

Ein besonderer Nachbildeffekt soll hier noch vorgestellt werden, der bestimmt auf keinerlei Ermüdung beruht: der nach seiner Entdeckerin C. McCullough benannte Effekt der verknüpften Nachbilder. Man betrachte zunächst ca. 10–15 Minuten lang Bild 7, und dann das folgende. Man sollte dann die horizontal- und vertikal gestreiften Bereiche in etwas verschiedenen Farben sehen.

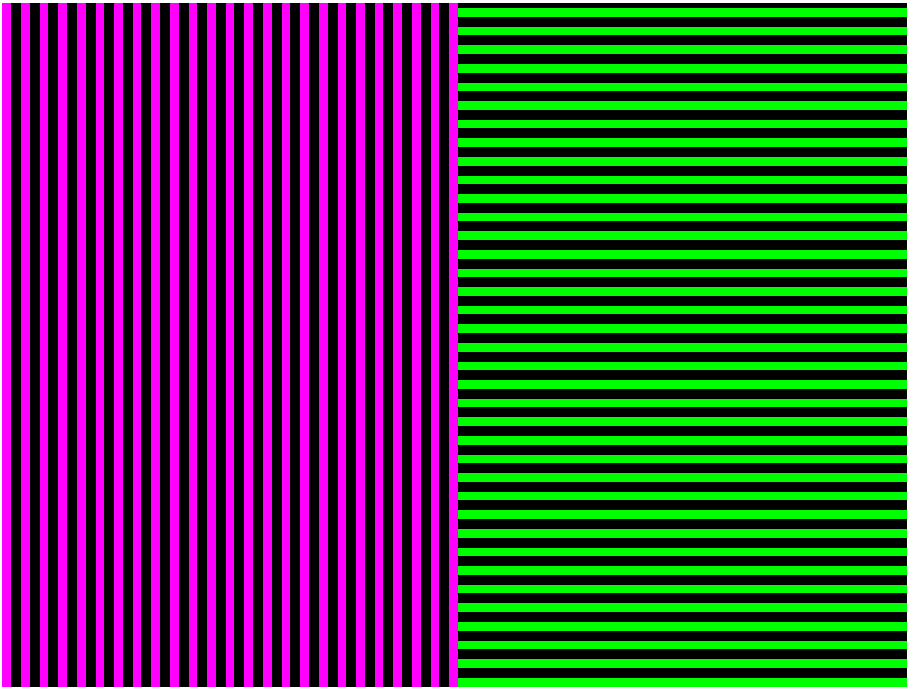


Abbildung 7: Zur Demonstration des McCullough-Nachbildeffektes: man vergrößere dieses Bild so, daß es möglichst den ganzen Bildschirm einnimmt, und betrachte es dann ca. 10 bis 15 Minuten.

Dieser subtile Effekt ist ein weiteres Beispiel dafür, daß zwischen Farbreiz im Auge und Farbempfindung ein beträchtlicher Aufwand an Datenverarbeitung liegt.

