß diese Objekte in der Umwelt in einer (gedachten) Kreislinie angeordnet sind (Goldstein '89 Abb. 7.17) und (b), daß der fixierte Punkt auf dieser Kreislinie liegt. Diese Kreislinie heißt **Horopterkreis**. Alle Punkte, die *nicht* auf dem Horopterkreis liegen, fallen auf nicht-korrespondierende Netzhautstellen: sie liegen **disparat**. Und je weiter sie sich von der Kreislinie entfernen, desto mehr wächst der **Grad der Disparität/Disparitätswinkel** an.

Die binokularen Tiefenzellen im visuellen Kortex ermitteln diesen Disparitätswinkel. Jede Zelle reagiert auf einen anderen Winkel, wodurch **stereoskopisches Sehen** ermöglicht wird.

7.2 Größenwahrnehmung

Es gibt zwei Variablen, die in die Größenwahrnehmung einfließen. Der Sehwinkel/die Größe des Bildes auf der Retina¹³ und die Distanz des Gegenstandes, wobei gilt:

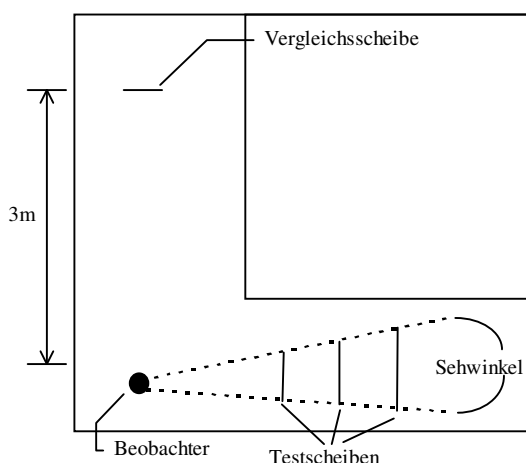
1. Je näher das Objekt, desto größer der Sehwinkel.

2. Je größer das Objekt, desto größer der Sehwinkel.

⇒ Der Sehwinkel wird durch Größe und Distanz des Objektes eindeutig bestimmt.

7.2.1 Größenkonstanz

Wir schreiben Gegenständen eine feste Größe zu, egal wie groß die Entfernung ist, in der wir sie wahrnehmen. A.H. HOLWAY und EDWIN BORING (1941) konnten zeigen, daß **Größenkonstanz** auf der Fähigkeit der Tiefenwahrnehmung beruht.



Die Versuchspersonen saß in einer Ecke, an der ein langer ein Knick macht (Abbildung 17). In einer Richtung des Flurs wurden ihr Testscheiben vorgegeben. Deren Größe und Entfernung waren jeweils so angelegt, daß der Sehwinkel 1° betrug. In der anderen Richtung des Flurs befand sich die Vergleichsscheibe, die sich in festem Abstand von zum Beobachter befand.

Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand darin, die Vergleichsscheibe so in ihrer Größe zu verändern, daß sie dieselbe Größe hat, wie die Testscheibe. In der ersten

Abbildung 17

experimentellen Bedingung wurde diese Aufgabe leicht gelöst, da alle Tiefenreize vorhanden waren. Nun wurden in drei weiteren Bedingungen die Tiefenreize systematisch ausgeschaltet: In der zweiten Bedingung wurde die Versuchsperson angehalten, ein Auge zu schließen; In der dritten Bedingung mußte sie durch das Loch einer Wand blicken; und viertens wurden zu der Vorgehensweise aus Bedingung drei noch die Wände mit Vorhängen verkleidet, um Schatten und Reflexionen, die in irgendeiner Art Tiefeninformation enthalten.

Die Ergebnisse zeigen, daß die Größenkonstanz zusammenbricht, wenn die Entfernung des Objektes nicht mehr bestimmt werden kann. Zur Größenkonstanz sind beide Informationen nötig: *Sehwinkel und Distanz*.

¹³ Zwei Objekte, die denselben Sehwinkel einschließen, haben auch ihre retinalen Bilder in genau derselben Größe.

7.2.2 Das Emmert'sche Gesetz

„Ein Nachbild erscheint um so größer, je weiter es entfernt zu sein scheint.“

Dies läßt sich leicht erklären, da das Netzhautbild des jeweiligen Nachbildes immer gleich groß ist. Zur Größenwahrnehmung ist jedoch auch die Entfernung notwendig, und die wahrgenommene Entfernung eines Nachbildes hängt davon ab, wie weit der Hintergrund entfernt ist, auf den das Nachbild unwillkürlich projiziert wird (Goldstein '96 Abb. 635/Goldstein '89 Abb. 7.28).

7.2.3 Größentäuschungen

Das Ame'sche Zimmer

Das **Ame'sche Zimmer** ist ein 'verzerrtes Wohnzimmer. Boden und Decke sind nicht parallel zueinander angeordnet, die Höhe des Raumes wächst von einer Seite zur anderen. Der Effekt ist, daß *Dinge gleicher Größe als unterschiedlich groß wahrgenommen werden*, wenn sie an verschiedenen Stellen stehen. Durch die Schiefe von Boden und Decke werden unsere Tiefenreize verzerrt. Man glaubt, Dinge seien gleich weit entfernt, was tatsächlich nicht der Fall ist (Goldstein '89 Abb. 7.30; '95 Abb. .37.)

Die Mondtäuschung

Der Mond erscheint am Horizont größer als im Zenit.

Ein Ansatz dies zu erklären ist die **Theorie scheinbarer Distanz**. Sie geht davon aus, daß Objekte weiter entfernt erscheinen, wenn sich unterhalb dieses Gegenstandes eine gefüllte Fläche befindet, denn dadurch werden Tiefenreize vermittelt. Tatsächlich verschwindet die Mondtäuschung, wenn die Erde bis zum Horizont abgedeckt wird. Und wenn man Versuchspersonen bittet, sich den Himmel als Oberfläche vorzustellen, und sie darauf fragt, wie weit der Himmel am Zenit und am Horizont entfernt sei, dann wird die Entfernung zum Horizont größer eingeschätzt.

Die **Hypothese der Blickanhebung** sagt dagegen, die Größentäuschung beruhe auf der Tatsache, daß wir im einen Fall den Blick oder den Kopf heben müssen, um den Mond anzusehen, und das andere mal nicht. Indem Versuchspersonen gebeten wurden sich auf den Rücken zu legen und den Mond zu betrachten konnte die Mondtäuschung umgekehrt werden. Der Mond am Horizont erschien nun kleiner (Goldstein '89 Abb. 7.35).

Die Müller-Lyer'sche Täuschung

(Die schlechte Erklärung von einem namens GREGORY möchte ich mir schenken).

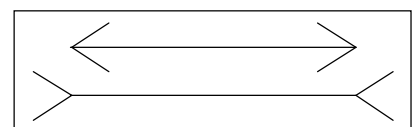
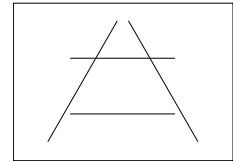


Abbildung 18

Die Ponzo-Täuschung

Die obere Linie wird wahrgenommen, als sei sie weiter entfernt als die untere. Daher erscheint sie größer.



7.2.4 GIBSON'S ÖKOLOGISCHER ANSATZ

J.J. GIBSON entwickelte seinen ökologischen Ansatz aus den Ergebnissen **Abbildung 19** heraus, die sich bei Untersuchungen in der Luftfahrt ergaben. Die traditionellen Tiefenreize (wie Überlappung, etc.) konnten nicht erklären, wie der Pilot die Entfernung zur Landebahn abschätzt. Daraus folgte GIBSON, daß die relevanten Hinweisreize in der Oberfläche des Boden zu suchen sind.

Er betonte die Bedeutung invarianter Informationen, also Information, die sich bei Fortbewegung des Beobachters nicht verändert, außer er näherte sich dem fixierten Gegenstand an.

Texturgradient

Die Elemente, die den Gradienten ausmachen, werden mit wachsender Entfernung enger zusammengepackt. Der Vorteil dieses Hinweisreizes ist zum einen seine Langlebigkeit, zum anderen gibt der Texturgradient auch Informationen über die Ausrichtung einer Oberfläche.

Fließmuster

Es gibt an, wie schnell Elemente aus der Umgebung an dem bewegten Beobachter vorbeiziehen. Je näher ein Objekt ist, desto schneller zieht es vorbei.

Horizont-Verhältnis-Prinzip

Die Augenhöhe eines Beobachters sei 1,70 m und dieser Beobachter stehe auf einer Ebene. Für alle Objekte in dessen Blickfeld gilt, die Höhe eines Punktes an dem Objekt und Horizont sich schneiden ist gleich der Augenhöhe des Betrachters, also exakt 1,70 m.

Weiterhin gilt für Objekte identischer Größe, daß die Verhältnisse identisch sind, in dem der Horizont diese Objekte in zwei Hälften trennt.

GIBSON'S Betonung auf invarianter Information rührt daher, da er die Wahrnehmung des Menschen in seiner natürlichen Umgebung studierte¹⁴. Und meistens befinden die Menschen sich in Bewegung, was sie von invarianter Information abhängig macht, da diese sich nicht ständig mit der Perspektive verändern.

GIBSON wehrte sich auch gegen die herkömmliche Wahrnehmungspsychologie, die sich meist mit Abbildungen auf der Retina beschäftigt. Denn diese Analysen beschäftigen in erster Linie mit

¹⁴ Daher die Bezeichnung als 'ökologische' Theorie.

statischen Bildern, nicht mit bewegten. Außerdem würde die Wahrnehmung nicht den Netzhautbildern entsprechen.

Eine weitere Kritik GIBSON's richtet sich gegen konstruktivistische Ansätze zur Wahrnehmung, nach denen komplizierte Berechnungen für die Wahrnehmung wichtig sind. Seiner Meinung nach aber enthält das Wahrnehmungsfeld ausreichend Informationen, die eine direkte Wahrnehmung möglich machen, ohne Umwege.

8 Bewegung und Kausalität

Es ist sehr bedeutsam sich mit der Wahrnehmung von Bewegung zu beschäftigen. Aus der Bewegung beziehen wir eine Reihe von Informationen.

1. Bewegung zieht unsere Aufmerksamkeit an. Will man jemanden auf sich aufmerksam machen, so winkt man am besten mit der Hand.

2. Durch Bewegung erhält man dreidimensionale Informationen über andere Gegenstände, da sie aus verschiedenen Perspektiven ansichtig werden.

3. Bewegung eines Objektes macht es sehr viel einfacher, Figur und Grund zu unterscheiden.

4. Es wird uns möglich mit der Umwelt zu interagieren. Wir vermeiden es, gegen Laternenmasten zu laufen (meistens), wir fangen einen Basketball oder spielen Computer.

8.1 Traditionelle Ansätze

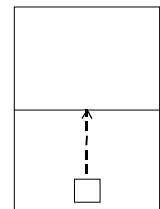
Ursprünglich betrachtete man den passiven Beobachter, der einer bewegten Umwelt ausgesetzt ist. Welche Stimuluseigenschaften haben welchen Einfluß auf die Bewegungswahrnehmung des Beobachters? Und wie sehen die physiologischen Mechanismen aus? Diese beiden Fragen haben die Wissenschaftler lange beschäftigt.

