Farbe und Licht
Kompendium

Ulrich Bachmann / Marion Bernhardt

Das Kompendium beschreibt und visualisiert Farb- und Licht-Begriffe. Ziel ist es, die Zusammenhänge zum Thema Farbe und Licht wissenschaftlich darzustellen. Das gesamte Kompendium findet sich auf der DVD-ROM der multimedialen Publikation »Farbe und Licht«. Eine Auswahl wird auch im Buch vorgestellt.
Jeder Begriff ist auf einer bis zwei A4-Seiten im Querformat dargestellt und kann als PDF ausgedruckt werden. Die einzelnen Seiten oder Ausschnitte können auch mit dem Beamer für Unterrichtszwecke projiziert werden. Das Kompendium hat drei Schwerpunkte: Gestaltung, Physik/Technik/Chemie und Biologie.
Die Begriffe sind nach inhaltlichen Kriterien geordnet und fassen oft untergeordnete Begriffe zusammen. Sämtliche Begriffe sind im Index alphabetisch aufgeführt.
Das Kompendium ist im Rahmen des Forschungsprojekts FarbLicht-Labor (2005/2006) der Zürcher Hochschule der Künste entstanden und richtet sich an Lehrende, Studierende und andere Farbinteressierte.

Konzeption/Realisation: Marion Bernhardt
Illustration: Marion Bernhardt, Jecca Reichmuth
Layout: Florian Bachmann
Fotos: Mik Gruber
Redaktion: Cecilia Hausheer
Lektorat: Kirstin Meditz
Übersetzungen: John Southard
Projektleitung: Ulrich Bachmann

INHALTSVERZEICHNIS

Informationen – Kompendium
Inhaltsverzeichnis
Alphabetisches Inhaltsverzeichnis

GESTALTUNG
K01 Farbe
K02 Farbmetrik
K03 CIE-Farbtafel
K04 Additive Farbmischung
K05 Subtraktive Farbmischung
K06 Farbunterscheidungsmerkmale I
K07 Farbunterscheidungsmerkmale II
K08 Erscheinungsfarben

PHYSIK, TECHNIK, CHEMIE
K09 Farbe (physikalisch)
K10 Lumineszenz
K11 Farbtemperatur
K12 Substanzfarben
K13 Pigmente
K14 Bindemittel
K15 Farbstoffe
K16 Licht (physikalisch)
K17 Wellen-Modell des Lichts
K18 Teilchen-Modell des Lichts
K19 Brechung
K20 Interferenzfarben
K21 Polarisation
K22 Filter
K23 Dichroidfilter
K24 Geometrische Optik
K25 Sammellinse
K26 Dispersion
K27 Kantenspektren
K28 Schatten
K29 Lichtstreuung
K30 Farbdruck: CMYK
K31 Bildschirm: RGB
K32 Beamer
K33 LED (Light Emitting Diode)
K34 Weißabgleich
K35 Physikalische Werte und Einheiten

BIOLOGIE
K36 Farbensehen
K37 Visuelle Wahrnehmung
K38 Sehbahn
K39 Farbverarbeitung im Gehirn
K40 Farbkonstanz
K41 Licht (biologisch)
K42 Lichtsinn
K43 Auge
K44 Augentypen
K45 Menschliches Auge
K46 Absorptionsspektrum
K47 Lichtsinneszelle
K48 Menschliche Lichtsinneszellen
K49 Stäbchen
K50 Zapfen
K51 Stäbchen – Zapfen im Vergleich
K52 Lichtreaktion
K53 Lichtsignal
K54 Purkinje-Phänomen
K55 Drei-Farben-Theorie
K56 Vier-Farben-Theorie
K57 Farbenblindheit auf Netzhautebene
K58 Komplementäres Nachbild
K59 Adaptation
K60 Netzhaut
K61 Netzhautaufbau
K62 Sehgrube
K63 Akkommodation
K64 Sakkadische Augenbewegungen
K65 Rezeptive Felder
K66 Optisch partitive Farbmischung
K67 Kontrast-Verstärkung
K68 Simultankontrast
K69 Assimilation
K70 Farbige Schatten – gefärbte Schatten

Index
Bildquellen

ALPHABETISCHES INHALTSVERZEICHNIS

A Absorptionsspektrum K46
Adaptation K59
Additive Farbmischung K04
Akkommodation K63
Assimilation K69
Auge K43
Augentypen K44
B Beamer K32
Bildschirm: RGB K31
Bindemittel K14
Brechung K19
C CIE-Farbtafel K03
D Dichroidfilter K23
Dispersion K26
Drei-Farben-Theorie K55
E Erscheinungsfarben K08
F Farbdruck: CMYK K30
Farbe K01
Farbe (physikalisch) K09
Farbenblindheit auf Netzhautebene K57
Farbensehen K36
Farbige Schatten – gefärbte Schatten K70
Farbkonstanz K40
Farbmetrik K02
Farbstoffe K15
Farbtemperatur K11
Farbunterscheidungsmerkmale I K06
Farbunterscheidungsmerkmale II K07
Farbverarbeitung im Gehirn K39
Filter K22
G Geometrische Optik K24
I Interferenzfarben K20
K Kantenspektren K27
Komplementäres Nachbild K58
Kontrast-Verstärkung K67
L LED (Light Emitting Diode) K33
Licht (biologisch) K41
Licht (physikalisch) K16
Lichtreaktion K52
Lichtsignal K53
Lichtsinn K42
Lichtsinneszelle K47
Lichtstreuung K29
Lumineszenz K10
M Menschliche Lichtsinneszellen K48
Menschliches Auge K45
N Netzhaut K60
Netzhautaufbau K61
O Optisch partitive Farbmischung K66
P Physikalische Werte und Einheiten K35
Pigmente K13
Polarisation K21
Purkinje-Phänomen K54
R Rezeptive Felder K65
S Sakkadische Augenbewegungen K64
Sammellinse K25
Schatten K28
Sehbahn K38
Sehgrube K62
Simultankontrast K68
Stäbchen K49
Stäbchen – Zapfen im Vergleich K51
Substanzfarben K12
Subtraktive Farbmischung K05
T Teilchen-Modell des Lichts K18
V Vier-Farben-Theorie K56
Visuelle Wahrnehmung K37
W Weißabgleich K34
Wellen-Modell des Lichts K17
Schatten
Z Zapfen K50