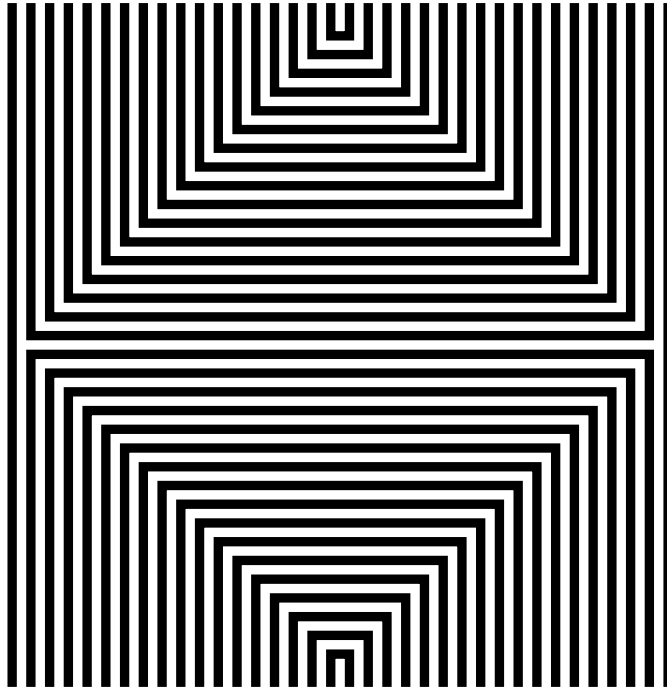


Abbildung 8: Testbild zur Demonstration des McCullough-Nachbildeffektes, möglichst in der gleichen Vergrößerung wie das vorige zu betrachten. Falls der Effekt nicht wahrgenommen wird, kann es helfen, den Kopf um 90° zur Seite zu neigen.

Der Mechanismus des Farbensehens

Auffällig ist, daß die Helligkeiten der Farben auf dem Farbenkreis bzw. dem Umfang des Ostwaldschen Farbkörpers nicht gleich sind. Während ein Helligkeitsvergleich zwischen Rot und Grün schwierig ist, ist der Helligkeitsunterschied zwischen Blau und Gelb sehr deutlich zu sehen.

Läßt sich ein Grund dafür finden, daß Blau so dunkel ist? (Gemeint ist ein reines Blau ohne Weißanteil. Himmelblau läßt sich mit dem Farbkreis aus Dunkelblau und Weiß ermischen.) Man findet in den verschiedenen Farbenlehren allenfalls den Sachverhalt vermerkt, der als naturgegeben akzeptiert wird. An einer Stelle habe ich etwas mehr darüber gefunden: Eckart Heimendahl hat 1957 an der philosophischen Fakultät der Universität Hamburg mit einer Dissertation über Licht und Farbe promoviert, die in erweiterter Form 1961 als Buch erschien. Dort finden wir den Begriff der psychophysischen Energie eingeführt, und:

„Nimmt die psychophysische Energie mit der physikalischen Energie der Teilchen⁴ zu? Offensichtlich ist das doch *nicht* der Fall. Ist *Rot* (Lichtkraft) nicht gerade eine energiestarke Farbe gegenüber Gelb und Grün, und die physikalisch energiereiche blaue Strahlung nicht psychophysisch schwach?

Für die psychophysikalische Beurteilung ist maßgebend, welches quantitative Verhältnis Lichtwahrnehmung und Lichtenergie zueinander haben. Dabei zeigt sich, daß sich physikalische und psychophysische Energie gerade umgekehrt proportional zueinander verhalten.

Nimmt die physikalische, elektrische Energie *zu*, so nimmt die psychophysische Energie *ab*: Das physikalisch energieschwache Rot ist psychophysisch stark, oder anders ausgedrückt: Nimmt die physikalische Energie pro Teilchen zu – Gelb – Grün – Blau – so nimmt die psychophysische ab.“

In meinen Augen ist das keine Erklärung. Ein neuer, nicht quantitativ faßlicher Begriff (psychophysische Energie) wird eingeführt, ein gesetzmäßiger Zusammenhang (umgekehrte Proportionalität) wird aus der Luft gegriffen. Das Phänomen ist allen sicherlich vertraut, daß Rot mehr auffällt als Grün oder Blau, und daß Blau dunkel, „licht-

⁴Gemeint sind die Lichtquanten (Photonen), deren Energie proportional zur Frequenz ist und damit umgekehrt proportional zur Wellenlänge.

schwach“, erscheint. Auf die Auffälligkeit von Rot werden wir später zu sprechen kommen, bleiben wir zunächst bei der Frage: warum ist Blau so dunkel?

Anders ausgedrückt: Welchen Vorteil hat man (im Sinne der Evolutionslehre) davon, daß man gerade die energiereichsten Lichtquanten nur relativ „dunkel“ wahrnimmt, daß also die Wahrnehmung von „blauem“ (kurzwelligem) Licht fast nicht zur Helligkeitsempfindung beiträgt? Um diese Frage beantworten zu können, müssen wir zunächst die Wirkungsweise des Farbensehens kennen.