8.1.1 Reale Bewegung

Faktoren

Es gibt eine **Schwelle für die Bewegungswahrnehmung**, die beträgt $1/6^\circ - 1/3^\circ$ des Seh winkels pro Sekunde. Diese Schwelle kann allerdings durch geeignete Umgebungsreize um das ca. 20-fache erniedrigt werden. So helfen Linien, die orthogonal zur Bewegungsrichtung verlaufen, die kritische Geschwindigkeit auf $1/60^\circ$ pro Sekunde zu reduzieren.

Der Kontext beeinflusst nicht allein die Schwelle, sondern auch die Wahrnehmung der Geschwindigkeit. Wenn die Bewegung des Rechtecks in Abbildung 20 betrachtet wird, so scheint das Rechteck kurz vor der Mittellinie, dem **Fixationsband** zu beschleunigen, und dahinter wieder abzubremesen.



Die *Größe von Objekt und Umfeld* haben Einfluß auf die empfundene **Abbildung 20** Geschwindigkeit, selbst wenn die Verhältnisse Objekt - Umfeld identisch sind. Ein größeres Ding muß sich schneller bewegen, um gleich schnell zu erscheinen; eine Katze muß in einem großen Käfig schneller laufen, als eine Maus in einem kleinen Käfig. Man bezeichnet diesen Effekt als **Geschwindigkeits-Transposition**, obwohl sie gleich schnell durchs visuelle Feld huschen, wir sehen es anders.

Je weiter der Beobachter von einem bewegten Gegenstand entfernt ist, desto niedriger ist die Geschwindigkeit des Objektes durch das visuelle Feld. Trotzdem kommt es uns nicht unendlich langsam vor, sondern wir erleben die tatsächliche Geschwindigkeit (**Geschwindigkeitskonstanz**).

Mechanismen

Über Verschaltungsprinzipien der Rezeptoren werden Bewegungsdetektor-Zellen erstellt. Solche Zellen sind für Richtung, Geschwindigkeit und die Intensität eines Reizes jeweils unterschiedlich sensitiv.

Zum Schaltplan (Abbildung 21). Ein Stimulus, der sich von links nach rechts bewegt wird erst über Rezeptor 1 eine Hemmung von Zelle A hervorrufen. Bewegt sich der Reiz weiter zu Rezeptor 2, so wird das exzitatorische Signal die Zelle A nicht mehr erregen können. Bei Bewegung in entgegengesetzte Richtung ist dies nicht der Fall, da der hemmende Einfluß von Rezeptor 1 zu spät kommt. Die Zelle M wird erregt und damit ist die Bewegung registriert.

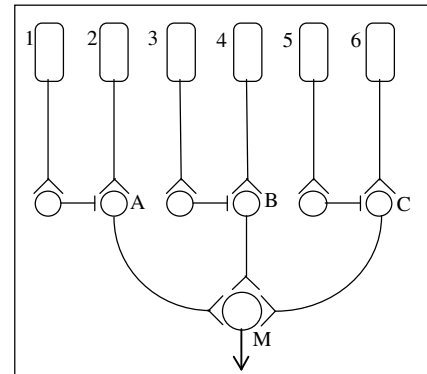


Abbildung 21

Im Großen und Ganzen ist dieses Prinzip ausreichend, um Bewegungswahrnehmung zu erklären, zwei Probleme bleiben allerdings unklar.

1. Wenn das Auge ein bewegtes Objekt fixiert und ihm folgt, wie ist dann noch Bewegungswahrnehmung möglich?

2. Wenn der Beobachter sich bewegt und damit auch das Netzhautbild, wie wird erkannt, daß die Umgebung sich in Ruhe befindet?

Die Lösung für Erstens lautet **Reafferenzprinzip (Corollary Discharge Theory)**. Augenbewegungen werden in die Verarbeitung von Bewegung mit einbezogen. Der motorische Kortex sendet Kopien seiner Befehle an die Augenmuskulatur an einen (sog.) **Komparator**. Der Komparator ist ein hypothetischer Schaltkreis im Gehirn, der einen Vergleich anstellt zwischen den bewegungsanzeigenden Stimuli aus der Retina und den Augenbewegungen. Wenn aus *einer der beiden* Informationsquellen Signale in den Komparator gelangen, erleben wir Bewegung, nicht aber, wenn beiderseits Signale eintreffen. In diesem Fall heben sich die Informationen gegenseitig auf, die Umgebung bleibt in Ruhe.

Das Reafferenzprinzip ist gut belegt. Wenn man die Augenmuskulatur ausschaltet, und darauf Augenbewegungen intendiert, springt das Bild. Wenn man den Augapfel mit dem Finger bewegt (indem man am Augenlid zupft), scheint die Umgebung sich kurzzeitig zu bewegen. Wenn man Nachbilder verursacht und bei Erscheinen des Nachbildes die Augen bewegt, hat man den Eindruck, also ob es sich bewegte.

8.1.2 Scheinbare Bewegung

Unter scheinbarer Bewegung wird verstanden, daß durch Aneinanderreihen stehender Bildern ein Eindruck von Bewegung erzeugt werden kann, so wie im Kino.

MAX WERTHEIMER untersuchte das Phänomen und ermittelte den Zusammenhang zwischen der Wahrnehmung von Bewegung und dem Inter-Stimulus-Intervall (ISI). Lag das ISI zwischen 30 und 200 ms, wurde eine Illusion von Bewegung erzeugt, wobei ca. 60 ms optimal waren. WERTHEIMER benutzte für die Messung zwei Lichter, die nacheinander aufleuchteten.

Andere Wissenschaftler untersuchten, wie das Phänomen bei komplexeren Versuchsanordnungen aussieht. TERNUS verwendete eine Kette von vier Lichtern in Folge (A-B-C-D). Erst leuchteten A-B-C gemeinsam auf, anschließend B-C-D. Der Erscheinung nach, rückt jedes der Lichter um eine Position weiter (also A nach B, ...). Durch diese **Gruppenbewegung** kommt so etwas wie eine Identität der Gruppe zustande, da sie sich als Ganzes weiterbewegt. Man nennt diese Illusion **phänomenale Identität**.

Die Anordnung von TERNUS wurde von PANTLE & PICCIANO ein wenig abgewandelt, die Folge ABC-BCD ging anschließend wieder von vorne los. Bei einem ISI über 50 ms schien eine Gruppe von drei Lichtern sich hin und her zu bewegen. War das Intervall allerdings kleiner so standen die beiden mittleren Lichter BC still und das äußerste hüpfte hin und her. Dies funktionierte allerdings nur, wenn die Bilder beiden Augen präsentiert wurden. Wird das erste Bild links, das zweite rechts dargeboten u.s.w., nimmt man ausschließlich Gruppenbewegung war.

Aus diesem Ergebnis wurde erschlossen, daß es *zwei unterschiedliche Mechanismen* für die Bewegungswahrnehmung gibt. Im Low-level-System wird zuerst die Bewegung eines Objektes wahrgenommen bevor andere Eigenschaften erkannt werden.

Tabelle 6

	Low-Level	High-Level
Geschwindigkeit	schnell (kurze ISIs)	langsam
Bewegungswahrnehmung vor Formwahrnehmung	ja	nein
Einfluß kognitiver Faktoren?	nein	ja
anatomische Lokation	monokulare Zellen	binokulare Zellen

8.1.3 Induzierte Bewegung

Ein Beispiel für **induzierte Bewegung** ist der Mond, der sich - von Wolken halb verdeckt - zu bewegen scheint, obwohl es die Wolken sind, die sich bewegen. Oder daß man im Zug sitzt und nicht erkennen kann, ob der eigene Zug anfährt oder der auf dem Nachbargleis.

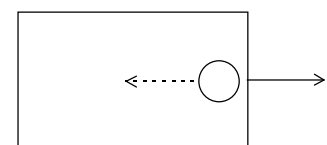


Abbildung 22

Induzierte Bewegung erfährt man, wenn ein kleines Objekt (in Ruhe) von einem großen umgeben ist, das sich bewegt. DUNCKER hat das mit einer einfachen Anordnung (Abbildung 22) untersucht.

Wenn er das Rechteck nach rechts zog, berichteten ihm Versuchspersonen, der Kreis bewege sich nach links.

8.1.4 Autokinetische Bewegung

In einem völlig dunklen Raum¹⁵ ein kleines Lichtlein zu beobachten kann sehr verwirrend sein. Das Licht bewegt sich hin und her. Noch dazu läßt sich diese Bewegung über Autosuggestion beeinflussen. Denn das Licht bewegt sich nicht wirklich, es erscheint nur so. Es ist der Effekt der **autokinetischen Bewegung**.

8.1.5 Nacheffekte von Bewegung

In einem Experiment betrachteten Versuchspersonen ein Streifenmuster, das sich in eine Richtung bewegte. Sie wurden entweder gebeten, dem Streifenmuster zu folgen, oder die Augen still auf einem Punkt zu fixieren. Im ersten Fall war nichts ungewöhnliches zu berichten, wenn das Streifenmuster plötzlich durch eine weiße Fläche ersetzt wurde. Im zweiten Falle sahen die Versuchspersonen jedoch ein Nachbild, ein Streifenmuster, das sich in genau entgegengesetzter Richtung bewegte. Für diesen **Nacheffekt von Bewegung** reicht es nicht aus Bewegung zu empfinden, sondern das Bild muß über die Retina wandern.

Mit Hilfe eines Wasserfalls läßt sich der Effekt ebenfalls erzeugen (was im Goldstein als **Wasserfall-Illusion** bezeichnet wird). Man fixiere den Wasserfall etwa 30 bis 60 Sekunden, dann schaue man irgendwo in die Landschaft, die sich nun nach oben zu bewegen scheint.

8.2 Neuer Ansatz - Ereigniswahrnehmung

Zuallererst sei geklärt, was denn mit Ereignis gemeint ist? Ganz einig sind die Experten sich zwar nicht, aber daß Bewegung dabei eine Rolle spielt, wenn sich etwas ereignet, das scheint weithin anerkannt: „Wenn ein Objekt irgendeiner Veränderung unterzogen wird, wie z.B. einer Bewegung...“ (D. PROFFITT & J. CUTTING) kann man wohl von einem Ereignis sprechen.

Der Forschung zur Ereigniswahrnehmung liegt eine eigene philosophische Betrachtungsweise zugrunde, deren Ursprünge (u.a.) in J.J. GIBSONS ökologischem Ansatz zur Tiefenwahrnehmung zu suchen sind. Das ständige ‘In-Bewegung-Sein’ von Beobachter und/oder Umwelt wird hier stark betont. Allerdings wird nicht die Bewegung selbst betrachtet, sondern die Informationen, die aufgrund von Bewegung erst verfügbar werden.

¹⁵ Die Umgebung muß absolut unsichtbar sein.