K01 FARBE

Zum Thema Farbe haben Künstler und Gestalter, Physiker, Chemiker, Biologen, Psychologen, Philosophen und andere viele wichtige Beiträge geleistet.[1] Newton gelang als Erstem eine physikalische Untersuchung des Sonnenlichtes. Sein bekanntestes wissenschaftliches Experiment ist die Zerlegung von weißem Licht durch ein Glasprisma in die Regenbogen-Farben. Goethe war Newtons stärkster Kritiker. Er hatte einen phänomenologischen Zugang zur Farbe. Aus heutiger Sicht haben beide wichtige Erkenntnisse gewonnen, die sich sehr wohl miteinander vereinbaren lassen.

Farbe ist ein Phänomen, das eine physikalische, eine physiologische und psychologische Komponente hat. Die physikalische Eigenschaft von Oberflächen ist das Absorbieren und Reflektieren von Licht. Welcher Art dieses Licht ist, hängt von der spektralen Zusammensetzung der beleuchtenden Lichtquelle ab. Sie ist entscheidend für jede Farbwirkung. Dieser physikalische Anteil der »Farbe« ist der »Farbreiz«. Gereizt werden die Lichtsinneszellen im Auge des Betrachters. Das, was Farbe innerhalb der Sinneszellen auslöst, ist ihr physiologischer Anteil. Dieser Aspekt der Farbe wird »Farbvalenz« genannt. Durch die Übermittlung der Signale der Lichtsinneszellen über den Sehnerv ans Gehirn werden »Farbempfindungen« ausgelöst. Dies ist die psychologische Komponente der »Farbe«.

Jede Farbe wird zudem charakterisiert durch ihren Farbton (Buntart), ihre Sättigung und Helligkeit.

1 Vgl. John Gage: *Kulturgeschichte der Farbe. Von der Antike bis zur Gegenwart.* London 2003.

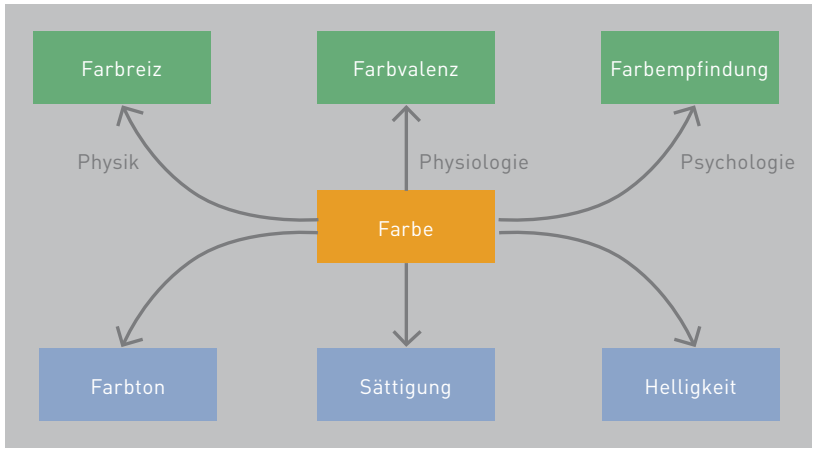


Abb. Charakterisierungsschema der Farbe nach ihren Komponenten

K02 FARBMETRIK[1]

Für viele technische Anwendungen ist eine präzise Messung und Benennung von farbigem Licht unerlässlich. Dies ist Aufgabe der Farbmetrik. Exemplarische technische Anwendungen sind Computerbildschirme, Farbfernseher, Digitalkameras. Die Addition von farbigem Licht, wie sie die additive Farbmischung ermöglicht, bildet die Grundlage für eine genaue Farb-Kommunikation.

Mit spektrophotometrischen Geräten wird physikalisch bestimmt, welche Lichtwellen von einer Probe zurückgeworfen oder hindurchgelassen werden. Genau messbar ist auch die Zusammensetzung des verwendeten, eingestrahlten Lichtes. Diese beiden Werte charakterisieren den Farbreiz. Sie werden für das gesamte sichtbare Spektrum bestimmt, d.h. von 380 bis 760 Nanometer. Farbreize sind objektiv und daher sehr gut in Maßzahlen definierbar.

Eine weitere Größe der Farbmetrik ist die Farbvalenz, also die physiologische Auswirkung eines Farbreizes im Auge des Betrachters. Man spricht synonym von Farbe und Farbvalenz. Sie ist eine mathematisch fassbare Größe mit drei Dimensionen und daher räumlichem Charakter. Ihre Dimensionen sind die drei Ausgangsfarben Rot, Grün, Blau der additiven Farbmischung, wie sie aus der Drei-Farben-Theorie hervorgehen. Sie stellen den RGB-Farbraum dar. Einzelne Farbvalenzen haben immer Rot-, Grün- und Blauanteile, die man ihre Farbwerte nennt. Auch sie lassen sich genau berechnen.

Farbreiz, Farbvalenz und Farbwerte sind genau definierbar und eignen sich für den rechnerischen Umgang mit der Farbe in der Farbmetrik.

1 Vgl. G. A. Agoston: *Color Theory and its Application*. In: Art and Design, second completely revised and updated edition. Berlin, Heidelberg 1987, S. 47 – 65 u. 66 – 104.
Vgl. Günter Wyszecki: *Farbsysteme*. Göttingen, Berlin, Frankfurt 1960, S. 21 – 37.
Vgl. Stephen E. Palmer: *Vision Science. Photons to Phenomenology*. Massachusetts Institute of Technology 1999, S. 689 – 700.