Historische Entwicklung der Theorie

Als Newton in der zweiten Hälfte des 17. Jh. die Aufspaltung des weißen Lichts in ein farbiges Spektrum (d. h. Erscheinung, Gespenst) fand, ordnete er den Strahlen, je nach der Farbe, die sie hervorriefen, verschiedene Brechungsindizes zu. In seinem Farbkreis benennt er sieben Farben (Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett), denen er verschieden große Anteile zuordnet. Newton untersuchte die additive Farbmischung, ließ es aber bei der unendlichen Vielfalt der Farbtöne bewenden und wandte sich mehr der Optik zu.

Im 18. Jh. gewann die Auffassung an Boden, daß es nur drei Grundfarben im Licht gebe, und zwar Rot, Grün und Violett. Als Beispiel dafür wird eine von Goethe seiner Farbenlehre beigegebene Tafel gezeigt, mit der er eine (in der Allgemeinen Litteratur Zeitung, No. 31, Jena) 1792 erschienene Entgegnung auf seine „Beiträge zur Optik“ illustriert hat. Gegenübergestellt ist ein schematisches Bild dessen, was man beim Betrachten eines weißen Streifens auf schwarzem Grund durch ein Prisma sieht, mit zwei Erklärungen aus der damaligen Zeit. Die eine stammt von Green in Halle und basiert auf den Newtonschen Vorstellungen; die andere, von Wunsch in Frankfurt/Oder, benutzt nur die drei Grundfarben Rot, Grün und Violett. Die in den Kästchen stehenden Farben sind in den waagrechten Reihen additiv zu überla-

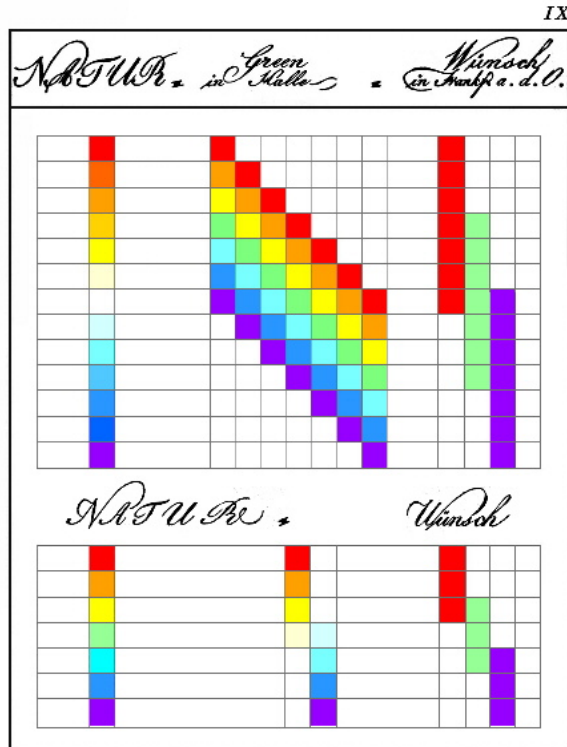


Abbildung 9: Eine Tafel aus Goethes Farbenlehre. Gegenübergestellt sind Goethes Beobachtungen, was man beim Betrachten eines breiten (oben) und eines schmalen (unten) weißen Streifens auf schwarzem Untergrund durch ein Prisma sieht, mit einer Erklärung durch Green auf der Basis von Newtons Vorstellungen, und einer von Wunsch aus dem Jahre 1792, die von den drei Grundfarben Rot, Grün und Violettblau ausgeht. (Das Bild basiert auf einer Kopie des Originals, wurde aber überarbeitet, um die Darstellung auf dem Bildschirm zu verbessern.)

gern. Dabei sollte man sich den Hintergrund aber schwarz, nicht weiß vorstellen.

