

Kontrast und Komplementarität – Neurophysiologische Grundlagen unserer optischen Wahrnehmung

1. Einleitung

Der Mensch ist ein Augentier. Man schätzt, dass wir mehr als 70 % der Information aus unserer Umgebung über das optische System aufnehmen. Die phylogenetisch ältere Chemorezeption, also das Riechen und Schmecken, hat dagegen eine geringere Bedeutung für den Menschen. Das Gleiche gilt für den Tastsinn und das Gehör, Sinnesempfindungen, die bekanntlich bei Blinden außerordentlich ausgeprägt sein können. Unsere optische Wahrnehmung hat sowohl interessante physiologische als auch psychologische Aspekte, die gut untersucht und teilweise aufgeklärt sind. Ich möchte mich im Folgenden auf zwei Besonderheiten beschränken und ihre anatomischen Voraussetzungen und physiologischen Ursachen darstellen: die Empfindungen des Kontrastes und der Komplementarität. Besonders stimulierend für die Erforschung dieser Erscheinungen war eine Reihe so genannter optischer Täuschungen, d. h. Interpretationen der Wirklichkeit durch unseren Wahrnehmungsapparat, die nicht mit objektiv physikalischen Messungen übereinstimmen.

2. Einige Phänomene der optischen Wahrnehmung

Am bekanntesten sind wohl solche optischen Täuschungen, bei denen räumliche Darstellungen mit unseren Erfahrungen kollidieren. Beispiele sind das unmögliche Dreieck nach Richard Gregory (*Frisby, J. P. 1983, 25*), perspektivische Täuschungen durch manipulierte Größenverhältnisse bekannter Gegenstände (*Schober H. u. Rentschler, I. 1979, 43*) und die phantasievollen irrealen Darstellungen von Maurits Cornelis Escher. Andere Täuschungen beruhen auf der Wahrnehmung von Bewegungen, die durch spezifische feine Texturen hervorgerufen werden (*Schober H. u. Rentschler, I. 1979, 29-30*). Bei den Beispielen, die ich hier vorstellen möchte, handelt es sich um vergleichsweise einfache Täuschungen, bei denen weder das Langzeitgedächtnis noch das Bewegungssehen beteiligt sind.

2.1 Randkontrast und simultaner Helligkeitskontrast

Betrachten wir eine Serie parallel angeordneter Graustreifen zunehmender Helligkeit, so erscheinen uns die Streifen unweigerlich inhomogen: nahe der dunkleren Streifen heller, nahe der helleren Streifen dunkler (Abb. 1). Wir können uns leicht davon überzeugen, dass es sich um eine Täuschung handelt, indem wir die benachbarten Streifen abdecken. Dieses Phänomen der Kontrastverschärfung – auch Randkontrast genannt – ist unter dem Namen „Mach-Streifen“ (nach dem Sinnesphysiologen Ernst Mach) bekannt. Es tritt auch an dem so genannten Hermann-Gitter auf. In der Mitte der weißen „Straßen“ erscheinen graue Streifen und auf den „Kreuzungen“ graue Flecken (Abb. 6).

Eine ähnliche Täuschung erleben wir, wenn wir einen grauen Streifen homogener Helligkeit auf einem kontinuierlich verlaufenden Untergrund betrachten (Abb. 2). In dunkler Umgebung erscheint der Streifen heller, in heller Umgebung dunkler als in Wirklichkeit. Dieses Phänomen wird als simultaner Helligkeitskontrast bezeichnet.

2.2 Simultaner Farbkontrast

Eine hellgraue Fläche erscheint in roter Umgebung grünlich, in grüner Umgebung dagegen rötlich. Dieses Phänomen ist besonders deutlich, wenn wir einen grauen Ring auf einen Untergrund legen, der in ein rotes und ein grünes Feld geteilt ist (Abb. 3). In einer blauen Umgebung erscheint der Ring gelblich und über gelbem Untergrund bläulich. Diesen so genannten simultanen Farbkontrast hat Johann Wolfgang von Goethe beschrieben, nachdem er beobachtet hatte, dass Schatten häufig farbig erscheinen. Uns allen ist bekannt, dass das Sonnenlicht im Schnee blaue Schatten hervorruft.

2.3 Komplementäre Nachbilder

Wenn wir eine Zeit lang einen farbigen Gegenstand fixieren und ihn dann rasch entfernen, auf eine weiße Fläche blicken oder die Augen schließen, so bemerken wir für einige Sekunden anstelle des betrachteten Gegenstands ein komplementär gefärbtes Nachbild. Sehr schön lässt sich dieses Experiment mit zwei gleichzeitig dargebotenen Farben durchführen (Abb. 4). Im Nachbild erscheint die grüne Schale der Wassermelone rötlich, das Innere dagegen grünlich. Entsprechend lassen sich Nachbilder mit einer blau-gelben Kombination erzeugen (Abb. 5). Besonders deutlich sind komplementäre Nachbilder an dem bereits erwähnten Hermann-Gitter zu beobachten. Die weißen Straßen erscheinen im Nachbild schwarz, die schwarzen Blöcke dagegen weiß. Neigt man nach dem Fixieren des Gitters den Kopf ein wenig

zur Seite, so dreht sich das Nachbild mit, so als wäre es in unsere Netzhaut eingebrannt (Abb. 6).

2.4 Relative Farbkonstanz

Zu unseren unbewussten Erfahrungen zählt, dass wir die Farbe von Gegenständen weitgehend unabhängig von der Beleuchtung richtig erkennen. Eine Apfelsine ist orange, eine Gurke grün, egal ob wir sie mit blauem oder gelbem Licht bestrahlen. Voraussetzung für die Erkennung der wahren Farben ist allerdings, dass mehrere Farben in der betrachteten Szene vorhanden sind. Dieses Phänomen unserer Farbwahrnehmung wird als relative Farbkonstanz bezeichnet. Es handelt sich hier also um eine Art Differenzmessung. Würden wir die Wellenlänge des Lichts, das die Gegenstände reflektieren, mit physikalischen Messgeräten objektiv bestimmen, kämen wir zu einem ganz anderen Ergebnis.

Lassen sich für die beschriebenen Täuschungen neurophysiologische Ursachen finden? Helfen diese Phänomene vielleicht sogar, die Organisation unseres optischen Wahrnehmungsapparats zu verstehen? Um diese Fragen zu beantworten, wollen wir zunächst die Organe unseres visuellen Systems näher betrachten.