K03 CIE-FARBTAFEL

Basierend auf den Gesetzmäßigkeiten der additiven Farbmischung, d.h. der Mischung von Lichtwellen unterschiedlicher Länge, ist der so genannte CIE-Farbraum definiert worden. Er ist nach der internationalen Beleuchtungskommission Commission Internationale de l'Éclairage »CIE« benannt. Dieser normierte Farbraum wurde aus praktischen Gründen notwendig, da man einige additive Lichtmischungen, die spektralrein und damit hoch gesättigt sind, nicht als einfache Summe der drei Ausgangsfarben Rot, Grün und Blau erzeugen kann. Man hat daher durch mathematische Umformung virtuelle Ausgangsfarben definiert und nannte sie an Stelle von Rot, Grün und Blau X, Y, Z.[1] Dabei ist X das virtuelle Rot, Y das virtuelle Grün und Z das virtuelle Blau. Aus diesen drei können nun alle physikalisch existierenden Farben (Farbvalenzen) dargestellt werden.

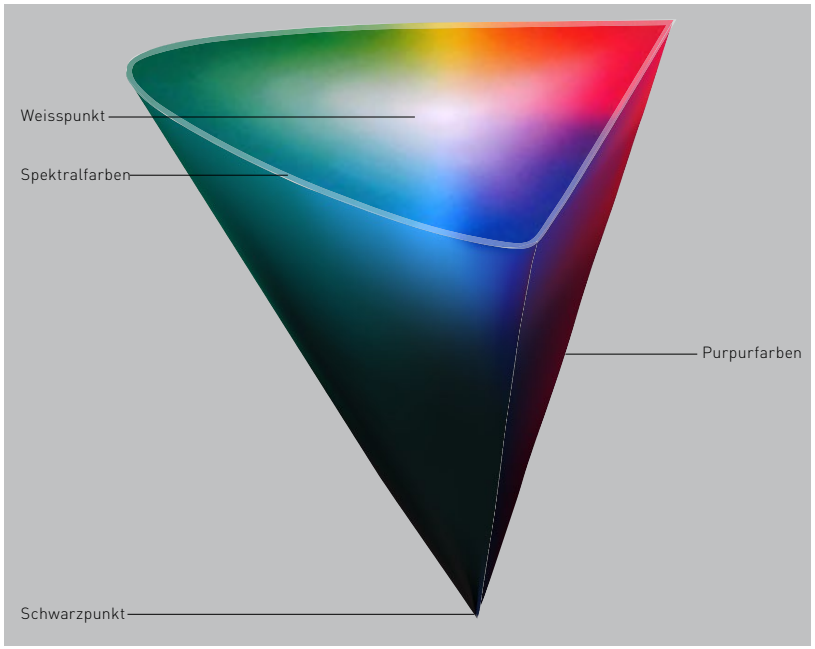
Im weiteren legte die CIE-Kommission einen aus 17 Personen gemittelten so genannten Standard-Normalbeobachter ihren Messungen zu Grunde. Die Untersuchung beschränkte sich zunächst nur auf das allein mit der Sehgrube wahrgenommene Scharfsehen bei hellem Tageslicht. Später erweiterte man das Blickfeld auf 10 Grad.

Im CIE-Farbraum sind die Farben als Teile eines Farbkörpers geordnet. (Abb. 1) Dieser hat die Form eines Kegels, der an einer Seite abgeflacht ist. Er steht auf dem Kopf mit der Spitze nach unten. Die Kegelspitze liegt im Schwarzpunkt, dem Ursprung der Ausgangsfarben und aller anderen Farben. Der Farbkörper hat eine gekrümmte Mantelfläche, auf der die Spektralfarben liegen und eine ebene Seitenfläche, auf der die Purpurfarben liegen. Dieser gedachte Körper steht modellhaft hinter der hufeisenförmigen CIE-Farbtafel. (Abb. 2)

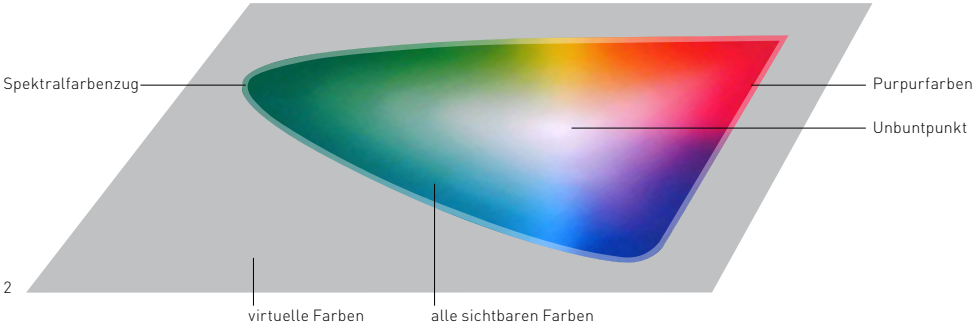
Fällt der Boden des Farbkörpers mit dem neutralen Weiß zusammen, also dem Unbuntpunkt, so ergibt die Summe der Werte von Rot, Grün und Blau den Wert 1.[2] Der Unbuntpunkt bildet den Mittelpunkt

Abb. 1 Farbkörper im CIE-Farbraum. Alle Farben entspringen dem Schwarz. Jede beliebige Farbenart liegt im Inneren des Farbkörpers. Die Purpurfarben liegen auf einer ebenen Seitenfläche, die Spektralfarben auf der gekrümmten Mantelfläche.

Abb. 2 Der Boden des Farbkörpers liegt auf der Höhe von Weiß. Innerhalb der umschlossenen Fläche liegen alle sichtbaren Farben, außerhalb nur virtuelle. Spektralfarbenzug und Purpurgerade sind angegeben.