8.2.1 Reizstruktur

Kinetischer Tiefeneffekt

Mit Hilfe von Bewegung werden häufig Zweideutigkeiten aufgehoben. Wenn man den Schatten eines ruhenden Würfels betrachtet, so kann man dessen Form nicht eindeutig erschließen. Beginnt man nun den Würfel zu drehen, wird die Form schnell klar.

Daß die dreidimensionale Struktur eines Objekts aus einem zweidimensionalen bewegten Schattenriß erkennbar ist, nennt man den **kinetischen Tiefeneffekt**.

Relative vs. Generelle Bewegung

Die wahrgenommene Bewegung eines Gegenstandes hängt davon ab, wie sich andere Dinge in der Umgebung bewegen. Dieses Phänomen läßt sich mittels **perzeptueller Vektoranalyse** analysieren.

Jeder Pfeil in Abbildung 23 ist ein Vektor, mit dessen Hilfe die Bewegung der einzelnen Objekte dargestellt wird. Die durchgezogenen Pfeile repräsentieren tatsächliche Bewegung; die gestrichelten Vektoren zerlegen.

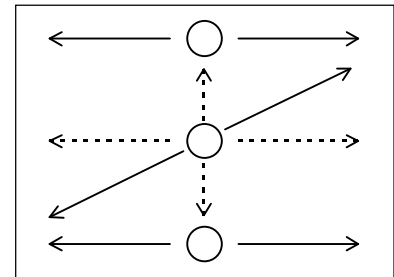


Abbildung 23

Die Idee ist nun, daß diejenigen Vektoren vom visuellen System ignoriert werden, die alle Objekte gemeinsam haben. In Abbildung 23 bedeutet das, daß wir eine senkrechte Bewegung des mittleren Kreises wahrnehmen, wobei er den beiden anderen Kreisen folgt. Eine diagonale Bewegung sehen wir dagegen keine¹⁶.

Wahrnehmung biologischer Bewegung (JOHANNSON)

Der von JOHANNSON verwendete Stimulus war eine Person, an deren Körper und Gliedmaßen Lichtpunkte angebracht wurden. Saß die Person still in einem verdunkelten Raum, konnten Versuchspersonen nicht erkennen, worum es sich bei den Lichtern handelt. Sobald die Person aufstand und im Zimmer umherging, war für die Versuchspersonen sofort klar, daß es sich um einen Menschen handelt.

Die Bewegung ergibt eine feste Struktur. Es wird nicht mehr das einzelne Licht wahrgenommen, sondern die Kombination und Relation aller Lichter gemeinsam. An diesen Strukturen kann man unterscheiden, ob es sich um einen Mann oder eine Frau handelt (Trefferquote bei 60-70%). Oder es läßt sich abschätzen, wieviel Gewicht von einer Person angehoben wird, ohne daß man das Gewicht selbst sehen könnte.

¹⁶ Im Goldstein sind hier auch realistischere Beispiele aufgeführt!

8.2.2 Kausalitätswahrnehmung

„Das Messer schneidet das Brot“ oder „Das Messer ist die Ursache für das Schneiden des Brotes.“ Unser Erleben von Ursache und Wirkung hängt in vielen Fällen von einer Bewegung ab. Eine Bedingung für das Erleben von Kausalität ist dabei das raum-zeitliche Verhältnis zweier Ereignisse (**Kontiguität**).

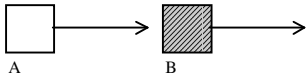


Abbildung 24

Experimentell wurde das mit Hilfe zweier Quadrate A und B untersucht. A bewegt sich in Richtung B, bleibt kurz vor B stehen, worauf sich B in Bewegung setzt. Ist der Zeitintervall kurz genug, so scheint das Quadrat A das Quadrat B anzustoßen. Dieses Intervall muß

allerdings sehr klein sein. Es liegt bei 50 ms oder kleiner, sonst ist dieser **Launching-Effekt** nicht beobachtbar.

8.2.3 Zuschreibung von Motiven und Persönlichkeit

HEIDER & SIMMEL zeigten Versuchspersonen einen 2½ Minuten-Film von drei geometrischen Objekten. Diese drei Objekte 'interagierten' miteinander. Ein großen Dreieck schien ein kleines zu schubsen, usw. Tatsächlich zögerten die Versuchspersonen keineswegs diese Objekte zu vermenschlichen und ihnen Eigenschaften zuzuschreiben. Viele Versuchspersonen beschrieben das große Dreieck als männlich und waren ihm eher abgeneigt.

Bewegung kann geometrischen Objekten Leben einhauchen, indem wir in ihnen Eigenschaften entdecken, wie sie zu lebendigen Wesen gehören.

8.2.4 Balancehaltung

Entgegen aller Überzeugungen, das Vestibularsystem sei allein für die Balance zuständig, schlug J.J. GIBSON vor, daß Sehen ebenfalls ein **propriozeptiver Sinn** sei. Daß er damit recht hat ist leicht nachzuvollziehen, wenn man versucht bei geschlossenen Augen auf einem Bein zu stehen. Es ist nicht unmöglich, aber doch einiges schwieriger.

In einem Experiment von LEE & AARONSON (1974) wurde das auf andere Weise demonstriert. Sie konstruierten einen **schwingenden Raum**, in dem Wände und Decke sich vor- und rückwärts bewegen lassen, während der Boden stabil bleibt. Damit konnte ein optisches Fließmuster erzeugt werden, als ob man sich in Raum bewegte. Kinder im Alter zwischen 13 und 16 Monaten waren zu 33% nicht in der Lage sich auf den Beinen zu halten, wenn die Wände in Bewegung gerieten.

8.2.5 Bewegung durch die Umgebung

Wenn wir uns durch die Gegend bewegen, haben wir ständig auf zwei Dinge zu achten. Erstens müssen wir Kurs halten, zweitens müssen wir einen Zusammenstoß mit anderen Dingen vermeiden.

Fokus der Expansion

Mit **Fokus der Expansion** ist im Prinzip der Fluchtpunkt gemeint, auf den man sich zubewegt. Der Beobachter kann daran erkennen, wohin er sich bewegt, nämlich auf den Fluchtpunkt zu, der als einziger im visuellen Feld stillsteht.

Optische Flußlinien

Das sind gedachte Linien, die von irgend einem Punkt der Umgebung ausgehen und sich alle im Fluchtpunkt treffen. Ein Autofahrer 'denkt sich diese Linien' auf der Straße und ist auf diese Art in der Lage, Kurs zu halten.

Bewegungsparallaxe

Wenn ein bewegter Beobachter nicht in Bewegungsrichtung blickt, sondern seitwärts, so scheinen sich Objekte nicht in die gleiche Richtung zu bewegen, wenn sie unterschiedlich weit weg sind. Was weit entfernt ist, bewegt sich mit dem Beobachter mit, was nah ist, zieht an ihm vorüber.

Winklexpansion

Wenn man sich auf einen Gegenstand zu bewegt, so vergrößert sich der visuelle Winkel. Aus der **Geschwindigkeitsrate dieser Winklexpansion** kann man abschätzen, wann man diesen Gegenstand erreicht und (falls bevorzugt) abbremsen oder ausweichen.

9 Akustik

9.1 Reizgrundlage

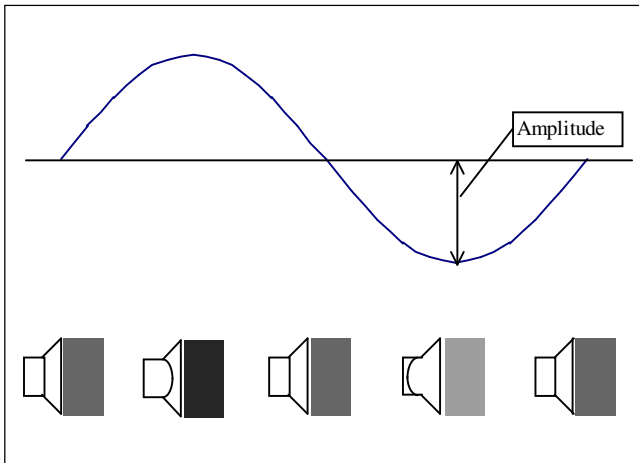


Abbildung 25

Die Wahrnehmung von Geräuschen ist bedingt durch die Vibration irgendwelcher Dinge. Das ist häufig nicht sichtbar, aber eben hörbar. Wenn der Lautsprecher einer Hifi-Anlage tönt und dröhnt, dann schwingen dort die Lautsprechermembranen, diese versetzen die Luft in Schwingung, und die Luft versetzt seinerseits das Trommelfell in Schwingung... die Folge ist, wir hören.

Die Schwingungen in der Luft, das sind Luftdruckschwankungen. Sind sie so regelmäßig, wie der Sinus in Abbildung 25, dann spricht man von **reinen Tönen**. Sie sind (a) gekennzeichnet durch ihre **Amplitude** und (b) durch ihre **Frequenz/Wellenlänge**¹⁷. Die Frequenz gibt an, wieviele Schwingungen pro Sekunde erfolgen, ihre Einheit ist **Hertz**.

Reine Töne kommen im Alltag selten vor. **Komplexe Klänge** sind schon alltäglicher, da sie von jedem Musikinstrument erzeugt werden. Solche Klänge bestehen aus mehreren überlagerten Wellen unterschiedlicher Frequenz. Derjenige Ton mit der niedrigsten Frequenz¹⁸ wird als **Grundton** bezeichnet. Diese Frequenz bestimmt die Periode des gesamten Schalldruckverlaufs; oder (anders ausgedrückt), wenn der Grundton eine ganze Schwingung beendet hat und von vorne beginnt, so wird auch der gesamte Schalldruckverlauf von vorne wiederholt. Neben dem Grundton haben Klänge **Obertöne** deren Frequenzen jeweils ganzzahlige Vielfache des Grundtons sind. Wegen dieses Zusammenhangs wird die Frequenz des Grundtons gelegentlich auch als **Fundamental** bezeichnet.

Mit Hilfe der Fourier-Analyse läßt sich ein Klang „in seine Einzelteile zerlegen“. Der Klang wird mittels einer Berechnungsvorschrift aufgeschlüsselt und die einzelnen Frequenzen mit ihrer Amplitude im Fourier Frequenz-Spektrum eingetragen.

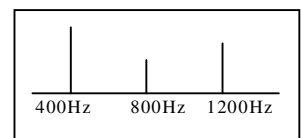


Abbildung 26

Als **Geräusch** werden nicht periodische, ungeordnete Schallwellen bezeichnet, die aus unterschiedlichsten Frequenzen zusammengesetzt sind.

¹⁷ Frequenz mal Wellenlänge ist gleich der Schallgeschwindigkeit und damit (in Luft) konstant.

¹⁸ ...also der tiefste Ton...