3. Anatomie und Physiologie des Auges

Das Auge des Menschen wird oft mit einer photographischen Kamera verglichen. Die Linse entwirft ein umgekehrtes verkleinertes Bild der betrachteten Gegenstände auf der Netzhaut (Retina), die als dünner „Film“ die hintere Hälfte des Augapfels auskleidet. Der Aufbau und die Funktionen der Retina sind aber unvergleichlich komplexer, so dass eine Analogie selbst zu einem photographischen Farbfilm irreführend ist. Entwicklungsgeschichtlich und funktionell ist die Retina ein Teil des Gehirns. Zusätzlich zur Photorezeption, der Absorption von Licht, hat sie die Aufgabe, die physikalischen Lichtreize in elektrische Erregung zu übersetzen, optische Information zu verarbeiten und als Nervenimpulse über den Sehnerv an höhere Zentren des Gehirns weiterzuleiten.

3.1 Aufbau der Retina

Es gehört zu den Merkwürdigkeiten phylogenetischer Zwänge, dass die Retina des Wirbeltierauges invers orientiert ist, d. h. entgegen der optimalen Konstruktion eines Technikers so gebaut ist, dass das Licht zunächst mehrere Schichten von Nervenzellen durchdringen muss, bevor es von den Lichtsinneszellen (Stäbchen für das Schwarz-weiß-Sehen in der Dämme-

nung und Zapfen für das Farbsehen) absorbiert wird (Abb. 7). Betrachten wir nun die Schichten der Retina in der Reihenfolge ihrer Funktionen, so folgen in „vertikaler“ Richtung auf die Stäbchen und Zapfen die Schichten der Bipolarzellen und schließlich die der Ganglienzellen. Dabei entspricht der Aufbau in der Peripherie der Retina dem Konvergenzprinzip, d. h. viele Sinneszellen werden auf wenige Ganglienzellen verschaltet. Im Zentrum dagegen liegt ein 1 : 1 Verhältnis von Sinneszellen und Ganglienzellen vor. Zwischen den erwähnten Zellschichten liegen die Horizontalzellen und die amakrinen Zellen, die für eine „horizontale“ Verschaltung sorgen.

3.2 Das Konzept der rezeptiven Felder

Eine Reihe von Experimenten, bei denen die Retina punktförmig mit Licht gereizt wurde, führte zum Konzept des rezeptiven Feldes. Dieses besagt, dass eine Ganglienzelle die Erregung aus jeweils einer Gruppe von Sinneszellen bündelt. Die rezeptiven Felder sind kreisförmig; sie überlappen sich und nehmen an Größe zur Peripherie hin zu. Das rezeptive Feld einer Ganglienzelle besteht aus einem Zentrum und der ringförmigen Umgebung, die auf Lichtreize antagonistisch reagieren (Abb. 8). Manche Ganglienzellen antworten auf den Lichtreiz im Zentrum des rezeptiven Feldes mit einer Erhöhung der Entladungsfrequenz, andere mit einer Erniedrigung. Dies ist gleichbedeutend damit, dass die einen eine Salve von Aktionspotentialen feuern wenn das Licht angeschaltet wird, während die anderen ebenso reagieren, wenn das Licht abgeschaltet wird. Die Zellen werden deshalb als on- bzw. off-center Ganglienzellen unterschieden. Zusammen mit der Organisation in rezeptive Felder ergeben diese Eigenschaften bereits eine Fülle von verschiedenen Erregungskonstellationen.

3.3 Laterale Inhibition

Die zusätzliche Verschaltung benachbarter Signalwege über Horizontalzellen macht die Retina bereits zu einer komplexen informationsverarbeitenden „Außenstation“ unseres Gehirns. Darunter sind es die hemmenden (inhibitorischen) synaptischen Verbindungen, die den Antagonismus zwischen Zentrum und Umfeld erklären. Ein vereinfachtes Schema der seitlichen Hemmung in der Retina ist in Abb. 9 dargestellt. Die Addition von Erregung (E) und Hemmung (I) ergibt den Effekt, der einen hellen Streifen an der Grenze zu einem dunklen heller erscheinen lässt als in Wirklichkeit und auf der anderen Seite den dunklen Streifen an der Grenze dunkler macht. Durch dieses Prinzip der lateralen Inhibition lassen sich die Erscheinungen des Randkontrastes (Mach-Streifen, Abb. 1) sowie des simultanen Helligkeitskontrastes (Abb. 2) erklären.

4. Physiologische Grundlagen für Farbtäuschungen

Bevor wir uns einer Erklärung der vorgestellten Farbeffekte zuwenden, erscheint eine kurze Darstellung der Physiologie des Farbsehens und der Geschichte ihrer Aufklärung angebracht. Isaak Newton gelang bekanntlich nicht nur die Zerlegung des Sonnenlichts in die Spektralfarben, sondern auch die Mischung von Licht verschiedener Farben zu einer neuen Farbqualität. So konnte er aus der Vereinigung von rotem und grünem Licht gelbes erzeugen; durch eine weitere Zumischung von Blaulicht bekam er wieder weißes Licht. Seine Experimente bildeten die Grundlagen für die Dreifarbentheorie von Thomas Young und Hermann von Helmholtz. Diese Theorie sagte die Existenz von 3 verschiedenen wellenlängenspezifischen Rezeptoren für die Farben Blau, Grün und Rot voraus, die dann Mitte des 20. Jahrhundert tatsächlich gefunden wurden.

4.1 Gegenfarbentheorie

Das Studium subjektiver Farbwahrnehmung und die seinerzeit bekannten Farbsysteme führten Ewald Hering dazu, eine Theorie zu entwickeln, die eine komplementäre Wirkung bestimmter Farben postulierte. Die Erfahrung, dass es weder ein rötliches Grün noch ein bläuliches Gelb in unserer Farbempfindung gibt, d. h. die Unvereinbarkeit von Rot und Grün einerseits und von Blau und Gelb andererseits – außerdem die von Goethe beschriebenen komplementären Schatten – sind die Grundlagen für seine Gegenfarbentheorie, die einen Antagonismus der Komplementärfarben annimmt. Zusätzlich zu den komplementären Farbpaaren postulierte er einen funktionellen Gegensatz von Schwarz und Weiß. Hering vermutete bereits, dass die Phänomene des Kontrastes und der Komplementarität auf physiologische Mechanismen zurückzuführen seien und nicht auf psychische, wie Helmholtz annahm (Zit. nach *Frisby, J. P.* 1983, 10).