1



2

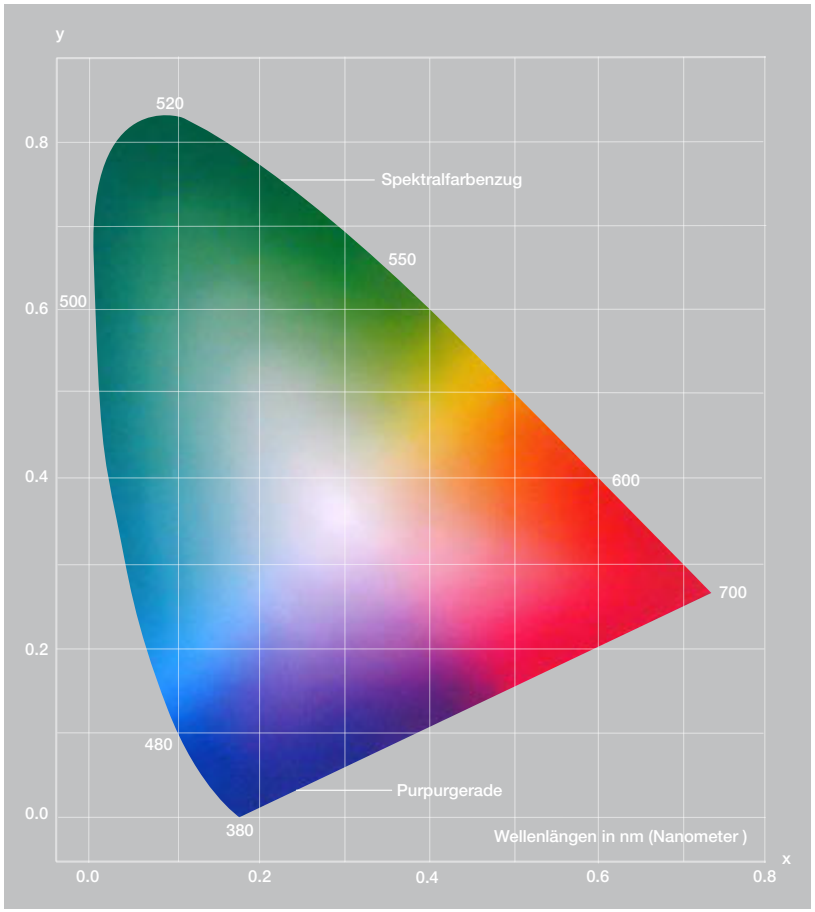
der hufeisenförmigen Bodenfläche des Farbkörpers. Er liegt beim Wert 0.333 für alle Variablen. Diese Fläche ist das eigentliche CIE-Diagramm. (Abb.3) Es beinhaltet die normierten Variablen x und y. Auf dem CIE-Diagramm fehlt das kleine z. Es lässt sich bestimmen, wenn man x und y vom Wert 1 subtrahiert.

Die hufeisenförmige Linie, auf der die Spektralfarben liegen, wird als Spektralfarbenzug bezeichnet und die Gerade als Purpurgerade. Alle Farben, die bei einer bestimmten Beleuchtung sichtbar sind, werden von ihnen umschlossen.

Farben werden mathematisch mit CIE-Angaben definiert, beispielsweise CIE(x,y,Y)CIEILLD$_{65}$. Hier ist CIEILLD$_{65}$ die Angabe einer Normlichtquelle mit einer Farbtemperatur von 6500 Kelvin. Der x und y Wert ergeben den Anteil an Rot und Grün. Durch einfaches Subtrahieren dieser beiden Werte von 1 ergibt sich z, der Blau-Anteil der angegebenen Farbe. Da die Farbtafel auf der Höhe 1 liegt, macht sie keine Angabe über die Helligkeit einer Farbe. Der Wert Y repräsentiert die Helligkeitsempfindlichkeit der grünen Lichtsinneszellen beim Tages-Sehen. Daher ist der Wert für das virtuelle Grün Y eine Referenz für die Helligkeit.

Vermindert sich die Helligkeit, wird die CIE-Farbtafel innerhalb des Farbkörpers zum Schwarzpunkt verschoben. Dabei ändert sich die Lage der einzelnen Farben relativ zueinander nicht, alle »Farborte« bleiben erhalten. Eine Farbenart ist durch ihre genaue Lage innerhalb des CIE-Farbkörpers definiert. Multipliziert man sie mit einem Helligkeitswert, erhält man eine bestimmte Farbvalenz oder Farbe. Die Farbenart ist es, die eine Farbe unabhängig von der Beleuchtung bestimmt. Der wahrgenommene Farbton entsteht aus der Multiplikation der Farbenart mit dem Helligkeitswert.

Abb. 3 CIE-Farbtafel.



Mit der CIE-Farbtafel lassen sich auch Mischungen von farbigem Licht nachvollziehen. Wenn zwei Farborte über eine Gerade verbunden werden, liegen auf ihr alle möglichen Mischungen. Wenn beispielsweise von einer Spektralfarbe eine Gerade durch den Unbuntpunkt gezogen wird, dann findet sich ihre jeweilige Komplementärfarbe im Schnittpunkt mit der gegenüberliegenden Linie. Mit anderen Worten: Zusammen ergeben Komplementärfarben weißes Licht. Nähert man sich dem Unbuntpunkt auf der Farbtafel, so nimmt die Farbsättigung gegen Null ab. Wandert man dagegen vom Unbuntpunkt zum Spektralfarbenzug oder zur Purpurgeraden, so nimmt die Farbsättigung bis zu 100% zu. Spektralreines monochromatisches Licht hat eine Sättigung von 100%.

Ein Bildschirm arbeitet ebenfalls mit der Lichtmischung der drei Ausgangsfarben Rot, Grün, Blau. Man kann ihre Lage auf der CIE-Farbtafel einzeichnen und erhält ein Dreieck. In der Dreiecksfläche eingeschlossen finden sich alle Farben, die vom Bildschirm angezeigt werden können.