9.2 Perzeptuelle Dimensionen

9.2.1 Lautstärke

Die Lautstärke steht im Zusammenhang mit der Amplitude. Erhöht man die Amplitude bei gleichbleibender Frequenz, dann wächst auch die Lautstärke. Allerdings verwendet man nicht die Amplitude, um die Lautstärke in Zahlen zu fassen, da die Spanne von der Wahrnehmungsschwelle bis zur Schmerzschwelle allzu groß ist¹⁹. Man bedient sich der Einheit **Dezibel (dB)**. Sie ist definiert als $20 \cdot_{10} \log(p_A/p_0)$, wobei p_A die Amplitude (gemessen in Pascal, also als Luftdruck); und p_0 ist ein konstanter Wert von $2 \cdot 10^{-5}$ Pascal. Er wurde so gewählt, weil er sich in dem sensitivsten Bereich des Menschen (1000-4000 Hz) nahe an der Hörschwelle befindet.

Tabelle 7

Geräusch	dB
Schwelle, kaum hörbar	0
raschelnde Blätter	20
Starker Verkehr	80
U-Bahn	100
Propellerflugzeug beim Start	120
Schmerzschwelle: Düsenflugzeug beim Start	140
Space-Shuttle	180

Dezibel sind ein physikalisches Maß für den Schalldruck. Wie laut ein Ton empfunden wird, ist damit noch nicht gesagt. Eine große Verstärkung des Schalldrucks verursacht nur eine geringe Erhöhung der Lautstärke. Auch ist die wahrgenommene Lautstärke eines Geräusches von dessen Frequenz abhängig. Zwischen 400 und 3000 Hertz liegt der Sprachbereich, für diese Frequenzen sind Menschen weit sensitiver als für sehr hohe oder sehr niedrige Töne²⁰.

9.2.2 Tonhöhe

Bei reinen Tönen wird die **Tonhöhe** bestimmt durch die Frequenz, bei Klängen (meist) durch die Frequenz des Grundtons. Da stellt sich die Frage, was geschieht, wenn der Grundton entfernt wird und nur die Obertöne übrig bleiben? Das Ergebnis ist verblüffend. Die Klangfarbe wird sich ein wenig verändern, aber die Tonhöhe bleibt so gut wie unverändert. Man nennt dies **den Effekt des fehlenden Grundtons**.

Ein weiteres Phänomen, das psychologisch interessant ist, ist die Oktavengeneralisation. Töne, die einen Oktavenschritt auseinander liegen²¹, haben ähnliche perzeptuelle Effekte wie zwei identische Klänge. Diana Deutsch (1973) hat dies in einem Experiment entdeckt. Einem Zuhörer wurde ein Standardton vorgegeben, worauf sechs weitere Töne (als Distraktoren) und schließlich ein Testton folgten. Die Versuchspersonen sollten angeben, ob Standard- und Testton identisch waren, oder

¹⁹ Die Schmerzschwelle liegt ca. 10mio mal so hoch, wie die Absolutschwelle

²⁰ Dieser Zusammenhang ist in Birbaumer & Schmidt veranschaulicht: Abbildung 20-1

²¹ Ein Oktavenschritt entspricht einer Verdopplung der Frequenz.

nicht. War nun einer der Distraktoren zu dem Testton identisch bzw. Eine Oktave höher/tiefer, wurde die Aufgabe für die Versuchspersonen erheblich schwieriger, obwohl sie angewiesen wurden, diese Töne nicht zu beachten.

9.2.3 Klangfarbe (Timbre)

Mit Klangfarbe ist gemeint, worin der Klang verschiedener Instrumente sich unterscheidet, obwohl Tonhöhe und Lautstärke identisch sind. Sie wird zum einen dadurch bestimmt, wie die Obertöne/Harmonien in ihrer Amplitude im Fourier-Spektrum verteilt sind. Der zweite Faktor für die Klangfarbe ist der Auf- und Abbau der einzelnen Obertöne. Hohe Töne bauen sich langsamer zur vollen Amplitude auf und schneller wieder ab. Wenn Anfang und Ende eines Klangs abgeschnitten werden, so verändert sich die Klangfarbe sehr stark.

9.2.4 Konsonanz und Dissonanz

Wenn mehrere Instrumente zusammen spielen oder Akkorde an einem Klavier angeschlagen werden, dann werden viele Klänge gleichzeitig hörbar. Wenn wir dem zuhören, so unterscheiden wird, ob die Kombination der Klänge angenehm und harmonisch (**konsonant**) ist, oder sie uns störend (**dissonant**) erscheint.

Um das zu erläutern muß ich ein wenig ausholen, und erst erklären, was der Begriff **kritische Bandbreite** bedeutet. Schall ist eine Welle. Und wenn zwei Wellen aufeinander treffen, so werden sie sich unvermeidbar gegenseitig beeinflussen. Je nachdem werden sie einander verstärken oder abschwächen²². Die kritische Bandbreite ist nun diejenige Differenz in der Frequenz, ab der zwei Töne einander verstärken: die Lautstärke nimmt zu. Mit der Höhe der beiden Töne, steigt auch die kritische Bandbreite.

In diesem Zusammenhang hat sich herausgestellt, daß Töne in hohem Maße dissonant empfunden werden, wenn deren Frequenzunterschied unterhalb der kritischen Bandbreite liegen.

Bei der Kombination von Klängen sind diejenigen am ehesten konsonant, die durch eine Oktave getrennt sind (danach folgt die Quint). Alle Obertöne des höheren Klages sind mit denen des tieferen identisch. Sind jedoch Obertöne vorhanden, die gegenseitig innerhalb der kritischen Bandbreite liegen, steigt die Dissonanz mit der Anzahl solcher Obertöne.

Diese physikalische Erklärung ist nur die halbe Wahrheit. Konsonanz und Dissonanz hängt auch davon ab, in welchen melodischen Kontext die Klänge eingebettet sind, und ist zudem extrem kulturabhängig. Indische oder arabische Folklore klingt in unseren Ohren nur allzu seltsam, die Inder und Araber sehen das aber bestimmt anders.

²² Man bezeichnet diesen Vorgang als Interferenz.

9.2.5 Wahrnehmungsorganisation

Gerade so, wie visuelle Reize (nach Gestaltprinzipien) organisiert werden, so daß bestimmte Elemente als zusammengehörig erscheinen, gerade so gibt es das auch bei Tönen.

Ähnlichkeit

Ähnlichkeit in der Tonhöhe veranlaßt uns dazu solche Töne zu gruppieren. Musiker nutzen das häufig aus für einen Effekt, den Goldstein als **auditory stream segregation** bezeichnet. Ein Instrument spielt einen Ton einer ersten Melodie, dann einen Ton einer zweiten, usw. Geschieht das in sehr schnellem Wechsel (siehe auch unten: Nähe), und sind die Melodien in ihrer Tonhöhe weit genug voneinander entfernt, so sind wir in der Lage beide Melodien voneinander zu trennen.

Ein anderer Effekt, der diese Gruppierung ausnützt, wird **scale illusion** genannt. Auch hier werden zwei Melodien dargeboten, die Töne jeweils gleichzeitig einer auf dem linken, der andere auf dem rechten Ohr. Dabei wird jede Melodie nicht durchgehend auf demselben Ohr gespielt, sondern nach jedem Ton „werden die Ohren vertauscht“. Das einzelne Ohr bekommt auf diese Weise eine wild hüpfende Tonfolge vorgespielt, trotzdem erlebt man sanfte Melodien. Das Vertauschen von rechts und links wird vom Wahrnehmungsapparat rückgängig gemacht.

Nähe

Wie schon oben angesprochen, ist zeitliche Nähe ein wichtiges Kriterium für Gruppierungen. Das Phänomen der auditory stream segregation ist bei langsamen Melodien unmöglich.

Gute Fortsetzung

Fügt man zwischen Tönen Pausen ein, so erlebt man einzelne getrennte Melodie-Blöcke. Füllt man die Stille dagegen mit Rauschen, so bildet sich der Eindruck, als ob weiter Töne gespielt würden.

Melodie-Schema

Es ist möglich eine Melodie herauszuhören, die in einem unförmigen Tongewirr versteckt ist, wenn man weiß, daß diese Melodie vorhanden ist. Der Effekt steht im Zusammenhang mit Erwartungseffekten.

9.2.6 Lokalisation

Die Möglichkeit aus *zwei* Augen Informationen über die Umwelt zu erhalten, hat sich bei der visuellen Wahrnehmung als sehr bedeutsam herausgestellt. Genauso ist es in der Akustik.

Monaurales Hören²³ macht es sehr schwierig, eine Schallquelle zu orten. Die wichtigsten Informationen sind die **interaurale Zeit- und Intensitätsdifferenz**.

Da eine Schallwelle zu einem Ohr (meist) einen längeren Weg hat als zu dem anderen, wird es dort auch früher eintreffen. Diese Zeitdifferenz kann zwischen 0 und 600µs betragen. Die Intensitätsdifferenz kommt zustande, da sich das dem Reiz abgewandte Ohr „im Schatten“ befindet. Der Kopf des Hörers wirkt wie eine Schallschutzmauer. Das Ausmaß dieser Differenz hängt auch von der Frequenz ab, da hohe Töne durch den Schädel leichter zurückgeworfen werden. Je höher also die Frequenz, desto größer die interaurale Intensitätsdifferenz.

9.3 Physiologie

9.3.1 Struktur

Außenohr

Das **Außenohr** besteht aus der **Muschel** und dem röhrenförmigen **Hörkanal**, der ca. Drei Zentimeter lang ist. Es hat erstens die Aufgabe das empfindliche Trommelfell zu schützen. Zweitens werden Töne nahe einer Frequenz von 3400 Hertz verstärkt²⁴, durch einen physikalischen Zusammenhang, der sich **Resonanz** nennt.

Mittelohr

Wenn die Schallwelle das **Trommelfell** (oder **membrana tympani**) erreicht, versetzt sie dieses in Schwingung, und diese Schwingung wird auf das **Mittelohr** übertragen. Das Mittelohr ist ein kleiner Hohlraum (2 cm³), das durch **Trommelfell** und **Cochlea** begrenzt ist. Darin befinden sich die **Gehörknöchelchen**, die die Schallwellen auf das **ovale Fenster** (s.u.) der Cochlea übertragen. Der **Hammer (malleus)** ist an der Membrana tympani angebracht. Er ist auf der anderen Seite mit dem **Amboß (Incus)** in Kontakt, der die Schwingungen seinerseits an den **Steigbügel (Stapes)** weitergibt und sie schließlich auf das ovale Fenster überträgt.

Diese Konstruktion hat die Aufgabe den Schalldruck zu verstärken. Die Konstruktion der drei Gehörknochen verstärkt den Druck über die Hebelwirkung um den Faktor 1,3. Die Übertragung vom Trommelfell auf das *viel kleinere* ovale Fenster verursacht Drucksteigerungen um den Faktor 17. 17 mal 1,3 ergibt eine Drucksteigerung um das 22-fache.

²³ Hören auf nur einem Ohr.

²⁴ Das menschliche Ohr ist zwischen 1000 und 4000 Hz am sensitivsten, was auch auf die günstige Resonanzfrequenz von 3400 Hz zurückführbar ist.