Trotz einer anfänglichen Ablehnung wurde Herings Theorie im 20. Jh. unter anderem durch elektrophysiologische Messungen bestätigt. Gunnar Svaetichin gelang es, lichtinduzierte Potentiale aus Horizontalzellen von Fischen abzuleiten. Dabei beobachtete er, dass diese mit Signalen reagieren, die eine entgegengesetzte Polarität für komplementäre Farbreize haben. Er hatte damit die ersten Gegenfarbenzellen entdeckt.

Es bleibt an dieser Stelle noch anzumerken, dass die kompromisslose Ablehnung der newtonschen Farbenlehre durch Goethe darauf beruht, dass Newton den rein physikalischen Charakter der Farben beschrieb, während Goethe sich ausschließlich auf die subjektiven Farbempfindungen stützte. Heute wissen wir, dass zwischen beiden Betrachtungen kein Gegensatz existiert. Der Physiologie des Farbsehens war Goethe tatsächlich näher.

Seine Zuordnung der Farben zu bestimmten Charaktereigenschaften muss allerdings als eine Verirrung im Sinne eines idealistischen Naturverständnisses angesehen werden.

4.2 Anatomie der Sehbahn

Nachdem das Reizmuster, das unser Auge aufnimmt, in der Retina bearbeitet, gefiltert und in die Sprache des Nervensystems übersetzt ist, wird die Erregung in Form von Nervenaktionspotentialen über die so genannte Sehbahn an höhere Zentren unseres visuellen Systems weitergeleitet (Abb. 10). Die Sehnerven aus dem rechten und linken Auge teilen sich jeweils in einen nasalen und einen temporalen (seitlichen) Strang. Die nasalen Stränge kreuzen sich im Chiasma und ziehen zusammen mit den temporalen Strängen der jeweils anderen Seite zum Corpus geniculatum laterale (CGL). Dieses zentral gelegene Kerngebiet im Thalamus ist das nächste Zentrum für die weitere Verarbeitung und Analyse optischer Information. Von hier aus führt die Sehbahn weiter zur „Area 17“, der primären Sehrinde in der Hinterhauptregion und schließlich zu weiteren Feldern des Cortex, in denen die Information weiter analysiert wird.

4.3 Gegenfarbentzellen im CGL

Das Corpus geniculatum laterale besteht aus mehreren Schichten von Nervenzellen mit großen und kleinen Zellkernen. In einer parvozellulären (kleinkernigen) Schicht des CGL von Rhesusaffen fand Russel de Valois Zellen, die antagonistisch auf Komplementärfarben reagieren, die er dem Versuchstier präsentierte (Abb. 11). Als Reaktion auf grünes Licht verringerte sich die Frequenz der Aktionspotentiale; nach dem Ausschalten des Lichts war die Frequenz gegenüber der spontanen Entladungsrate erhöht. Den entgegengesetzten Effekt beobachtete er mit Rotlicht. Neben den rot/grün-Zellen fand er auch solche mit einem gelb/blau-Antagonismus. Damit war eine wichtige Stütze für die Heringsche Gegenfarbentheorie erbracht.

David Hubel und Torsten Wiesel untersuchten daraufhin die rezeptiven Felder dieser Zellen. Ein Lichtpunkt, über das rezeptive Feld geschoben, ergab eine Erregung durch Rotlicht im Zentrum und eine überlappende Hemmung durch Grünlicht (Abb. 12). Weißes Licht erzeugt eine Erregung im Zentrum und eine Hemmung in der Peripherie. Gegenfarbentzellen mit einem +G-Zentrum und einem -R-Umfeld sowie solche, die antagonistisch auf blau/gelb reagieren, wurden ebenfalls im CGL gefunden. Da das Farbsehen von Rhesusaffen und Menschen sehr ähnlich ist, können wir annehmen, dass auch die physiologischen Grundlagen im Wesentlichen überein-

stimmen. Die antagonistische Wirkung von Komplementärfarben auf das Erregungsmuster einzelner Zellen im CGL ist eine wichtige Voraussetzung für die Erklärung komplementärer Nachbilder.

4.4 Doppelgegenfarbenzellen

Die Ausgänge mehrerer Gegenfarbenzellen können zu Doppelgegenfarbenzellen zusammengeschaltet sein, die von Margaret Livingstone und David Hubel im visuellen Cortex gefunden wurden. Diese Zellen reagieren auf die Präsentation von Rot (+R) bzw. Abschalten von Grün (-G) im Zentrum sowie auf die Präsentation von Grün (+G) bzw. Abschalten von Rot (-R) in der Peripherie (Abb. 13). Die Doppelgegenfarbenzellen im Cortex lassen sich aus einer Verschaltung von zwei oder mehreren Gegenfarbenzellen des CGL verstehen. Doppelgegenfarbenzellen sind geeignet, die Phänomene des Simultankontrastes und der relativen Farbkonstanz zu erklären.

5. Biologische Bedeutung

Bei den hier vorgestellten Phänomenen unserer visuellen Wahrnehmung handelt es sich vom Standpunkt objektiver physikalischer Messverfahren aus zweifellos um Täuschungen. Es stellt sich die Frage, ob wir es mit bloßen Unzulänglichkeiten unseres Wahrnehmungsapparates zu tun haben, wie etwa bei der inversen Retina oder anderen technisch gesehen unvollkommenen Lösungen der Evolution. Oder sind psychische Fehlleistungen die Ursache für die Verfälschungen der „Wirklichkeit“? Die komplexen Verschaltungen, die beispielsweise die laterale Inhibition bewirken, und der große nervöse Aufwand, den die Natur zur Interpretation von Farben verwendet, sprechen eher dafür, dass diese „Fehlleistungen“ von der Evolution „gewollt“ sind. Tatsächlich bieten sie eine Reihe von Vorteilen bei der Erkennung und Bewertung unserer Umgebung. Bei den behandelten Beispielen handelt es sich zweifellos um extreme Konstellationen, die den Effekt deutlich machen, und weniger um Situationen, denen unsere Vorfahren im täglichen Leben ausgesetzt waren, doch verdeutlichen sie ein allgemeines Prinzip. Die folgenden Überlegungen erscheinen mir geeignet, in den beschriebenen „Täuschungen“ einen selektiven Vorteil zu erkennen.