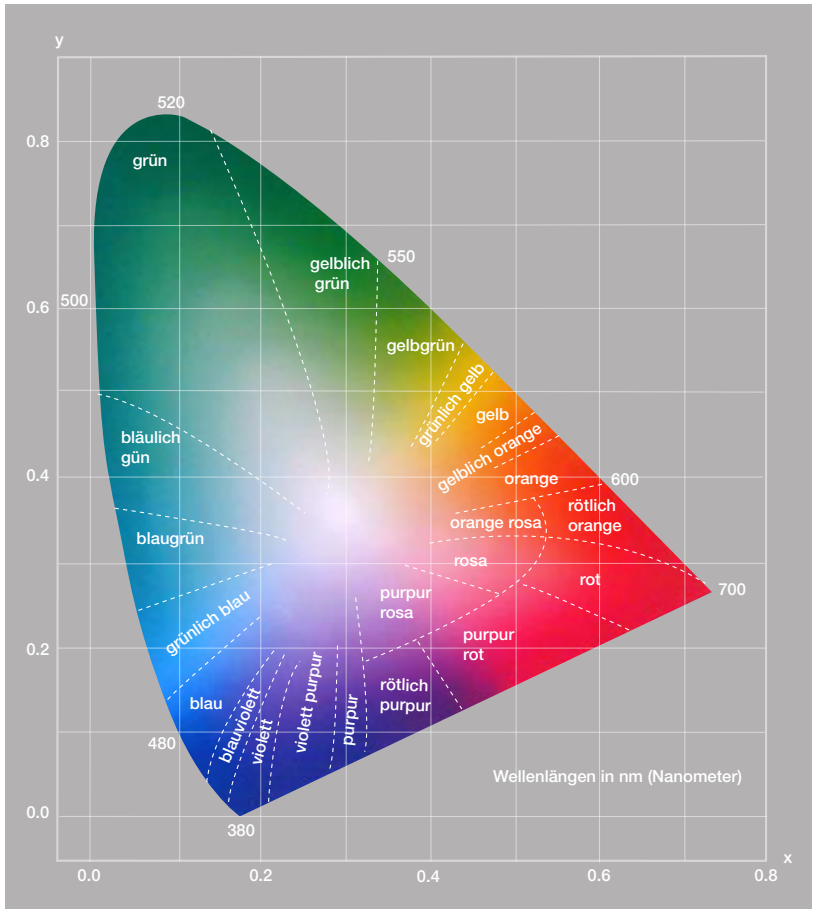
Der Farbumfang, mit dem hingegen ein Vierfarbdrucker arbeitet, lässt sich als Polygon im CIE-Diagramm darstellen. Legt man das Dreieck des Bildschirms über das Polygon des Druckers, so sieht man, dass nicht alle

Farben druckbar sind, die der Bildschirm darstellt und umgekehrt, Farben gedruckt werden können, die auf dem Bildschirm nicht wiedergegeben werden können.

1 Vgl. G. A. Agoston: *Color Theory and its Application*. In: Art and Design, second completely revised and updated edition. Berlin, Heidelberg 1987, S. 47 – 65 und 66 – 104.
Vgl. Günter Wyszecki: *Farbsysteme*. Göttingen, Berlin, Frankfurt 1960, S. 21 – 37.
Vgl. Stephen E. Palmer: *Vision Science. Photons to Phenomenology*. Massachusetts Institute of Technology 1999, S. 689 – 700.

2 Vgl. Wyszecki, *Farbsysteme*, a.a.O, S. 30.

Abb. 4 CIE-Farbtafel mit Farbnamen



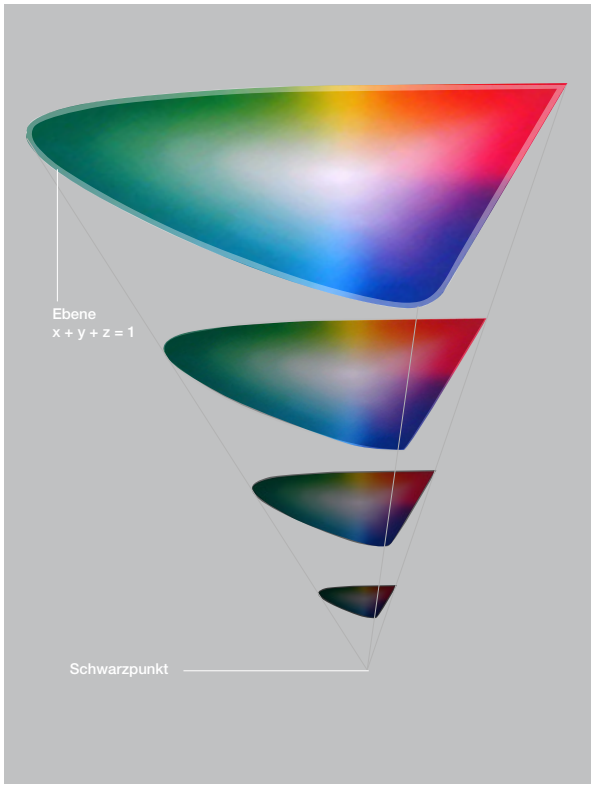


Abb. 5 Abdunklung als Verschiebung der Farbtafel gegen den Schwarzpunkt. Die Farborte ändern sich nicht, nur die Helligkeit.

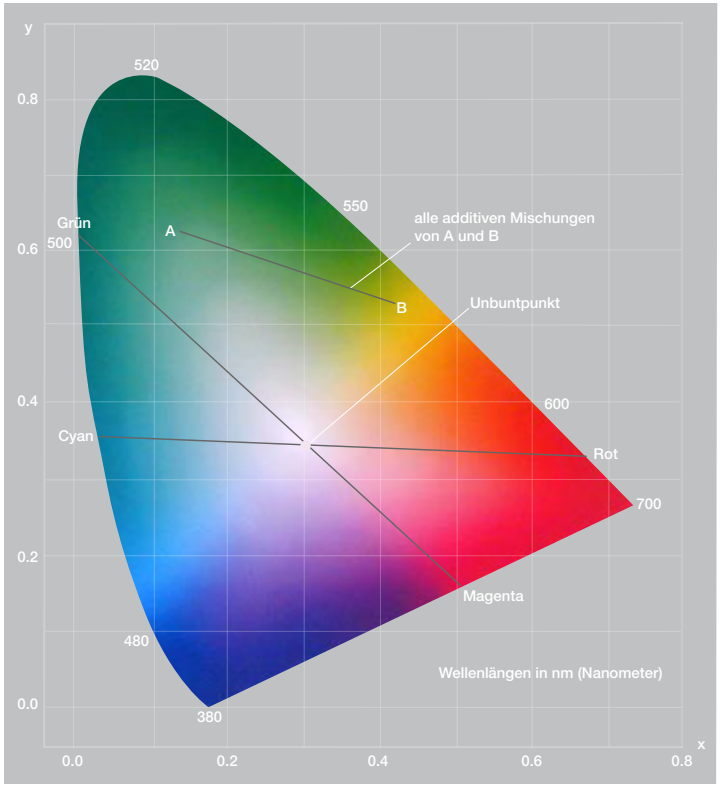


Abb. 6 Verbindungsgeraden der Farben A und B, der Komplementärfarben Grün und Magenta, Cyan und Rot als Beschreibung der additiven Farbmischung