Daß diese drei Farben nicht eine besondere Eigenschaft des Lichts sind, sondern durch unsere Sinnesorgane hervorgerufen werden, wurde von George Palmer noch früher, nämlich 1786, ausgesprochen, fand aber keine Beachtung (G. Walls 1956).

Th. Young, der englische Arzt und Naturforscher, vertrat 1807 diese Ansicht erneut. Zuvor (1802) hatte er als Grundempfindungen noch Rot, Gelb und Blau angenommen. Vielleicht fand er nur deshalb mehr Gehör, weil er zugleich Interferenzexperimente behandelte, die die Wellennatur des Lichts bewiesen. Damit konnten die Physiker seiner Zeit wesentlich mehr anfangen. Wegen der Wellennatur des Lichts nannte Young die entsprechenden Sinnesorgane Resonatoren, und er forderte drei Typen davon, die für rotes (d. h. langwelliges), grünes und violett Licht maximal empfindlich sein sollten: „From three simple sensations, with their combinations, we obtain several primitive distinctions of colours; but the different proportions, in which they may be combined, afford a variety of tints beyond all calculation. The three simple sensations being red, green and violet, the three binary combinations are yellow, consisting of red and green; crimson, of red and violet; and blue, of green and violet; and the seventh in order is white light, composed of all three united“ (Young 1807).

(Aus drei einfachen Empfindungen und ihren Kombinationen erhalten wir einige einfache Farbunterscheidungen; aber die verschiedenen Verhältnisse, in denen sie kombiniert werden können, haben eine unendliche Vielfalt von Farbarten zur Folge. Die drei einfachen Empfindungen sind Rot, Grün und Violett, die drei Zweierkombinationen sind Gelb, das aus Rot und Grün besteht, Karmin, aus Rot und Violett, und Blau, aus Grün und Violett: und die siebente Farbe in der Reihe ist weißes Licht, das aus allen dreien gemeinsam besteht.)

Diese Erklärung entspricht in ihren wesentlichen Zügen der heutigen Auffassung.

Allgemeine Verbreitung erlangte die Youngsche Hypothese erst durch die quantitative Beschreibung von Farbmischungsexperimenten durch Helmholtz (1852) und später Maxwell (1860), die im Lichte der Youngschen Erklärung sofort plausibel sind.

In der zweiten Hälfte des 19. Jh. erkannte man die unterschiedlichen Aufgaben von Zäpfchen und Stäbchen in der Retina, und konnte bald auch den dem Stäbchensehen zugrundeliegenden Farbstoff isolieren, der in verhältnismäßig hoher Konzentration vorhanden ist (Kühne 1878).

Die Zäpfchen beherbergen also die Youngschen „Resonatoren“, unter denen man sich Licht absorbierende Substanzen, also Farbstoffe, vorzustellen hat.

Die Frage, der sich um die Jahrhundertwende (19./20. Jh.) viele Forscher zuwandten, war die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeitskurven für die drei Youngschen Rezeptortypen. Ohne auf die Details eingehen zu können, sei nur gesagt, daß sie sich aus den an einer großen Zahl von Versuchspersonen gesammelten colorimetrischen Daten nicht eindeutig bestimmen lassen.

Es war Arthur König, der hier den Ausweg aufzeigte: Er nahm an, daß den Rot-Grün- und den Blau-Gelb-Blinden jeweils einer der drei Farbstoffe fehle, und daß zweitens die beiden verbleibenden Farbstoffe mit denen von Normalsichtigen übereinstimmen (König & Dieterici 1892). Aus der Youngschen Theorie folgt mit den Annahmen von König, daß es zwei Arten von Rot-Grün-Blindheit geben solle, und dies wird tatsächlich beobachtet. (Von beiden Formen der Farbblindheit ist jeweils etwa ein Prozent der männlichen Bevölkerung betroffen. Totale Farbenblindheit durch Ausfall zweier oder aller Zäpfchenarten wird sehr selten ebenfalls beobachtet.) Heute nennt man die drei Arten von Farbfehlsichtigkeit, bei denen der auf lang-, mittel- und kurzwelliges Licht empfindliche Rezeptortyp ausfällt, Protanopie, Deutanopie, Tritanopie (wissenschaftsgriechisch: erste, zweite, dritte Blindheit).