5.1 Verschärfung von Konturen

Das Phänomen der Randverschärfung ist sicher bei der Erkennung von Konturen vorteilhaft. Häufig sind Horizonte wegen der weichen Tonwertübergänge schwer auszumachen; das Gleiche gilt für Silhouetten und Schatten, deren Erkennung im Leben unserer Ahnen einen weit höheren

Wert gehabt haben wird als in unserer heutigen zivilisierten Welt. Auch eine funktionelle Bedeutung der Randverschärfung für den Ausgleich von Unschärfen in peripheren Bereichen der Retina ist wahrscheinlich. Schließlich sei der präadaptive Wert der Konturverschärfung für die Ausbildung und Erkennung von Schrift erwähnt.

5.2 Nachbilder

Weniger offensichtlich ist die biologische Bedeutung der Nachbilder. Diskutiert wird eine verbesserte Registrierung schneller Bewegungsvorgänge und eine Erhöhung der Aufmerksamkeit durch das nachträgliche Bild (*Frisby, J. P. 1983, 12-13*). Andererseits kann man leicht an sich selbst beobachten, dass die Nachbilder länger bestehen bleiben, wenn man müde ist. Möglicherweise sind sie nur die Folge einer selektiven Erschöpfung und langsamen Regeneration der Photorezeptoren.

5.3 Erkennen von Objekten

Der simultane Farbkontrast dient zweifellos dazu, farbige Objekte vor komplementärem Hintergrund besser zu erkennen. Denken wir etwa an die häufige Konstellation roter Früchte in grüner Umgebung. Auch der selektive Vorteil der relativen Farbkonstanz erscheint evident; sie ermöglicht es, Objekte auch bei sehr verschiedenen Beleuchtungen zu erkennen und zu unterscheiden.

6. Ästhetische Aspekte

Bernhard Rensch berichtet im Zusammenhang mit seinen Untersuchungen zum ästhetischen Empfinden von Primaten, dass Schimpansen schwarz-weiß Kontraste bevorzugen und Komplementärfarben eher kombinieren als ähnliche Farben (*Rensch, B. 1973, 267*). Diese Tendenz ist auch in der bildenden Kunst des Menschen zu beobachten. Eine besonders ausgeprägte Vorliebe für Komplementärfarben lässt sich in den Bildern von Franz Marc erkennen, und auch die deutschen Expressionisten, namentlich Erich Heckel und Karl Schmidt-Rottluff, setzten in ihren Werken großflächig reine und komplementäre Farben unmittelbar nebeneinander. Ihr umfangreiches Werk an Holzschnitten zeigt ebenfalls, dass sie den emotionalen Ausdruck in der Darstellung starker Kontraste suchen.

Dank. Anita Eckert und Hans Dieter Grammig danke ich für technische Hilfe bei der Herstellung des Satzsatzes und der Abbildungen.

LITERATUR:

- BULLOCK, Theodore Holmes (1977): Introduction to Nervous Systems, W.H. Freeman & Co, San Francisco.
- FRISBY, John P. (1983): Sehen. Moos Verlag München.
- GOURAS, Peter (1991): Color Vision. In: Kandel, Eric R., Schwartz, James H. and Jessell, Thomas M. Principles of Neural Science, p. 467-480, Appleton & Lange, Norwalk.
- HUBEL, David H. (1987): Eye, Brain, and Vision. Scientific American Library, W.H. Freeman & Co, New York.
- HURVICH, Leo M. (1981): Color Vision. Sinauer, Sunderland.
- RENSCH, Bernhard (1973): Ästhetische Grundprinzipien bei Mensch und Tier. In: Altner, Günter (Hg.), Kreatur Mensch, p. 265-286, dtv München.
- SCHOBBER, Herbert u. RENTSCHLER, Ingo (1979): Das Bild als Schein der Wirklichkeit. Moos Verlag, München.
- TESSIER-LAVIGNE, Marc (1991): Phototransduction and Information Processing in the Retina. In: Kandel, Eric R., Schwartz, James, H. and Jessell, Thomas M. Principles of Neural Science, p. 400-418, Appleton & Lange, Norwalk.

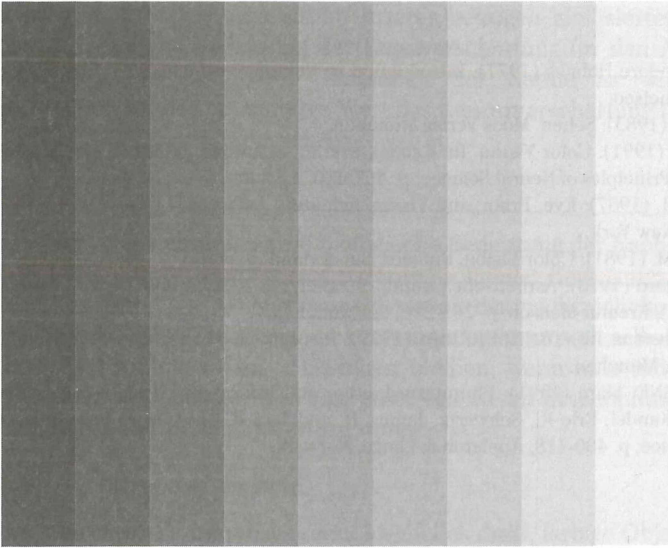


Abb. 1: Kontrastverstärkung (Mach-Streifen) an Graustreifen zunehmender Helligkeit. Die benachbarten Zonen erscheinen heller bzw. dunkler als in Wirklichkeit.

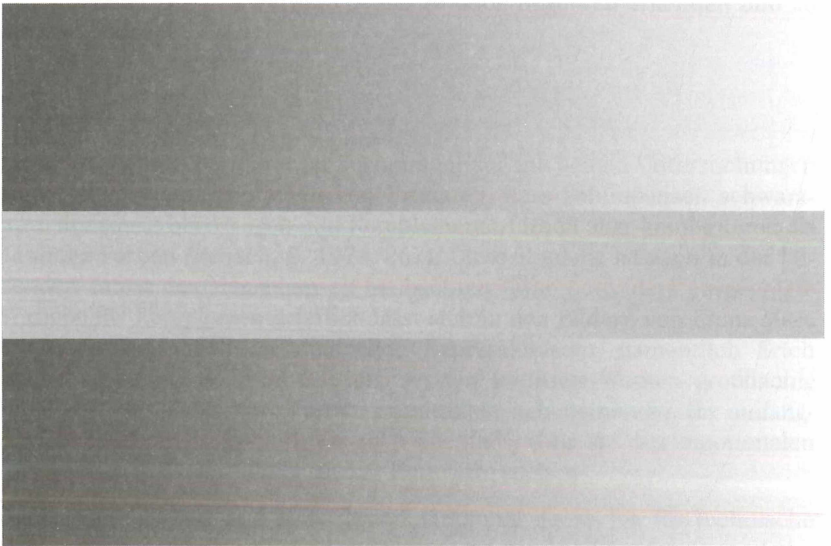


Abb. 2: Simultaner Helligkeitskontrast. Ein homogener Graustreifen erscheint vor dunklem Hintergrund heller, vor hellem Hintergrund dunkler als in Wirklichkeit.