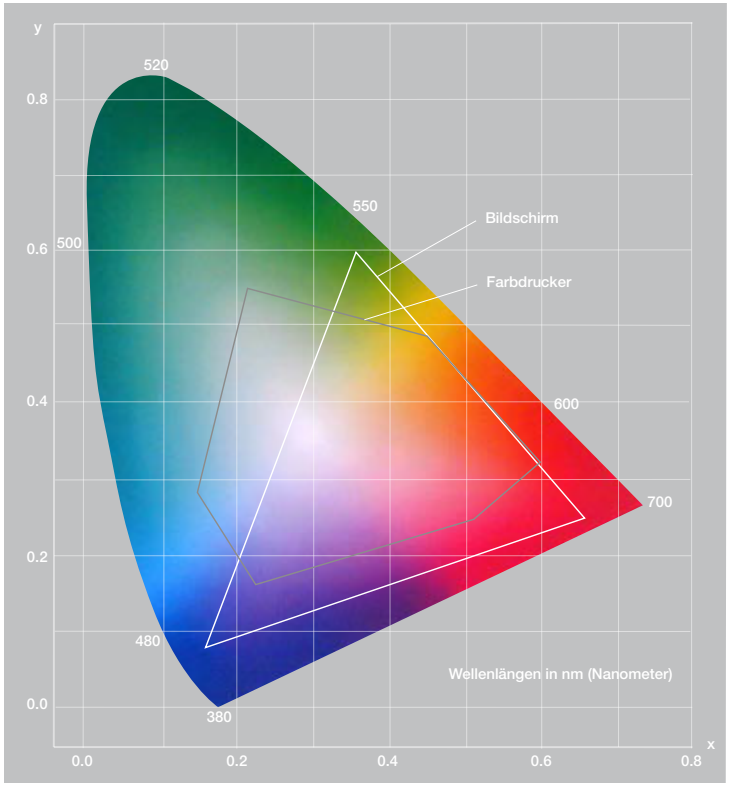


Abb. 7 Der Farbumfang eines Bildschirms im Vergleich zu einem Farbdrucker.

K04 ADDITIVE FARBMISCHUNG

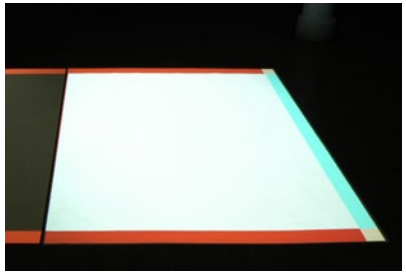
Wenn sich Lichtwellen unterschiedlicher Länge überlagern, addieren sich die Werte ihrer Spektren. Daher wird von additiver Farbmischung gesprochen. Sie ist mathematisch gut beschreibbar, im Gegensatz zur subtraktiven Farbmischung, bei der es zu Wechselwirkungen mit der farbigen Substanz kommt. Die additive Farbmischung basiert auf reinem Licht, das ohne Wechselwirkung addiert wird.

Je mehr unterschiedliches farbiges Licht addiert wird, umso mehr nähert sich die Mischung dem weißen Licht. Umgekehrt lässt sich weißes Licht durch ein Prisma in alle Spektralfarben zerlegen. Um weißes, unbuntes Licht zu erzeugen, sind nur drei verschiedene Lichtwellen nötig. Es sind dies Lichtwellen, die nicht durch Mischung entstanden sind. Für technische Zwecke legt man genau fest, dass es ein bestimmtes Rot, Grün oder Blau sein muss. Diese drei Ausgangsfarben bilden die mathematische Grundlage der Farbmetrik.[1] Deren Mischungen umfassen alle auf einem Bildschirm darstellbaren Farben. Für sie gilt folgende Formel:

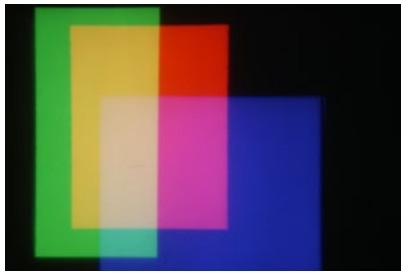
Farbe = Anteil Rot + Anteil Grün + Anteil Blau.

Diese wird die »eigentliche« additive Farbmischung genannt. Sie reicht aber nicht aus, um alle möglichen Farbtöne zu berechnen. Dazu wird ergänzend die »uneigentliche« additive Farbmischung benötigt. Der auf »eigentliche« Weise nicht mischbaren Farbe wird eine der drei Ausgangsfarben hinzugerechnet. Ihre Summe entspricht der Summe der anderen beiden Ausgangsfarben.

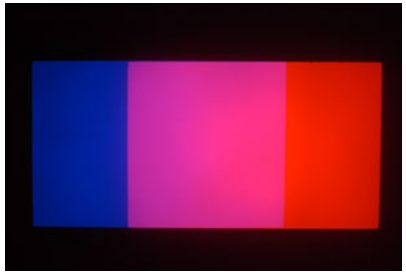
1 Vgl. Günter Wyszecki: *Farbsysteme.*Göttingen, Berlin, Frankfurt 1960, S. 21 – 37.