Wegen der individuellen Unterschiede auch bei Farbnormalsichtigen, die auf unterschiedlicher Pigmentierung, vielleicht sogar auf dem Vorkommen geringfügiger Unterschiede in den Rezeptorfarbstoffen selbst beruhen, sind allerdings die Ergebnisse der Untersuchungen an Farbenblinden nicht so eindeutig, wie es wünschenswert wäre; so blieb ein gewisser Spielraum für die Vorliebe der einzelnen Forscher.

Die Grundempfindungskurven

Wir müssen zwischen dem Sehen bei Helligkeit (Tagessehen, photopisches Sehen) und dem bei sehr schwachem Licht (Nachtsehen, skotopisches Sehen) unterscheiden. Die Sinneszellen für das Sehen bei Nacht sind die Stäbchen in der Netzhaut. Diese werden bei Helligkeit abgeschaltet, sie liefern keinen Beitrag zum Farbsehen. Bemerkenswert ist, daß sich die relative Helligkeitsempfindung für die verschiedenen Farben beim Nachtsehen deutlich von der des Tagessehens unterscheidet. Bei sehr schwacher Beleuchtung (wenn keine Farben mehr gesehen werden) erscheint z.B. Dunkelblau heller als ein leuchtendes Orange (Purkinje-Effekt).

Inzwischen weiß man sehr viel über die Lichtrezeptoren in der Netzhaut. In den Stäbchen wird das Licht durch einen Farbstoff, den Sehpurpur (Retinol), absorbiert, der so reichlich vorhanden ist, daß die Netzhaut rosafarben erscheint. Die Absorption eines Lichtquants durch ein Retinolmolekül führt zunächst zu einer Formänderung des Moleküls, die am Anfang einer Kette von chemischen Reaktionen steht, die schließlich einen Nervenimpuls auslöst. Die Absorptionskurve des Retinols stimmt gut mit der Empfindlichkeitskurve für das skotopische Sehen überein.

Nach dem heutigen Stand der Erkenntnis leiten sich die in den drei Zapfenarten vorhandenen Farbstoffe alle vom Retinol ab, das an Eiweißstoffe gebunden ist, wobei die verschiedenen Arten der Einbindung die Ursache für die verschiedenen Resonanzfrequenzen sind. Al-