Eilo Hildebrand

**Kontrast und Komplementarität –
Neurophysiologische Grundlagen unserer
optischen Wahrnehmung Seiten 47, 48**

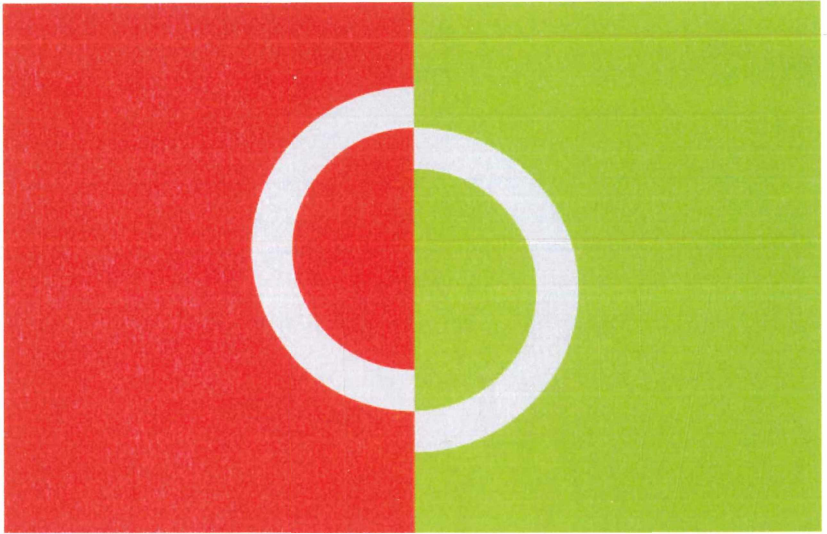


Abb. 3: Simultaner Farbkontrast. Ein grauer Halbring erscheint auf rotem Untergrund grünlich, auf grünem Untergrund rötlich.

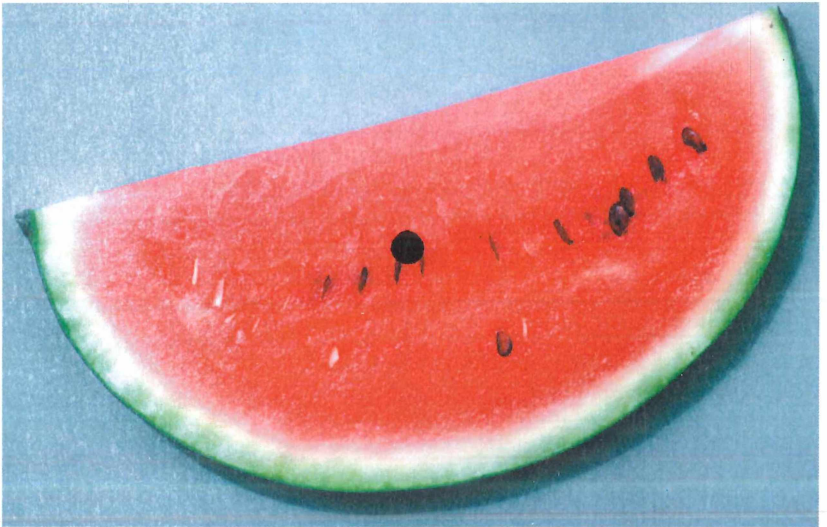


Abb. 4: Komplementäres Nachbild. Fixiert man für 10 bis 20 s den schwarzen Punkt in der Mitte des Bildes und blickt anschließend auf eine weiße Fläche oder schließt die Augen, so erscheint für einige Zeit ein Nachbild in den Komplementärfarben (rote Schale und grünes Fruchtfleisch der Melonenscheibe).

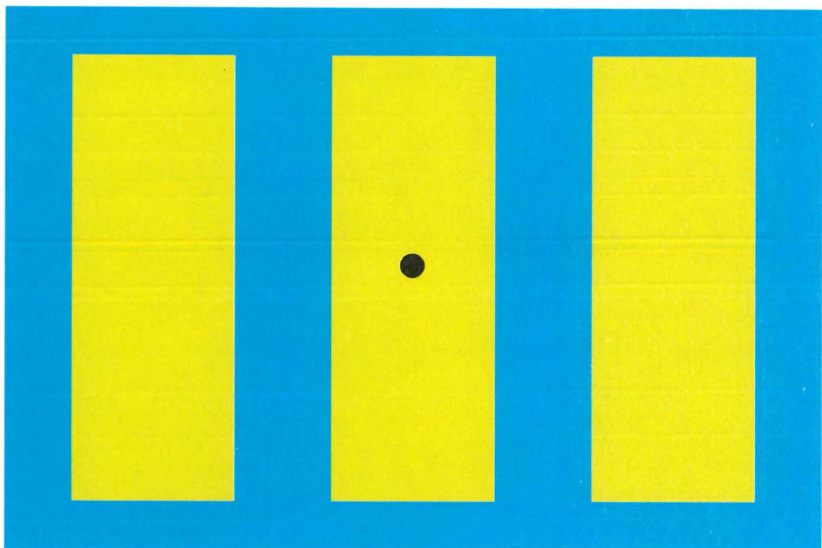


Abb. 5: Komplementäres Nachbild. Die gelben Streifen erscheinen im Nachbild blau, die blaue Umgebung gelb.

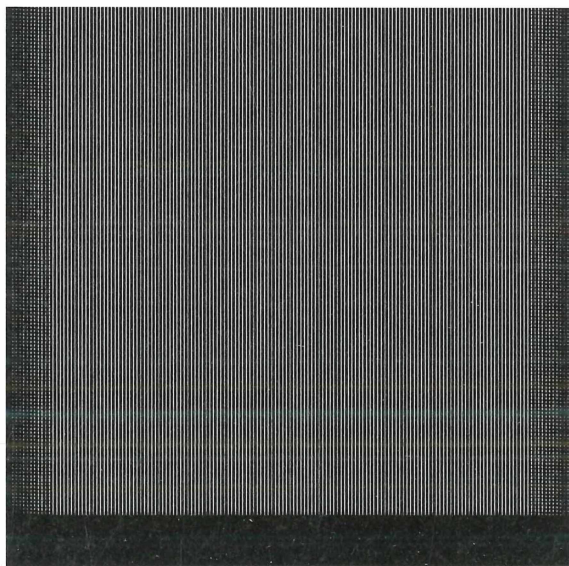


Abb. 6: Kontrast-täuschung und komplementäres Nachbild am Hermann-Gitter (vgl. Text).