1

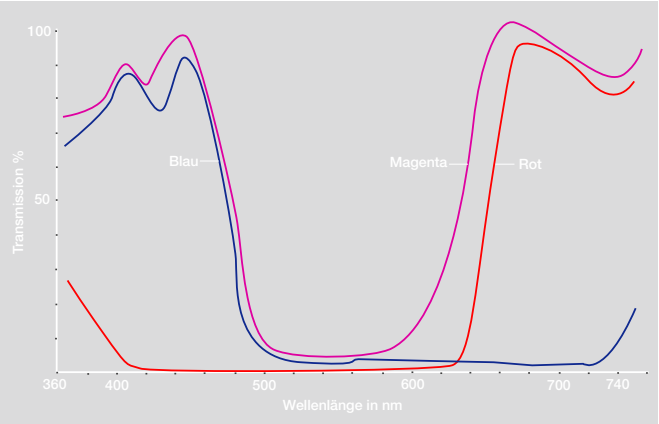


2



3

Abb. 1 Das Beispiel aus der Installation »Pigmentteppich« zeigt, die additive Farbmischung weiss, die aus rotem- und cyanfarbigem Licht zusammengesetzt ist.
Abb. 2 Werden Lichtfarben gemischt, resultiert daraus eine größere Helligkeit. Weißes Licht ist die Summe aller projizierten Farben.
Abb. 3 und 4 Wird Licht, das durch einen Blaufilter fällt, mit Licht das durch einen Rotfilter gefallen ist, additiv gemischt, so summieren sich ihre Spektren. Das entstehende Magenta hat beide Anteile, also Rot und Blau.



4

K05 SUBTRAKTIVE FARBMISCHUNG

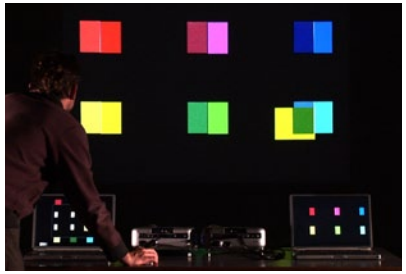
Die Welt der subtraktiven Farbmischung ist die Welt der Substanzen. Pigmente, färbende Lösungen, Malfarben und auch Farbfilter besitzen Eigenschaften, deren Mischung immer zu einer Verminderung des zurückgeworfenen oder gefilterten Lichts führen, d. h. zu einem »subtraktiven« Ergebnis. Alle Farben eines Malfarbenkastens zusammen gemischt, ergeben eine dunkelgraue, schmutzigtrübe Masse. Die reinen Einzelfarben löschen sich darin durch wechselseitige Absorption aus. Im Auge kommt keine Farbinformation mehr an. Die gemischte Malfarbe erscheint farblos und dunkel.

Die stärkste Subtraktion liefert die Farbe Schwarz. Hintereinandergestellte Farbfilter zeigen eine sehr klare Subtraktion: ein erster Farbfilter lässt nur wenig farbiges Licht durchscheinen, davon nimmt ein zweiter Filter wieder Licht weg, bis zuletzt kein Licht mehr die Reihe der Filter passieren kann.[1]

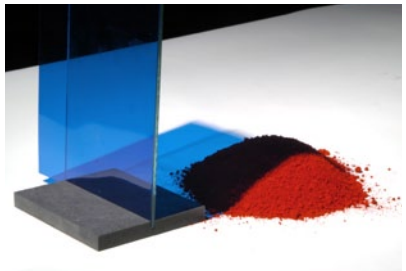
Fällt weißes Licht auf eine farbige Substanz, so filtert diese alle Teile des Spektrums heraus, bis auf den Farbton, der schließlich das Auge erreicht. Fällt dagegen farbiges Licht auf eine farbige Substanz, so ist die Wirkung die gleiche wie bei zwei hintereinander gestellen Farbfiltern. Beleuchtet man eine farbige Substanz mit ihrer Komplementärfarbe, so nimmt diese alle eingestrahlten Lichtteilchen in sich auf, ohne etwas davon zu reflektieren. Die so beleuchtete Stelle erscheint schwarz. Dieser Extremfall ist nur bei tatsächlich komplementären Farben möglich, weil die eine Farbe die andere vollständig absorbieren muss.

Da die subtraktive Farbmischung immer von der molekularen Beschaffenheit der beteiligten Substanzen abhängt, lässt sich das Mischergebnis mit einer weiteren Farbe sehr schwer vorausberechnen. Auch wenn man gleichartig erscheinende Substanzen mit einer weiteren mischt, können sich die Gemische farblich sehr unterscheiden. Cyan, Magenta, Gelb und die Farbe Schwarz als »keycolor« sind die Ausgangsfarben, aus denen beim Vierfarbendruck alle anderen Farben gemischt werden können.

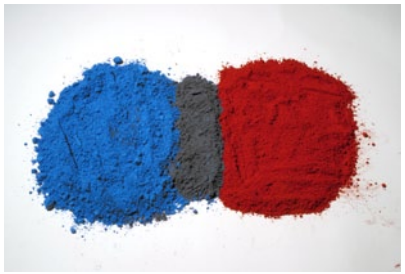
1 Vgl. Stephen E. Palmer: *Vision Science. Photons to Phenomenology.* Massachusetts Institute of Technology 1999, S. 693f.
Vgl. Günter Wyszecki: *Farbsysteme*. Göttingen, Berlin, Frankfurt 1960, S. 37 – 42.



1



2



3

4

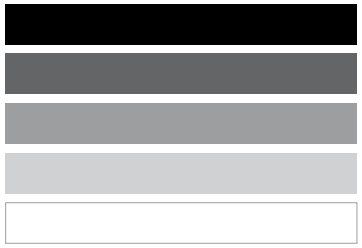
Abb. 1 Die Installation »Zwischenfarben« zeigt, dass die Beleuchtung von Farbkarten mit farbigem Licht zur Subtraktion führt. Die Mischergebnisse der Subtraktion sind die vertrauten Mischfarben aus dem Malkasten.
Abb. 2 Der Extremfall der Subtraktion ist die Beleuchtung einer Farbe mit ihrer Komplementärfarbe. Es klingt paradox, doch die so beleuchtete Fläche erscheint schwarz.
Abb. 3 Mischt man zwei reine Pigmente miteinander, ergibt sich die subtraktive Mischfarbe.
Abb. 4 Farbfilter und Pigmente verhalten sich in gleicher Weise. Fällt weißes Licht durch zwei hintereinander gestellte Farbfilter, wird die subtraktive Mischfarbe sichtbar.