Innenohr

Die wichtigste Struktur des Innenohrs ist das Hörorgan, das wegen seiner Form auch **Schnecke** oder **Cochlea** genannt wird. Deren Windungen sind in drei „Etagen“ - Skalen eingeteilt. Sie heißen **Scala vestibuli**, **Scala media** und **Scala tympani**. An der innersten Windung, der Spitze der Schnecke (**Helicotrema**), sind die äußeren Skalen (scala vestibuli und scala tympani) miteinander verbunden.

Der Boden der mittleren Scala media ist die **Basilarmembran**, auf der der eigentliche sensorische Apparat angebracht ist, das **Corti Organ**. Es enthält Hörsensoren, die winzige haarförmige Fortsätze (**Stereocilien**) besitzen, weshalb man sie als **Haarzellen** bezeichnet. Über den **Haarzellen** befindet sich eine gallertartige Masse, die **Tektorialmembran**, die festen Kontakt zu den Stereocilien hat. Es gibt zwei Typen von Haarzellen, innere und äußere; von den äußeren gibt es etwa dreimal so viele, dennoch erhalten 95% der Hörnerven ihre Signale von den inneren Sinneszellen.

Die Schallübertragung auf das Corti-Organ ist recht raffiniert, aber daher auch umständlich zu beschreiben. Die Fußplatte des Steigbügels sitzt auf dem ovalen Fenster der Scala vestibuli auf. Sie überträgt die Schallwellen auf die Flüssigkeit dort. Da Flüssigkeit sich nicht zusammendrücken läßt, muß sie verdrängt werden. Das geschieht über das **runde Fenster** der Scala tympani, das mit einer elastischen Haut versehen ist. Drückt/Zieht der Steigbügel am ovalen Fenster, so wird das runde Fenster ausgebeult/ingesogen.

Die vom ovalen Fenster ausgehenden Druckwellen wandern allerdings nicht nur über das Helicotrema zum runden Fenster, sondern sie versetzen gleichzeitig die Scala media in Schwingung. Diese Schwingungen werden von den Haarzellen registriert. Sie setzen Transmitter frei und verursachen ein Signal im Hörnerv.

Zentrale Strukturen

Der Weg der Hörnerven zum **primären auditorischen Kortex** auf dem **Temporallappen** ist sehr komplex und nur das allerwichtigste sei hier erwähnt. Die Nervenfasern kommen aus der Schnecke und innervieren zuerst den Nucleus cochlearis. Von dort geht es weiter zum Olivenkomplex und dann in die Colliculi inferiori des Mittelhirns. Die nächste Station ist der **mediale Kniehöcker** des Thalamus und schließlich erreichen die Bahnen den auditorischen Kortex.

9.3.2 Neurale Kodierung der Tonhöhe

Theorien der räumlichen Kodierung

Räumliche Kodierung bedeutet, daß Rezeptoren auf unterschiedliche Frequenzen reagieren, weil sie sich an verschiedenen Stellen des Corti-Organs befinden.

HELMHOLTZ Resonanztheorie. Die Basilarmembran besteht aus vielen locker verknüpften Verbindungsfasern. Ist nun die Resonanzfrequenz dieser Fasern jeweils unterschiedlich, werden die Rezeptoren an der jeweiligen Stelle die Resonanzfrequenz am besten kodieren. Rezeptoren auf kurzen Fasern reagieren auf hohe Frequenzen (und umgekehrt). Diese Theorie wurde allerdings verworfen, da die Fasern so eng miteinander verbunden sind, daß sie nicht unabhängig voneinander schwingen können.

*BÉKÉSY's Wanderwelle*²⁵. BÉKÉSY beobachtete, daß die Druckwellen auf das auf das ovale Fenster eine Wanderwelle auf der Basilarmembran auslösten. Diese Wanderwelle hat nicht überall dieselbe Amplitude, sondern es ergibt sich an einer Stelle ein Maximum. An dieser Stelle werden die Cilien der Rezeptoren stärker ausgelenkt und da die Position dieses Maximums von der Frequenz des Tones abhängt, läßt sich so die Frequenz kodieren. Das hieße, daß niedrige Frequenzen ihr Maximum nahe dem Helicotrema haben, die hohen dagegen direkt am Steigbügel.

Diese Theorie hat einigen experimentellen Rückhalt. So wurden Elektroden auf der Cochlea angebracht und die Reaktion auf verschiedene Frequenzen gemessen. Man erhält eine **tonotopische Karte** von den Frequenzen und den Orten, die ihnen auf der Schnecke zugeordnet sind.

Solche Karten wurden auch von höheren Strukturen angefertigt. Das Ergebnis war, daß Neurone derselben **charakteristischen Frequenz**²⁶ in Gruppen angeordnet sind und Gruppen ähnlicher Frequenz nebeneinander liegen.

Ein wenig sadistisch war eine Untersuchung, in der Taubheit durch überlaute Erregung des Corti-Organs hervorgerufen wurden. Je höher die schädlichen Töne gewählt wurden, desto näher lagen die zerstörten Bereiche am ovalen Fenster.

Theorien der zeitlichen Kodierung

Die Idee ist, daß die Frequenz der Schallwellen mit Hilfe der Feuerungsrate der Neuronen übersetzt wird.

RUTHERFORD's Frequenztheorie. RUTHERFORD ging davon aus, daß die Basilarmembran als Ganzes schwingt; die Frequenz der Membran wird in die wahrgenommene Tonhöhe umgesetzt. Aufgrund der Refraktärzeit in der neuronalen Nervenleitung wäre es hiermit unmöglich, Frequenzen über 1000 Hz zu kodieren.

WEVER's Volley-Prinzip. RUTHERFORD's Problem der Refraktärzeit läßt sich lösen, indem man annimmt, nicht die Feuerungsrate einer einzelnen Nervenzelle kodiert die Frequenz, sonder Rate

²⁵ Prinzip: Zwei Freunde halten jeweils das Ende eines Seils. Der eine verursacht eine Auslenkung und schickt sie zu seinem Kameraden.

²⁶ Die Frequenz, für die das Neuron die niedrigste Schwelle hat.

einer ganzen Gruppe von Neuronen. Während der Refraktärzeit des einen Neurons feuerte nun ein anderes, wodurch sich jede beliebige Frequenz kodieren ließe.

Diese Theorie erhielt einige Bestätigung, vor allem durch Beobachtung eines Phänomens, das sich Phasensynchronisation nennt. Neuronen feuern zwar unregelmäßig, wenn sie aber feuern dann nur, wenn die Schallwelle ihre maximale Amplitude erreicht hat (Goldstein '96 Abb. 8.30).

Wenn also eine Gruppe synchron feuender Fasern von einem Ton erregt wird, so feuert diese Gruppe 'ausbruchartig', gefolgt von einer Ruhepause worauf wieder ein Ausbruch folgt. Die Anzahl der 'Ausbrüche' pro Sekunde entspricht der Frequenz des Tones.

Allerdings hat man festgestellt, daß nur Frequenzen unter 1000 Hz auf diese Art kodiert werden, es wurden bei höheren Frequenzen in höheren Strukturen kaum Neuronen entdeckt, die sich synchronisieren.

Fazit

Frequenzen werden über örtliche und zeitliche Merkmale kodiert. Im Bereich 500 bis 1000 Hz gelten vor allem WEVER's Ideen, die räumliche Kodierung dominiert über 4500 Hz. In den übrigen Bereichen ergänzen sich die beiden Mechanismen.

Nur zwei Dinge bleiben ungeklärt: Zum ersten läßt sich damit nicht erklären, wieso Klänge bei fehlendem Grundton ihre subjektive Tonhöhe erhalten bleibt, denn das Schwingungsmuster auf der Basilarmembran ist hier ganz verschieden. Zum anderen schwindet die zeitliche Kodierung mit Erhöhung der Lautstärke des Tons. Trotzdem können wir die Tonhöhe korrekt wahrnehmen.

9.3.3 Physiologie der Lokationswahrnehmung

Im Kortex gibt es Neuronen, die auf binaurale Reize reagieren (sie sind vergleichbar mit den binokularen Neuronen); einige von ihnen sind auf interaurale Zeitdifferenzen spezialisiert, andere auf Intensitätsunterschiede.

Desweiteren existieren Neuronen, die rezeptive Felder im Raum repräsentieren. Sie sind sehr wahrscheinlich in den colliculi superiore zu suchen²⁷. Diese Zellen reagieren nur, wenn ein Geräusch aus einer bestimmten Richtung kommt (relativ zur Stellung des Kopfes). Außerdem weisen sie An-Aus-Antagonismen auf, wodurch es möglich ist, eine Repräsentation des akustischen Raumes auszubilden.

Im Unterschied zur visuellen Wahrnehmung sind für die Ausbildung akustischer rezeptiver Felder beide Sinnesorgane von Nöten. Wird ein Ohr verschlossen, dann verschwinden sie. Und verschließt

²⁷ Diese Nervenzellen wurden bei Eulen in einer Struktur entdeckt, die in etwa den Colliculi inferiore bei Säugern entspricht.

man es ein wenig dann verschieben sich die rezeptiven Felder, um das selbe Feld zu erregen, muß eine Schallquelle erst an einen anderen Ort bewegt werden.

9.3.4 Der auditorische Kortex

Tonhöhe. Da der Kortex als topographische Karte für Frequenzen organisiert ist, scheint es naheliegend, daß er für die Wahrnehmung der Tonhöhe von Bedeutung ist. Dennoch, Katzen waren in der Lage eine Aufgabe wieder zu erlernen, die es erforderte Tonhöhen zu unterscheiden, auch wenn ihnen nach dem ersten Lerndurchgang der auditorische Kortex entfernt wurde. Es ist daher anzunehmen, daß andere Strukturen diese Aufgabe übernehmen.

Lokalisation. Um diese Frage zu klären ist noch etwas Forschung von Nöten. Katzen waren nach Entfernung des auditorischen Kortex nicht mehr in der Lage eine Schallquelle zu orten. Affen konnten aber *mindestens* noch zwischen Beschallung von rechts oder links unterscheiden.

Mustererkennung. Daß der auditorische Kortex hier eine Rolle spielt scheint erwiesen. Ohne ihn ist es unmöglich verschiedene Tonfolgen zu unterscheiden.

Komplexere Stimuli. Wie im visuellen Kortex gibt es auch hier Zellen, die auf komplexere Reizeigenschaften reagieren.. Zum Beispiel reagieren manche Neuronen zwar auf Geräusche, nicht aber auf Klänge oder Töne. Manche reagieren auf langsame Veränderungen in der Tonhöhe, andere auf schnelle.

Je komplexer der Stimulus, desto stärker ist der auditorische Kortex in die Verarbeitung mit eingebunden. Er spielt daher zweifellos eine große Rolle in der Sprachwahrnehmung.

10 Die Hautsinne

Die Tatsache, daß die Haut das schwerste Organ²⁸ ist, macht wohl weniger ihre Bedeutung aus, als die vielen Funktionen, die sie erfüllt. Sie schützt vor Bakterien und Schmutz, sie hält Körperflüssigkeiten zurück und läßt den Schweiß heraus, und sie informiert uns über verschiedenartige Reize. Wir empfinden *Wärme*, *Schmerz* oder *Berührung*.