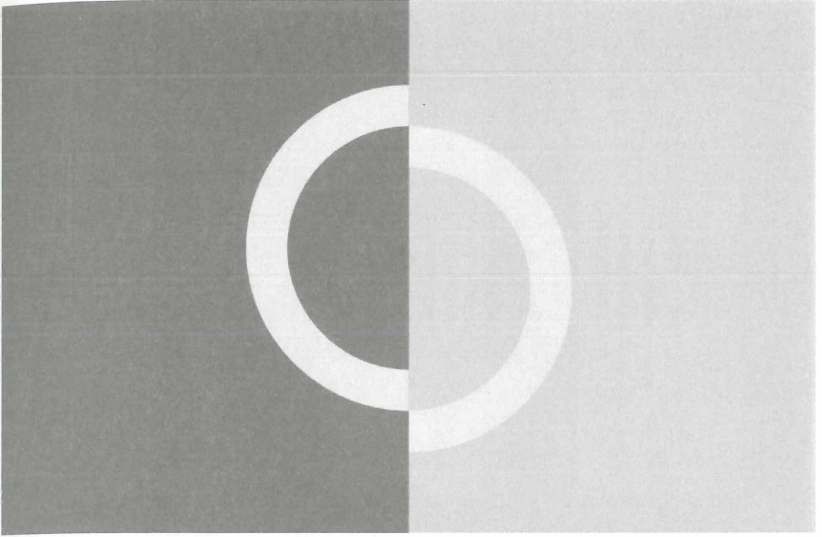


Abb. 3: Simultaner Farbkontrast. Ein grauer Halbring erscheint auf rotem Untergrund grünlich, auf grünem Untergrund rötlich.

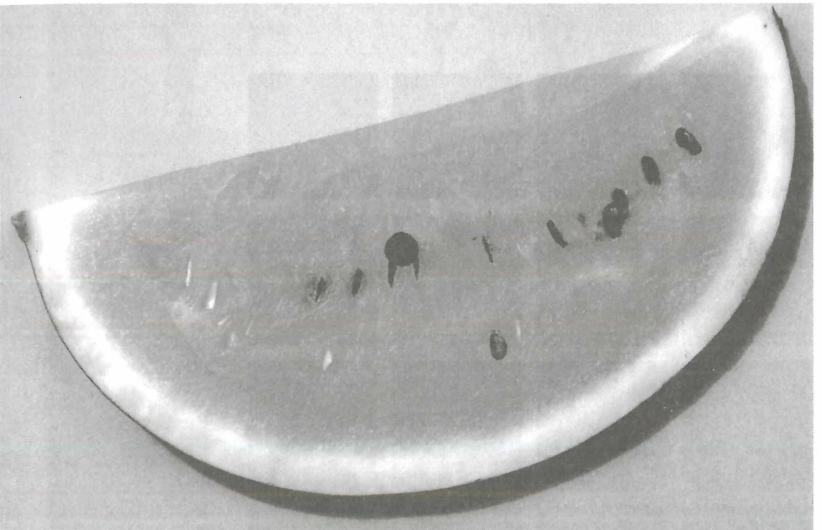


Abb. 4: Komplementäres Nachbild. Fixiert man für 10 bis 20 s den schwarzen Punkt in der Mitte des Bildes und blickt anschließend auf eine weiße Fläche oder schließt die Augen, so erscheint für einige Zeit ein Nachbild in den Komplementärfarben (rote Schale und grünes Fruchtfleisch der Melonenscheibe).

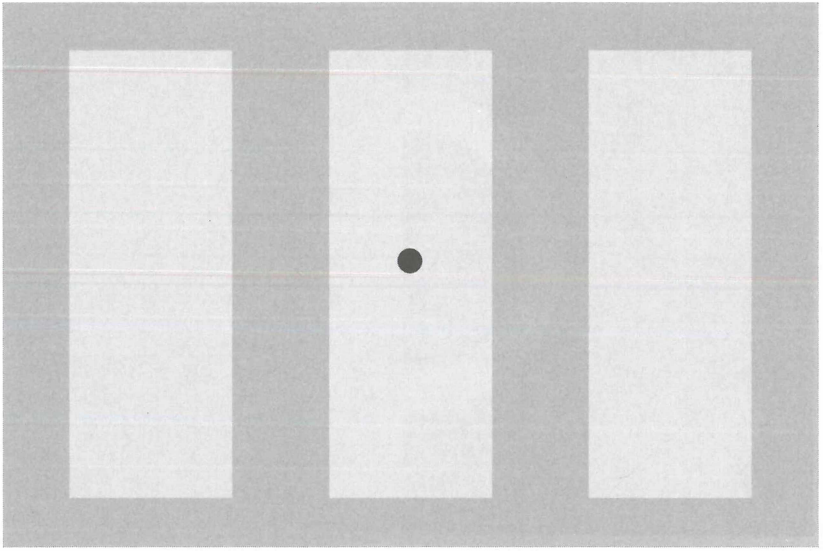


Abb. 5: Komplementäres Nachbild. Die gelben Streifen erscheinen im Nachbild blau, die blaue Umgebung gelb.

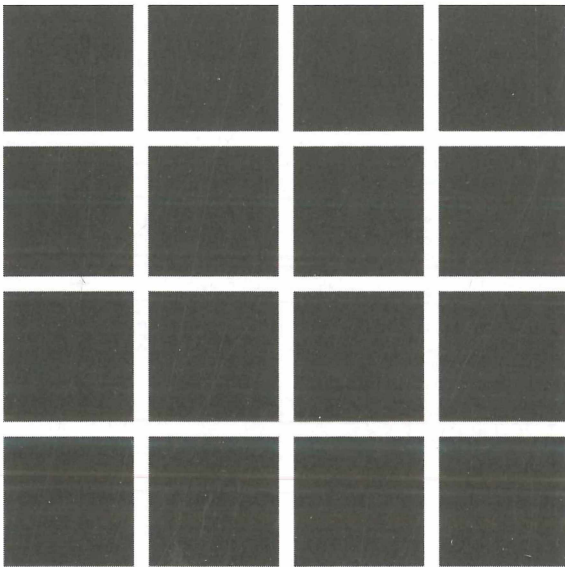


Abb. 6: Kontrast-täuschung und komplementäres Nachbild am Hermann-Gitter (vgl. Text).