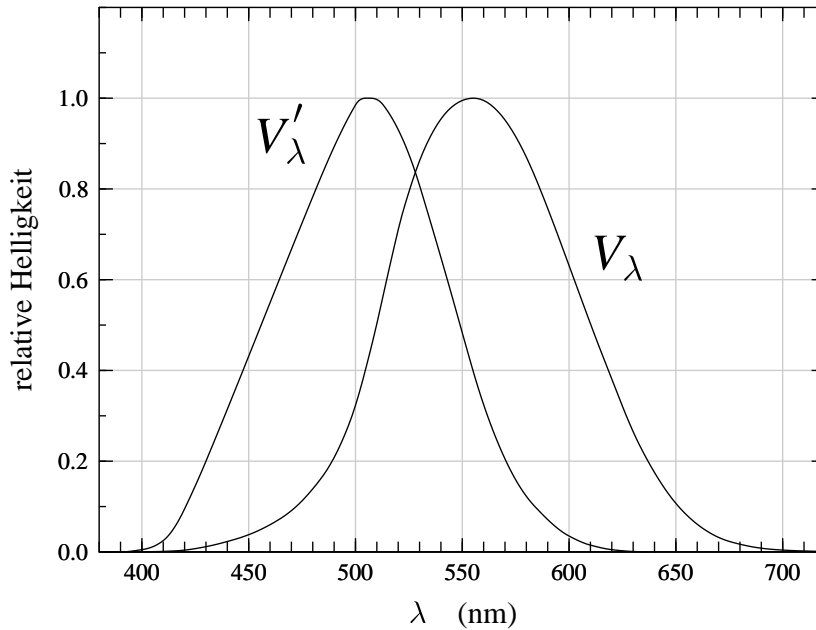


Abbildung 10: Die relative Helligkeitsempfindlichkeit für Tages- und Nachtsehen

lem Anschein nach sind die Empfindlichkeitskurven, genauer: die Lage der Maxima, im Zuge der Evolution optimiert worden.

Bild 11 zeigt die Empfindlichkeitskurven der drei Zäpfchenarten in der Netzhaut des menschlichen Auges. Die drei Kurven wurden aus den Norm-Spektralwertkurven mit Hilfe von zusätzlichen Daten über Farbenblindheit errechnet. Sie können als Mittelwerte gelten, genommen über eine große Anzahl von Versuchspersonen.

Für den Unvoreingenommenen ist dieses Bild zunächst einmal überraschend. Man hätte drei voneinander deutlich getrennte Glockenkur-

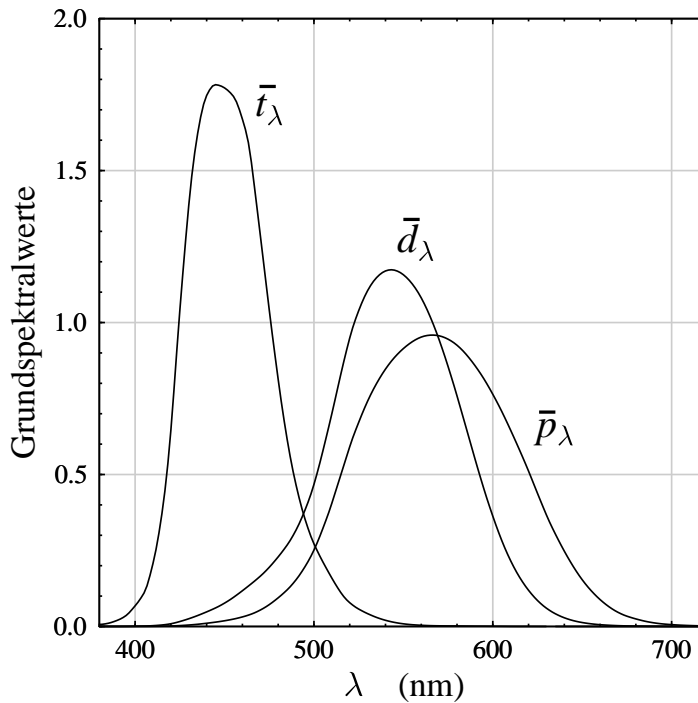


Abbildung 11: Die Empfindlichkeitskurven der drei Zäpfchenarten in der menschlichen Retina.

ven erwartet (wie man sie auch bei Karpfen und Karauschen vorfindet), statt dessen überlappen sich die den Eindruck „Rot“ vermittelnde p-Empfindlichkeitskurve mit der „Grün“ vermittelnden d-Kurve sehr stark. Die „Blau“ vermittelnde t-Kurve ist von den beiden anderen deutlich getrennt. Was ist der Vorteil dieser Anordnung gegenüber der zunächst plausibleren?

Teilt man die Helligkeits-Empfindlichkeitskurve V_λ (mit dem Maximum von 1) auf die drei Mechanismen auf, so findet man, daß die

Maxima der drei Anteile 0,54 (rot, p), 0,58 (grün, d) und 0,018 (blauviolett, t) betragen (Wald 1946). Daraus kann man ablesen, daß die rot- und grünvermittelnden Zäpfchen ungefähr gleichstark zur Helligkeitsempfindung beitragen, die blauviolett-vermittelnden aber nur etwa mit einem Prozent! Warum so wenig?