10.1 Die Haut und die Rezeptoren

Die äußerste Hautschicht ist die **Epidermis**. Sie besteht selbst wieder aus Schichten, wobei die äußerste aus toten Zellen besteht. Unter der Epidermis liegt eine Schicht genannt **Corium** und darunter die **Subcutis**.

Es gibt in der Haut eine Reihe verschiedener Rezeptoren, die sich darin unterscheiden, in welcher Schicht sie sich befinden, ob sie in behaarter oder unbehaarter Haut vorkommen; aber vor allem auf welche Art von Reiz sie ansprechen. Die Nervenfasern der Rezeptoren ziehen über die Dorsalwurzel ins Rückenmark. Darauf ins Gehirn, den medialen Thalamus und dann zu den primären somatosensorischen Empfangsarealen im Parietallappen des Kortex.

10.2 Rezeptortypen

10.2.1 Struktur der Rezeptortypen

Die Endorgane in der Haut sind jeweils so konstruiert, daß (nur) ganz bestimmte Reizeigenschaften eine Reaktion in der Nervenfasern auslösen. Das Pacini-Körperchen wurde wegen seiner Größe (1 mm lang) intensiv untersucht. W. LOWENSTEIN & R. SKALAK fanden heraus, daß im Pacini-Körper die Druckreize so modifiziert werden, daß nur noch *Druckschwankungen* zur Nervenfasern vordringen und diese erregen können.

10.2.2 Mechanorezeptoren

Mechanorezeptoren reagieren auf Druckreize. Abhängig davon, wie schnell der Druckreiz sich verändert, gibt es spezialisierte Untertypen.

Drucksensoren (Intensitäts-)

Sie messen die Stärke/Eindrucktiefe eines mechanischen Reizes. Da sie sehr langsam adaptieren geben sie auch Auskunft über die Dauer eines Reizes. In der unbehaarten Haut findet man die sog. **Merkelzellen**, die sich in der Epidermis befinden. Die entsprechenden Sensoren in der behaarten

²⁸ Die Haut ist nicht das größte Organ! Die Alveolen der Lunge oder der Magen-Darm-Trakt sind da größer.

Haut heißen **Tastscheiben** und liegen im Corium. Ein dritter Rezeptortyp für Intensität - das **Ruffini-Körperchen** - ist in behaarter, sowie unbehaarter Haut vorhanden und liegt im Corium.

Berührungssensoren (Geschwindigkeits-)

Dazu gehören die **Haarfollikel-Rezeptoren**, die in der behaarten Haut hauptsächlich auf Bewegung der Haare reagieren, und die **Meissner-Körper** (unbehaarte Haut). Diese Sensoren adaptieren mittelschnell und senden nur in dem Augenblick, in dem der Druck auf die Haut sich verändert.

Vibrationssensoren (Beschleunigungs-)

Hierfür gibt es nur einen Rezeptortyp, das **Pacini-Körperchen**. Es adaptiert schnell und reagiert daher nur auf Reize, die sich ständig verändern, wie z.B. Vibration.

10.2.3 Thermorezeptoren

Thermosensoren reagieren nur auf Temperatur und vor allem deren Schwankungen. Man muß zwei Typen unterscheiden, **Warm- und Kältsensoren**. Die Wärmesensoren arbeiten im Bereich von 30-48°C (Optimum 44°C). Bei steigender Temperatur erhöhen sie ihre Impulsrate. Die Kältesensoren haben einen Arbeitsbereich zwischen 20-40°C (Optimum 30°C). Bei sinkender Temperatur erhöht sich die Impulsrate.

10.2.4 Schmerzsensoren

Nociceptoren reagieren auf viele verschiedene Reizarten, wenn diese nur heftig genug sind, den Menschen zu verletzen (intensiver Druck, Hitze, ätzende Chemikalien). Es hängt allerdings nicht allein von den Nociceptoren ab, ob wir Schmerz empfinden, kognitive und emotionale Faktoren spielen hier eine ebenso große Rolle.

10.2.5 Rezeptortyp und Wahrnehmung

Nun wissen wir, welche Nervenfasern optimal auf welchen Stimulus reagieren, aber ob dadurch auch die jeweils entsprechende Wahrnehmung hervorgerufen wird, ist nicht klar. Erleben wir Wärme, wenn Wärmesensoren aktiv sind und Berührung, wenn Meissner-Körper aktiv sind?

MAX VON FREY glaubte 'ja'. Er kartographierte **sensorische Punkte** auf der Haut, indem er untersuchte, welche Wahrnehmungen sich dort hervorrufen ließen. Es ließ sich nicht an jeder Stelle jede Wahrnehmung erzeugen, einige Stellen reagierten beispielsweise auf Kälte, andere auf Wärme und sonstige Stellen sogar auf keines von beiden. VON FREY schloß daraus, daß sich an diesen Punkten die entsprechenden Sensoren befinden müssen.

Neuere Untersuchungen widersprechen dem. In der Cornea sind kann Empfinden von Wärme hervorgerufen werden, von Kälte und auch Berührung, obwohl sich dort nur freie Nervenendigungen (eigentlich Nociception) befinden. Spezifität reicht nicht aus, um das zu erklären.

Die einzelnen Rezeptortypen kodieren zwar spezifische Reizeigenschaften, aber nur wenige Stimuli besitzen genau eine dieser Eigenschaften und sprechen damit mehrere Rezeptortypen gleichzeitig an. Ein Fingerdruck auf Haut aktiviert Haarfollikel-Sensoren, Tastscheiben und Pacini-Körper (wenn auch nur kurzzeitig), sowie Wärmesensoren. Die Wahrnehmung wird daher von einem Muster neuronaler Aktivität hervorgerufen, niemals durch Aktivität eines einzelnen Fasertyps.

Zusammenfassend könnte man durchaus sagen, daß Spezifitäts- und Neuronen-Muster-Theorie hier gleichermaßen Berechtigung haben.

10.3 Neuronale Verarbeitung

10.3.1 Rezeptive Felder

Auf der Haut gibt es ebenfalls rezeptive Felder, mit Exzitation im Zentrum und Hemmung in der Umgebung (bzw. Umgekehrt). Auch auf dem Kortex findet man diese Felder, wobei deren Spezialisierung dort bereits höher ist. Sie reagieren nur auf bestimmte Orientierung oder eine Bewegungsrichtung. Die Schaltpläne, die dies ermöglichen entsprechen denen im visuellen System.

Ein besonderer Typ kortikaler Zellen (zu denen es in der Sehrinde keine Entsprechung gibt) reagiert genau dann, wenn die Hand nach einem dreidimensionalen Objekt greift. Einige Zelle bevorzugen runde Objekte, andere eher eckige Dinge.

10.3.2 Genauigkeit der Wahrnehmung

Nicht an jeder Stelle auf der Haut ist der Mensch gleichmaßen sensitiv. Mit den Fingerspitzen ist es möglich Ellenbogen Blindenschrift zu lesen, aber kein Mensch könnte es mit dem Ellenbogen lernen. Das Auflösungsvermögen ist am Ellenbogen zu gering, die Spitze des Zeigefingers ist dagegen die sensitivste Stelle am Körper.

Um die Sensitivität in Zahlen faßbar zu machen ermittelt man die **Zwei-Punkt-Schwelle**. Damit ist die geringste Distanz zweier Reize beschrieben, die es erlaubt tatsächlich noch *zwei* Reize wahrzunehmen.

VALLBO & JOHANNSON fanden heraus, daß die Größe der rezeptiven Felder mit der Zwei-Punkt-Schwelle zusammenhängt. Je kleiner die rezeptiven Felder an einer Stelle auf der Haut sind, desto sensitiver empfindet man dort; desto dichter sind die Rezeptoren dort verteilt.

Je höher die Sensitivität ist, desto größer ist auch die Oberfläche des Kortex, der für das entsprechende Körperteil reserviert ist. Die tatsächliche Größe des Körperteils spielt dabei kaum eine Rolle, viel wichtiger ist die Dichte der Rezeptoren dort. Daß die Lippen daher mehr Fläche auf dem

Kortex 'belegen' als der gesamte Oberschenkel, nennt man **Überrepräsentation**. Wenn man ein Männchen zeichnet, dessen Körperteile jeweils so groß sind, wie die Repräsentationen des sensorischen Kortex, so erhält man ein seltsames Männlein, das **Homunculus** (kleiner Mann) genannt wird. Um die Umrisse des Homunculus zu ermitteln haben PERFIELD & RASMUSSEN (1950) Tumorpatienten unter Lokalanästhesie den Schädel geöffnet²⁹. Sie verabreichten an der Hirnoberfläche leichte elektrische Reize und die Patienten meldeten, wo es sie kribbelt. So konnte eine komplette Karte erstellt werden.

10.4 Zentrale Einflüsse

Es wurde bereits erwähnt (siehe Schmerzsensoren), daß Schmerzen nicht allein von der Stimulation der Nociceptoren abhängen. Die Situation oder spezifische Erfahrungen (evtl. kultureller Art) spielen eine ebenso große Rolle, die Idee der Top-Down-Prozesse hat auch hier ihre Berechtigung. Das Gehirn sendet Signale an die Haut (oder lediglich ins Rückenmark? Siehe unten).

Ein sehr eindrucksvolles Beispiel für den Einfluß kultureller Erfahrungen ist eine religiöse Zeremonie aus Indien. Einem jungen Mann werden Stahlhaken am Rücken durch Haut und Fleisch getrieben. An diesem Haken wird er nun aufgehängt und schwingt frei über dem Boden. Er scheint dabei allerdings keinerlei Schmerzen zu empfinden, und wenn die Zeremonie vorbei ist, heilen die Wunden unglaublich schnell aus. Nach zwei Wochen sind kaum noch Narben zu erkennen.

10.4.1 Gate-Control-Theorie

Die Kontrollschrankentheorie von MELZAK & WALL (1985) beschreibt einen neuronalen Schaltkreis (Abbildung 27) über den das Gehirn die Schmerzwahrnehmung beeinflussen kann.

Die Zelle T in Abbildung 27 heißt Transmissionszelle. Wenn sie aktiv ist, dann bedeutet das Schmerz. Sie erhält Signale aus zwei Nevenstränge, dem S-Strang (Small-diameter) und dem L-Strang (Long-diameter). Schließlich das wichtigste Neuron SG³⁰, das die eigentliche Schranke ausmacht.

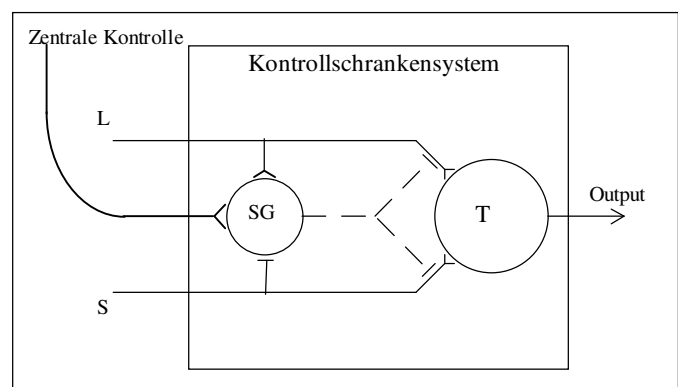


Abbildung 27

²⁹ Es ist sehr schwer einen Tumor aus dem Gehirn zu entfernen, ohne gesundes Gewebe zu zerstören, daß womöglich zum sensorischen Kortex gehört. Um deraartige Komplikationen zu vermeiden müssen vorher motorische und sensorische Areale kartographiert werden.