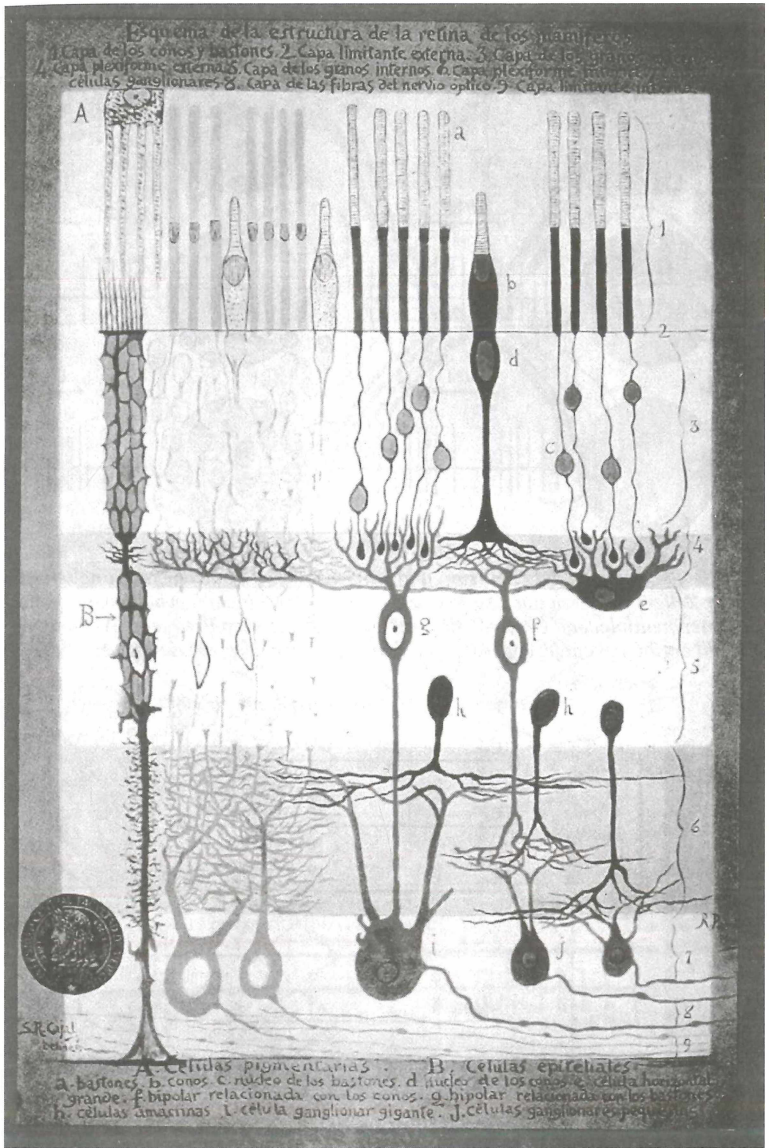


Abb. 7: Schichtenaufbau der Retina nach einer Originalzeichnung von Santiago Ramón y Cajal (aus Hubel, D.H., 1987) 1-3: Photorezeptorzellen (a: Stäbchen; b: Zapfen); 4: Horizontalzellen (e), 5: Bipolarzellen (g, f); 5-6: amakrine Zellen (h); 7: Ganglienzellen (i, j) 8-9: ableitende Nerven (Axone) der Ganglienzellen.

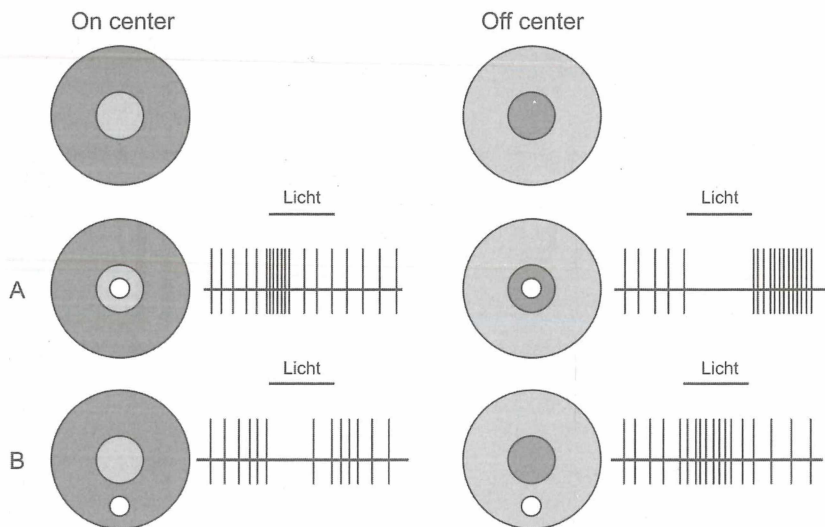


Abb. 8: Rezeptive Felder (Zentrum und konzentrisches Umfeld) von Ganglienzellen. On-center-Zellen reagieren auf Lichtreizung im Zentrum mit einer erhöhten Frequenz von Aktionspotentialen, off-center-Zellen mit einer verringerten Frequenz (A). Reizung im Umfeld ergibt den entgegengesetzten Effekt (B). (Nach Tessier-Lavigne, M., 1991, 410).

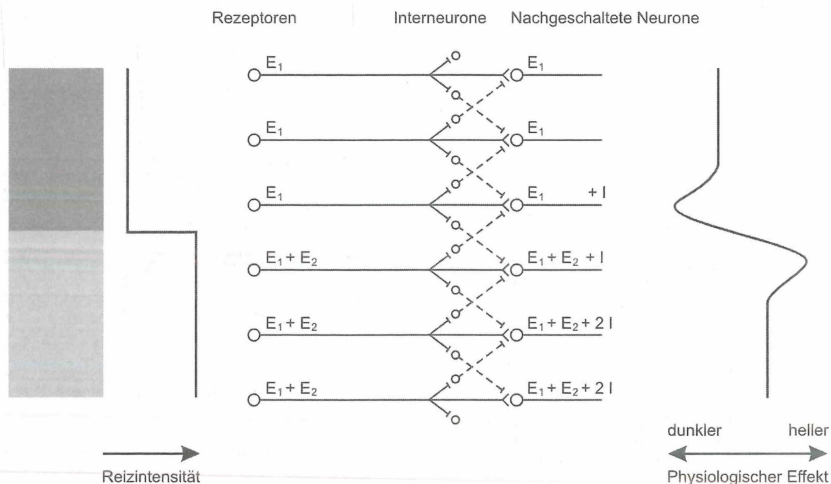


Abb. 9: Schema der lateralen Inhibition in der Retina. E_1 = Erregung der Photorezeptoren durch geringe, $E_1 + E_2$ durch starke Helligkeit; I = Hemmung über reziproke inhibitorische Verbindungen von Interneuronen. (Verändert nach Bullock, T.H., 1977, 260).