Der Grund für die Unterdrückung des Blauviolett-Beitrags zur Helligkeit dürfte der gleiche sein, der einen nur geringen Unterschied zwischen p_λ und d_λ zum Vorteil macht, nämlich die Farbfehler in Hornhaut und Linse. Wegen dieser Farbfehler ist Scharfeinstellung exakt nur für eine Wellenlänge möglich. Der Unterschied in der Brechkraft von Hornhaut und Linse zusammen für 578 nm und für 450 nm beträgt ziemlich genau eine Dioptrie! (Wysecki & Stiles 1967).

Es mag erstaunen, daß die Farbfehler existieren, denn man nimmt sie normalerweise nicht wahr. Aber Auge und Gehirn tun ihr bestes um alle störenden Einflüsse vom Bewußtsein fernzuhalten. In seinen berühmten Brillen-Experimenten hat Ivo Köhler in den Fünfziger- und Sechzigerjahren des vorigen Jahrhunderts Versuchspersonen mit Prismenbrillen ausgestattet, die alle Gegenstände mit Farbsäumen erscheinen ließen (nach Brillen, die das Bild auf den Kopf stellten und solchen, die links und rechts vertauschten). Auch an diese Brillen konnten sich die Versuchspersonen nach einiger Zeit gewöhnen und sahen dann keine Farbsäume mehr. Doch nach dem Abnehmen der Brillen waren die Farbsäume – jetzt umgekehrt – wieder da.

Man kann die Farbfehler sichtbar machen, wenn man ihr Erscheinungsbild verändert: deckt man mit der dicht vors Auge gehaltenen Hand den größten Teil der Pupillenöffnung ab, so wirkt der Randbereich von Hornhaut und Linse wie ein Prisma, das das Licht aufspaltet. Betrachtet man auf diese Weise einen auf eine Leinwand projizierten Lichtstreifen (oder ein anderes geeignetes Objekt), so sieht man an dem Streifen auf einer Seite einen schmalen rot-gelben, auf der anderen einen schmalen dunkelblau-hellblauen Saum.

Wegen dieser Farbfehler ist es günstig, wenn die Maxima von \bar{p}_λ

und \bar{d}_λ nicht weit auseinanderliegen, dann ist eine mittlere Einstellung für beide Mechanismen gut, nicht aber für den t-Mechanismus. Das blauviolette Netzhautbild ist daher zu unterdrücken, wenn die Bildschärfe nicht beeinträchtigt werden soll, denn bei Scharfstellung für p und d ist es unscharf! Die Eigenschaft von Violettblau, dunkel, und von Gelb (gleich Weiß minus Violettblau), hell zu sein, kann man somit aus der Wirkungsweise unserer Augen als vorteilhaft einsehen.

Mensch und Farbe

Die einzelnen Farben

Die Eigenschaften der Farben, wie sie der Maler kennt, sind viel weniger Eigenschaften der Farbstoffe als des Gesichtssinnes, die sich in unseren Empfindungen äußern.

Der auffallend enge Farbbereich des Gelben sowohl in einem durch Mischung erzeugten, empfindungsmäßig gleichabständigen Farbkreis als auch in dem Spektralband hat seine Ursache in den physiologischen Gegebenheiten: Gelb ist die Verschlüsselung für „keine oder geringe Erregung der Blauviolett-Rezeptoren, Erregung der Rot- und Grün-Rezeptoren gleichstark (d. h. wie bei Weiß)“, die Verschlüsselung für „Weiß minus Blau“ sozusagen. Die Empfindung „Grün“ dagegen bedeutet: „Die Erregung der Rezeptoren für mittlere Wellenlängen überwiegt die beiden anderen“, und dies ist natürlich in verschiedenen Verhältnissen möglich, während Gleichheit nur bei einem Verhältnis, 1:1, gegeben ist.