³⁰ SG deshalb, da sich diese Neuronen in der Substantia gelatinosa des Rückenmarks befinden.

Wenn über den L-Strang Aktivität und die Zelle T übermittelt werden soll, wird die Schranke aktiv und verhindert eine Aktivierung von T. Ganz anders wirkt der S-Strang, der die Schranke öffnet, so daß Signale ungehindert die Zelle T erreichen und damit die Schmerzwahrnehmung ausgelöst wird.

Darüber hinaus wird das Neuron SG direkt aus dem Gehirn angesteuert. So kann die Schmerzwahrnehmung durch Aktivität aus dem Gehirn verhindert oder zumindest gehemmt werden.

Stimulations-Produzierte-Analgesie (SPA). Wenn das Gehirn Schmerzen verhindern kann, dann müßte es möglich sein, einen Bereich im Gehirn elektrisch zu stimulieren und so Schmerzwahrnehmung zu verhindern? So dachte auch REYNOLDS (1969) und führte an Ratten Operationen durch, ohne schmerzlindernde Medikamente zu verwenden. Er stimulierte die Ratten statt dessen im Mittelhirn und tatsächlich zeigten die Ratten keinerlei Anzeichen von Schmerz.

10.4.2 Endorphine

Endorphine sind körpereigene morphin-ähnliche Substanzen. Diese Endorphine sind in denselben Nervenzellen zu finden, in denen das Schmerzmittel Morphin wirkt, woraus man schließt, daß Endorphine selbst schmerzhemmende Auswirkungen haben. Einige Befunde belegen diese Hypothese.

SPA hat den größten Effekt, wenn Hirnregionen stimuliert werden, die Endorphine enthalten. Sie läßt sich mit Hilfe von Naloxon dagegen verhindern. Naloxon ist ein Opiatantagonist, der auch die Wirkung von Endorphinen unterbindet.

10.5 Die Rolle aktiver Wahrnehmung

Im Alltag ist es unüblich, daß Reize einfach geschehen. Wir suchen sie, wir untersuchen beispielsweise einen Gegenstand auf seine Beschaffenheit, auf Kanten, Formen, auf Gewicht und Verformbarkeit. Das ist es, was mit **aktiver Berührung** gemeint ist. Sie hat zum Ziel, einen Gegenstand zu erkennen.

In einem Experiment von GIBSON haben Versuchspersonen bei aktiver Berührung Gegenstände mit 95%iger Sicherheit erkannt. Wurde ihnen der Gegenstand in die Hand gedrückt, konnten nur 49% ihn erkennen.

Schwarz et al. relativierten das allerdings ein wenig, indem sie eine weitere Bedingung einführten. Der Versuchsleiter bewegte dabei den Gegenstand über die passiven Finger der Versuchsperson. Nun konnten auch 93% erkennen, worum es sich handelt, was bedeutet, daß auch bei passiver Berührung alle notwendigen Informationen zu einem Gegenstand ermittelt werden können.

Braille (Blindenschrift). 1824 entwickelte Louis Braille, selbst ein Blinder, die Blindenschrift. Bis zu diesem Zeitpunkt war es Blinden praktisch unmöglich, vernünftig zu lesen.

Die Buchstaben der Blindenschrift (**Charaktere**) bestehen aus Mustern von sechs Punkten, die in einem Rechteck angeordnet sind. Bestimmte Punkte werden hervorgehoben, woraus sich einzelne Buchstaben ergeben. Auf diese Weise kommt ein geübter Leser auf 100 Wörter pro Minute. Sie sind damit schlechter, als wenn sie sehen könnten (250-300 Wörter pro Minute), was zum einen daran liegt, daß sich die Augen flinker bewegen als die Finger; zum anderen ist man mit den Augen in der Lage, ein Wort als Ganzes zu erfassen. Wird man gezwungen Buchstabe für Buchstabe zu lesen (wie ein Blinder), dann reduziert sich die Lesegeschwindigkeit enorm auf 65-75 Wörter pro Minute.

11 Geruch

Über die Atemluft gelangen ständig allerlei gasförmige Substanzen in die Nase. Viele dieser Stoffe riechen, sie stimulieren die **Chemosensoren**, die sich in der Nase befinden. Das ist fürs Essen sehr wichtig. Wer hat bei ständig verschnupfter Nase nicht schon einmal den Appetit verloren, weil ihm alles gleich schmeckte? Bei der Nahrungsaufnahme gelangen die Duftstoffe *retronasal* in die Nase, über eine Verbindung vom Rachen in die Nasenhöhle.

Der Mensch hat einen nicht besonders feinen Geruchssinn, zumindest wenn man ihn mit anderen Säugetieren vergleicht. Dennoch ver(sch)wenden viele Menschen viel Geld für ihre 'olfaktorische Umgebung' und kaufen Parfüm, teure Seifen oder ätherische Essenzen um sich selbst oder ihr Wohnzimmer geruchlich aufzufrischen.

Gerüche sind uns die meiste Zeit nicht bewußt, aber sie wirken ständig auf uns ein und beeinflussen uns auch in unserem Gefühlsleben.

11.1 *Mythen über den Geruchssinn*

I. *Die menschlichen Geruchsrezeptoren sind weniger sensitiv als die anderer Tiere.*

Der Mensch wird häufig als Mikrosmatiker bezeichnet, da er wirklich schlechter riecht als andere Säuger. Dafür ist aber nicht die Sensitivität der Rezeptoren verantwortlich. Viel wichtiger für eine empfindliche Nase ist die Fläche der Riechschleimhaut und die Dichte der Rezeptoren, die sich dort befinden. Der einzelne Rezeptor wird bereits durch ein einzelnes Molekül erregt. Sensitiver können auch die Rezeptoren eines Hundes nicht sein, obwohl Hunde bis zu 10000 mal so gut riechen können.

II. *Die menschliche Fähigkeit, Unterschiede in Geruchsintensitäten zu entdecken, ist gering.*

In früheren Versuchen zu den Differenzschwellen wurde schlecht experimentiert. Die technischen Geräte für solche Experimente waren noch nicht so gut entwickelt und mit den verwendeten Wattebäuschchen ergab sich so manche ungewollte Intensitätsschwankung.

CAIN (1977) verwendete ein Olfaktometer, mit dem sich Geruchskonzentrationen recht genau bestimmen lassen. Daimt ermittelte er erstaunlich niedrige Schwellen von 5-11%.

III. *Die menschliche Fähigkeit, Gerüche zu identifizieren ist schwach.*

Nach CAINS Auffassung ist auch das falsch. Ältere Experimente setzten voraus, daß Gerüche mit Namen genannt werden. Bei der Suche nach Namen im Gedächtnis treten laut CAIN die Fehler auf. In einem seiner Experimente sollten Versuchspersonen Düfte erkennen, deren Namen sie in einem vorhergehenden Durchgang bereits gefunden hatten. Die Fehlerquote sank dadurch erheblich.

IV. *Tiere könne Gerüche zur Kommunikation nutzen, Menschen nicht.*

Menschen können nicht direkt mit der Nase kommunizieren, dennoch sind wir in der Lage über Gerüche Informationen über Andere zu erhalten.

Versuchspersonen konnten aus vielen getragenen Unterhemden ihr eigenes zu 75% herausfinden.

Wenn Frauen zusammen leben und arbeiten, so stimmen sich deren Perioden (näherungsweise) aufeinander ab. MCCLINTOCK (1971) bestätigte diese menstruale Synchronizität in einem Studentenwohnheim. Selbst bei Frauen, die sich nie gesehen haben, läßt sich das beobachten, wenn sie langfristig mit dem Schweiß der Anderen in Kontakt kommen.

11.2 Pheromone

Pheromone sind Duftstoffe. Wenn ein Tier diese Stoffe absondert, dann lösen sie bei Tieren ihrer Spezies Reaktionen aus.

Es gibt zwei Gruppen von Pheromonen: **Primer** und **Releaser**. Primer lösen eine langwierige Kette physiologischer Reaktionen aus, die zumeist hormoneller Art sind. Eine weibliche Maus wurde nach der Paarung nicht schwanger, wenn man sie die folgenden 24 Stunden dem Geruch einer anderen männlichen Ratte aussetzte.

Releaser lösen unmittelbare Reaktionen aus. Sie spielen eine Rolle in der Sexualität und der Aggression (z.B. bei Bienen).

11.3 Struktur des olfaktorischen Systems

Die Rezeptoren in der Riechschleimhaut haben kleine Härchen (**Cilien**). Über die Cilien werden die Rezeptoren aktiviert und leiten die Signale direkt weiter an den **Bulbus olfactoris (Riechkolben)**. Hier besteht ein Unterschied zu anderen Sinnesorganen. Dort werden Reize von primären Sinneszellen (den Rezeptoren) aufgenommen, und von sekundären Sinneszellen weitergeleitet.

Im Riechkolben werden die Signale aus der Nase zum ersten mal verarbeitet. Es findet eine erste Analyse des Geruches statt, möglicherweise wird er schon ganz entschlüsselt. Die eigentliche Riechempfindung wird allerdings erst in höheren Arealen ausgelöst.

Vom Riechkolben aus ziehen Innervationen einerseits zum Thalamus, andererseits zum limbischen System³¹. Im olfaktorischen Kortex im Okzipitallappen und dem orbitofrontalen Kortex (nahe der Augen) treffen sich die beiden Bahnen wieder.

³¹ Die Bahnen zum limb. System könnten für die emotionale Wirkung von Gerüchen verantwortlich sein.

11.4 Klassifikation von Geruchsqualitäten

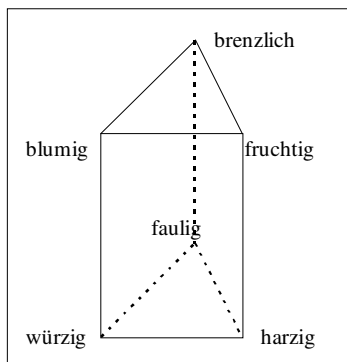


Abbildung 28

Es gibt eine große Anzahl von Versuchen, Duftqualitäten zu klassifizieren. Einige Forscher versuchten dabei mit möglichst wenigen (vier) Kategorien auszukommen, andere haben eine verwirrende Anzahl von 44 Kategorien vorgeschlagen.

Das Klassifikationssystem von HENNING ist bereits etwas älter (1915). Es kommt mit sechs Klassen aus (siehe Abbildung 28). Wie die meisten seither aufgestellten Klassifikationssysteme ist es beliebig gewählt, wie alle diese Versuche hat auch der Ansatz von HENNING sein Stärken und Schwächen.