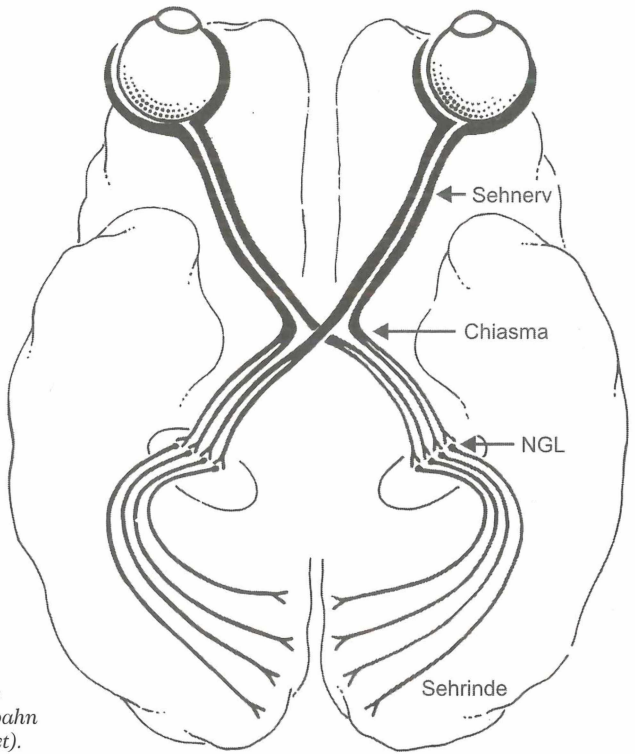


Abb. 10: Vereinfachte Darstellung der Sehbahn des Menschen (s. Text).

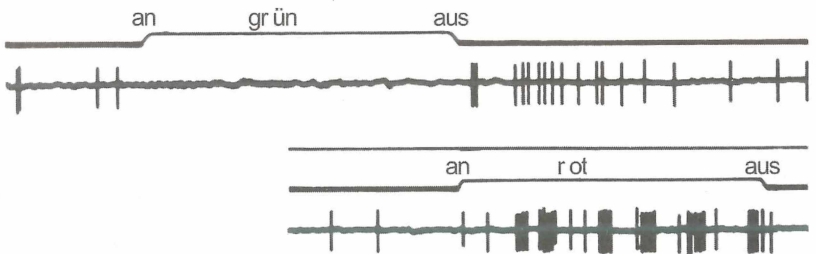


Abb. 11: Elektrische Impulse (Aktionspotentiale) einer Gegenfarbenezelle aus dem Corpus geniculatum laterale (CGL) des Rhesusaffen. Reizung mit Grünlicht unterdrückt die Entladung, Rotlicht steigert sie (vgl. Text). (Nach Hurvich, L.M., 1981, 187).

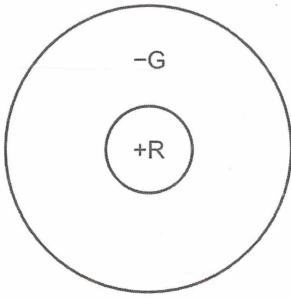


Abb. 12: Rezeptives Feld einer Gegenfarbencelle für Rot/Grün aus dem Corpus geniculatum laterale (CGL). Reizung des Zentrums mit Rotlicht erzeugt eine Erregung, Reizung des Zentrums und der Peripherie mit Grünlicht eine Hemmung (a); Weißlicht im gesamten Feld ergibt eine Summation der Effekte. (Verändert nach Hubel, D. M., 1987, 180-181)

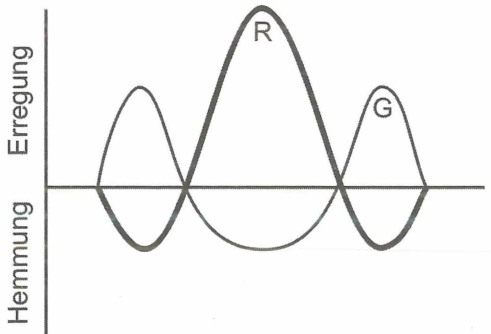
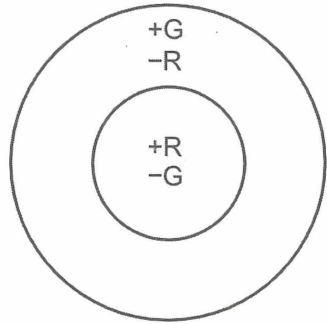
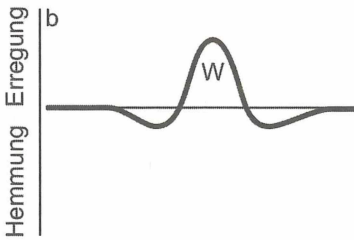
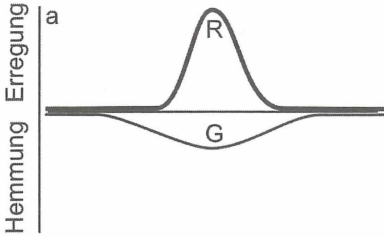


Abb. 13: Rezeptives Feld einer Doppelgegenfarbencelle für Rot/Grün aus der Area 17 des visuellen Cortex. Rotlicht im Zentrum bewirkt eine Erregung, in der Peripherie eine Hemmung. Die Wirkung von Grünlicht ist entgegengesetzt. (Nach Hurvich, L. M., 1981, 175).

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Matreier Gespräche - Schriftenreihe der Forschungsgemeinschaft Wilheminenberg](#)

Jahr/Year: 2003

Band/Volume: [2003a](#)

Autor(en)/Author(s): Hildebrand Eilo

Artikel/Article: [Kontrast und Komplementarität - Neurophysiologische Grundlagen unserer optischen Wahrnehmung 37-52](#)