Genau genommen gilt die oben geforderte Gleichheit nur näherungsweise. Die Empfindung „reines Gelb“ wird ausgelöst, wenn die Remission einer betrachteten Fläche im kurzwelligen Bereich klein ist, aber im längerwelligen Bereich nahezu hundertprozentig, wie im Fall von Weiß. Da sich die Empfindlichkeitskurven der drei Zapfenarten überlappen, bedeutet dies aber auch für die grün-vermittelnden Zap-

fen eine Einbuße, wenn der kurzwellige Bereich ausfällt.

Wird dagegen von einer Fläche nur Licht kurzer Wellenlängen ins Auge reflektiert, so daß die blauviolett-vermittelnden Zapfen etwa gleichstark wie bei Weiß erregt werden, die anderen beiden Arten dagegen nur schwach, so ist die Empfindung „Blau“. Wegen der Überlappung der Empfindlichkeitskurven werden dabei aber die grünvermittelnden Zapfen doch schon nennenswert mitangeregt. Blau ist sozusagen „Violettblau mit etwas Grün“. Die Empfindung, die einer Erregung der t-Zapfen allein entspricht, ist sehr selten, kommt unter natürlichen Gegebenheiten praktisch nie vor. Es wäre für jeden Organismus unzweckmäßig, eine nicht vorkommende Farbe als Ur-Farbempfindung zu haben, wenn wir unterstellen, daß den Urfarben besonders gute Erkennbarkeit zukommt.

Die Urfarben Gelb und Blau sind komplementär (d. h. die additive Mischung gibt Weiß, oder die Mischung mit dem Farbkreiselpaar neutrales Grau). Die Urfarben Rot und Grün dagegen sind kein komplementäres Paar. Ihre Mischung mit dem Farbkreiselpaar kann in keinem Verhältnis auf Neutralgrau führen.

Gelb nimmt unter den „subtraktiven Primärfarben“ Gelb, Grünblau und Purpur eine Sonderstellung ein, indem es einmütig von allen als Grundempfindung anerkannt wird, da es keine Ähnlichkeit mit Rot und Grün hat. Dagegen ist bei Grünblau und Purpur die Zwischenstellung empfindungsmäßig selbstverständlich.

Subjektive Unterschiede

Bei der Besprechung der Farben sollten wir aber nie vergessen, daß es sich um sehr subjektive Phänomene handelt, trotz vielfacher Übereinstimmung in ihrer Beurteilung. Die fruchtlose Auseinandersetzung, ob eine bestimmte Farbe ein grünliches Blau oder eher Blaugrün ist, kann ihre Ursache in verschieden starker Gelbfärbung der Linse haben.

Josef Albers⁵ zeigte sich enttäuscht darüber, daß in seinen Malklassen so schlechte Ergebnisse beim Helligkeitsvergleich verschiedener Farben erzielt wurden (60% „falsche“ Antworten). Der Maler zeigt sich enttäuscht, aber dem Physiker sind die gleichen Schwierigkeiten wohlbekannt. Die Enttäuschung des Malers rührt von der Annahme her, daß es hier eine objektiv richtige Antwort gäbe; die Physiker haben schon lange resigniert und die Vielfalt von in ihrem Urteil voneinander abweichenden Beobachtern für farbmetrische (und photometrische) Zwecke durch einen fiktiven Normalbeobachter ersetzt. Dessen Helligkeits„empfindung“ ist genau festgelegt und entspricht etwa dem Mittelwert von wirklichen Beobachtern, sein Auge erfährt keine Farbumstimmung im Gegensatz zu allen anderen, für die der Helligkeitsunterschied verschiedener Farben von der momentanen Disposition des Auges abhängt, die wiederum durch das Betrachten großflächiger bunter Papiere beeinflusst wird. Außerdem hat natürlich auch die Beleuchtungsart ihren Einfluß.

⁵1888–1976; Maler und Kunstpädagoge. 1923 bis zur Schließung 1932 Lehrer am Bauhaus, 1933–49 am Black Mountain College in Ashville (N.C.), ab 1950 an der Yale University