11.5 Stereochemische Theorie des Geruchs

Welche Eigenschaften eines Stoffs machen seinen Geruch aus? Nach **der Stereochemischen Theorie** scheint es in erster Linie die Form der Moleküle zu sein. Allerdings gibt es Moleküle, die sehr unähnlich riechen, aber sehr ähnlich aussehen. Umgekehrt sind sich manche Moleküle gar nicht so ähnlich, wie die Geruchsempfindungen, die sie auslösen.

Es läßt sich damit auch kaum erklären, daß der Geruch eines Stoffes sich mit dessen Konzentration verändert. Und darüber hinaus gibt es noch andere Faktoren, wie die Reaktionsfreudigkeit eines Stoffes oder dessen elektrische Ladung.

Fazit: Wir sind heute nicht in der Lage, diese Frage irgendwie aufzuhellen. Das Problem ist noch zu komplex.

11.6 Neuronale Kodierung

11.6.1 Ebene der Rezeptoren

Die Rezeptoren der Riechschleimhaut reagieren nicht auf einen einzelnen oder eine Gruppe ähnlicher Duftstoffe. Es wurde allerdings festgestellt, daß Regionen auf der Riechschleimhaut auf manche Stoffe sehr gut ansprechen, auf andere gar nicht. Dieser Effekt (**regionaler Sensitivitätseffekt** genannt) wurde mit Hilfe eines Elektro-olfaktogramms entdeckt, einem Minitatur-EEG für die Riechschleimhaut. Damit kann die Aktivität von ca. 1000 Rezeptoren gleichzeitig erfaßt werden.

Es gibt einen weiteren Mechanismus, mit dessen Hilfe unterschiedliche Muster an Rezeptoren-Aktivität hervorgerufen werden können. Aufgrund des **chromatographischen Effekts** verteilen sich unterschiedliche Moleküle in ihrer Konzentration unterschiedlich auf der Riechschleimhaut.

11.6.2 Höhere Ebenen

Wenn die Rezeptoren je nach Geruch in unterschiedlichen Aktivitätsmustern reagieren, so sollte es möglich sein, ähnliche Unterschiede im Riechkolben auszumachen. DÖVING & PINCHING (1973) setzten Ratten drei Monate lang einem Geruch aus. Nach dieser Zeit konnten im Riechkolben Degenerationen festgestellt werden. Sie überlappten sich für unterschiedliche Gerüche, waren im Ganzen aber deutlich voneinander verschieden.

Gerüche werden scheinbar viel diffuser kodiert als die Reize anderer Sinnesorgane. Trotzdem sind wir irgendwie in der Lage, tausende von Gerüchen zu unterscheiden.

Vielleicht sind höhere Strukturen als der Riechkolben für die Differenzierung von Gerüchen verantwortlich? Aus elektrophysiologischen Experimenten von TANABE ET AL. (1975) ist einiges über diese Prozesse bekannt. Es ist sehr wahrscheinlich, daß der orbitofrontale Kortex ein wichtige Rolle dabei spielt. In einem Verhaltensexperiment wurden einem Affen Brote unterschiedlichen Geruchs zu fressen gegeben. Je nach Geruch war das Brot mit Stoffen die bitter schmeckten oder nicht. Der Affe lernte mühelos, welches Brot das schmackhafte war. Nach Läsion des orbitofrontalen Kortex verringerte sich diese Fähigkeit stark.

TANABE ET AL. fanden auch Neuronen, die nur auf wenige Gerüche reagierten, viel spezifischer als Neuronen in niedrigeren Strukturen.

12 Geschmack

Der passende Reiz für eine Geschmackserfahrung sind *in Flüssigkeit gelöste Stoffe* (z.B. Salzlösung). Allerdings hat auch der *Geruchssinn* für den Geschmack eine wichtige Bedeutung (siehe Geruch).

Ebenso wie der Geruch hat der Geschmack eine **affektive Bedeutung**. Er wird danach eingeteilt, ob er als angenehm empfunden wird, oder nicht. Solche Geschmackserfahrungen werden im allgemeinen *mit anderen Menschen geteilt*. Im Gegensatz zu anderen Sinneseindrücken ist der Geschmack ein häufiges Gesprächsthema. Man redet beim Essen übers Essen, man lobt Koch oder Köchin und 'gibt noch einiges Senf dazu'.

12.1 Einflußfaktoren

Es gibt eine Reihe von Faktoren, die beeinflussen, wie wir Geschmack erleben. Diese Faktoren lassen sich in vier Gruppen einteilen:

12.1.1 Interner Zustand des Organismus

Beim ersten Bissen kann eine Speise sehr lecker sein, jedoch beim letzten Biß haben wir davon genug. Dieses Phänomen veränderter Wahrnehmung nennt sich **Alliesthesia**.

12.1.2 Genetik und Vorerfahrung

Manche Menschen besitzen die besondere Fähigkeit einen Stoff namens **Phenyltiocarbamid (PTC)** zu schmecken. Solche Menschen bezeichnet man als **Taster**. Sie haben andere Geschmacksempfindungen als andere Menschen, sie empfinden Stoffe wie Saccharin³² oder Koffein als bitter. Ein anderer (genetisch bedingter) Geschmackseffekt folgt auf den Verzehr von Artischocken. Etwa 60% der Bevölkerung empfinden den Geschmack von Wasser anschließend als süß.

Zusätzlich zu diesen genetischen Unterschieden scheint *die Erfahrung mit bestimmten Lebensmitteln und Gerichten* eine Rolle zu spielen.. Dieser Punkt ist jedoch nicht eindeutig geklärt.

12.1.3 Konditionierte Geschmacksaversion

...

³² Saccharin ist ein künstlicher Süßstoff.

12.1.4 Spezifischer Hunger

In einem Experiment wurde Ratten über längere Zeit Salz entzogen. Nach dieser Deprivationsphase ermöglichte man ihnen die giftige Substanz Lithiumchlorid zu fressen, was sie auch in großen Mengen taten, denn Lithiumchlorid schmeckt salzig. Solche Formen von spezifischem Hunger können (auch bei Menschen) auftreten, wenn es dem Organismus an einem bestimmten Stoff mangelt.

12.2 Das Geschmackssystem

Die Geschmackssensoren liegen auf der Zungenoberfläche. Dort sind Ausbuchtungen in vier verschiedenen Formen ungleichmäßig verteilt, die man Papillen nennt:

- a) **Zapfenpapille**
- b) **Pilzpapille**
- c) **Blätterpapille**
- d) **Wallpapille**

Die eigentlichen Sensoren sind die **Geschmackssinneszellen** (auch **Schmeckzellen**). Diese liegen gebündelt in Gruppen zu ca. 50 Zellen in einem als **Geschmacksknospe** bezeichneten Sinnesorgan. Diese Knospen sind in die Papillen eingebaut; nur die zapfenartige enthalten keine Geschmacksknospen.

Wenn eine flüssige Lösung verschiedener Stoffe in die Pore einer Knospe eindringt und mit den Rezeptorzellen in Kontakt kommt, entsteht ein elektrisches Signal. Dieses wird über die Hirnnerven weitergeleitet. Die Geschmackssinneszellen der vorderen 2/3 der Zunge werden von afferenten Fasern der chorda tympani innerviert, einem Ast des VII Hirnnerven facialis; das hintere Drittel vom Nervus glossopharyngeus. Diese Nervenstränge gelangen zum nucleus solitarius in der Medulla oblongata. Von dort ziehen sie weiter zu den ventralen Kernen des Thalamus und projizieren schließlich auf den Parietallappen des Kortex.

12.3 Geschmacksqualität

Die meisten Forscher sind sich einig, jeder Geschmack setzt sich grundsätzlich aus vier Komponenten zusammen: **süß, sauer, bitter, salzig**. Obwohl einige wenige noch skeptisch sind, gibt es doch eine Anzahl von Belegen dafür. Wenn Versuchspersonen gebeten werden, verschiedene Geschmacksrichtungen zu beschreiben, reichen diese vier Komponenten aus, um die Aufgabe zu erfüllen. Indem man die vier Grundgeschmacksrichtungen jeweils entsprechend intensiv wählt, kann man jeden Geschmack beschreiben, und wenn die Versuchspersonen die Freiheit haben, andere Bezeichnungen zu verwenden, so nutzen sie diese Möglichkeit meist nicht.

In Bezug gibt es Beobachtungen, die den visuellen Nachbildern im Effekt ähneln. Man untersuchte die Geschmacksempfindung von Wasser, nachdem die Zunge z.B. an eine salzige Lösung adaptiert worden war. Das Wasser schmeckte danach sauer oder bitter.

Physikalische Eigenschaften. Es wurde bereits ein Zusammenhang zwischen der Art eines Stoffs und dessen Geschmack. So bewirken H^+ -Ionen in einer Lösung eher eine salzige Empfindung, für einen süßen Stoff bedarf es schon eines komplexeren organischen Moleküls.

12.4 Neuronale Kodierung

Bezüglich der Kodierung existieren auch beim Geschmackssinn die üblichen zwei Theorien.

12.4.1 Die Spezifitätstheorie

Nach der Spezifitätstheorie wird Geschmack dadurch kodiert, daß je nach Geschmack eine andere Nervenfasern feuert. Demnach gäbe es einen Nervenstrang für salzig, eine für sauer, usw. Gegen diese Annahme spricht, daß die meisten Neuronen auf mehrere Geschmacksqualitäten reagieren. Dennoch kann die Theorie beibehalten werden, wenn Neurone nicht einzeln, sondern im Verbund betrachtet werden je nachdem auf welchen Geschmack ein Neuron am besten reagiert. Bei Hamstern konnte man auf diese Art Fasern ausfindig machen, die besonders auf HCl (sauer) oder besonders auf NaCl (salzig) reagieren.

12.4.2 Neuronen-Muster-Theorie

Diese Theorie behauptet, daß der Geschmack über das Muster kodiert wird, in dem einzelne Nervenstränge feuern. Tatsächlich stellte man (bei Ratten) fest, zwei Stoffe aktivieren die chorda tympani in ähnlichen Mustern, wenn sie auch ähnlich schmecken.

So müßte es möglich sein, daß eine für Salz adaptierte Zunge ebenfalls für andere salzige Stoffe **kreuz-adaptiert** hat. Andere salzige Stoffe müßten weniger salzig erscheinen. SMITH & FRANK (1972) experimentierten mit vielen verschiedenen Substanzen und fanden heraus, daß Kreuzadaption um so stärker ausgeprägt ist, je ähnlicher die Neuronenmuster sind, die diese Stoffe jeweils hervorrufen.

12.4.3 Schlußfolgerung

Und wie das in der Wahrnehmungspsychologie häufiger der Fall ist, ist auch hier keine Entscheidung für eine einzelne Theorie möglich. Beide haben ihre Berechtigung, beide scheinen für den Geschmackssinn von Bedeutung zu sein. Welche von beiden Informationsquellen das Gehirn bevorzugt ist seither noch ungeklärt.