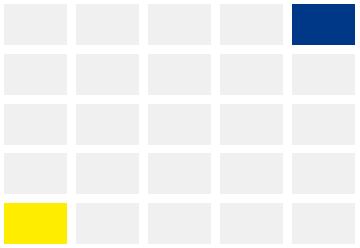
K06 FARB-UNTERSCHEIDUNGSMERKMALE I

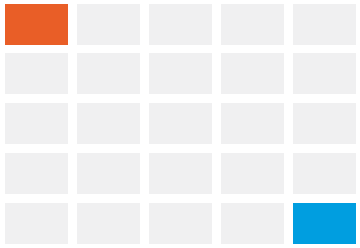
Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf das Kapitel Farbdimensionen.
Bunte Farben (Abb. 1): alle Farben, die einen Buntton besitzen.
Reinbunte Farben (Abb. 2): höchstgesättigte bunte Farben.
Unbunte Farben (Abb.3): Farben ohne Buntheitsanteil, d.h. Schwarz, Weiß und Grau.
Komplementärfarben (Abb. 4 – 6): Zwei Farben, die zusammengemischt ein Grau-Schwarz ergeben, auch Gegenfarben genannt.
Ausgangsfarben (Abb. 7 und 8): Cyan (C), Magenta (M), Zitronengelb/Yellow (Y) sind die Ausgangsfarben oder Primärfarben für Substanzmischungen. Rot (R), Grün (G), Blau (B) sind die Ausgangsfarben oder Primärfarben für Mischungen mit farbigem Licht. Umgekehrt sind RGB die Sekundärfarben für Substanzmischungen und dementsprechend CMY die Sekundärfarben für farbige Lichtmischungen.
Warme und kalte Farben (Abb. 9): Bei den Begriffen kalt-warm handelt es sich nicht um eindeutig definierte Unterscheidungsmerkmale. Eher sind es Bezeichnungen für Stimmungswerte, Tendenzen in bestimmte Richtungen. Das Zinnober (Rot mit Tendenz zu Orange) wird in der Regel als Wärmepol bezeichnet, das Cyan (Eisblau) als Kältepol. Die warmen Farben werden mit Aktivität assoziiert, kalte Farben mit Passivität. Im System «Farbdimensionen» sind die warmen Farben, d.h. die Gelb-Rot Reihe auf der linken und die kalten, die Blau-Reihe, auf der rechten Seite angeordnet. Innerhalb der kalten und warmen Farben wird auch wieder zwischen wärmeren und kälteren unterschieden. In der Gelb-Rot Reihe werden die Farbtöne von Gelb gegen Zinnober immer wärmer, die der Blaureihe werden, ausgehend von Ultramarinblau, gegen Cyan immer kälter.

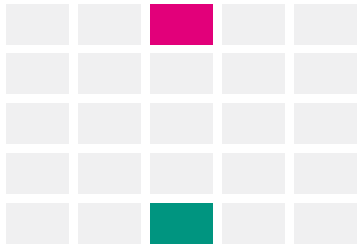
1

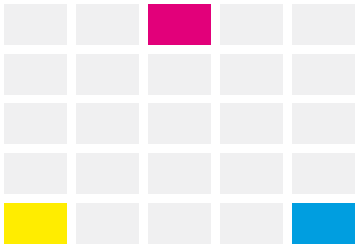
2


3

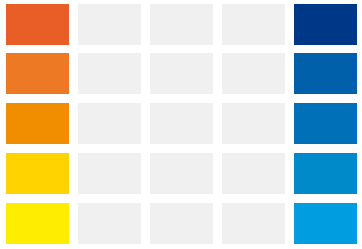

4


5


6


7

8


9

Vgl. Johannes Pawlik: *Theorie der Farbe*. Köln 1969, S. 11 – 15 u. 63 – 64.
Vgl. Moritz Zwimpfer: *Farbe – Licht, Sehen, Empfinden*. Bern, Stuttgart 1985, Nr. 420 – 423.

K07 FARB-UNTERSCHEIDUNGSMERKMALE II

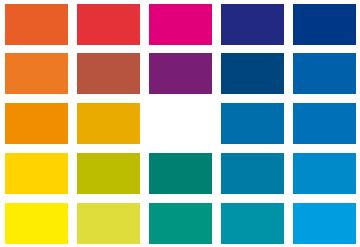
Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf das Kapitel Farbdimensionen.

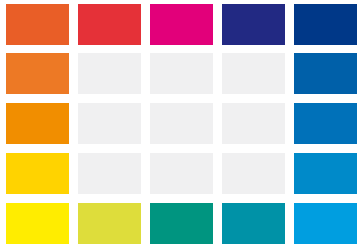
Farbton, auch Buntart genannt, bezeichnet die reinbunte Farbenart, unabhängig von Sättigung und Helligkeit. (Abb. 1) Die 16 reinbunten Farbtöne des Systems «Farbdimensionen» sind auf dem äußeren Rand positioniert, vergleichbar mit der Anordnung im Farbkreis. (Abb. 2)

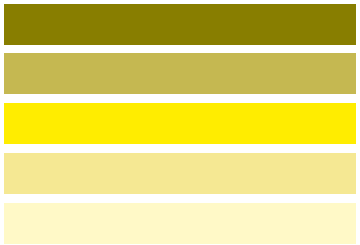
Sättigung meint den Buntgrad einer Farbe. Die Sättigung einer reinbunten Farbe verringert sich, wenn eine unbunte Farbe beigemischt wird. Damit wird die reinbunte Farbe getrübt.
In Abb. 3 wird die Sättigung der Farbe Zitronengelb durch beimischen folgender unbunter Farben verringert: durch Dunkelgrau und durch Schwarz, gegen oben; durch Hellgrau und Weiss gegen unten. Auch durch beimischen der Komplementärfarbe kann die Sättigung einer reinbunten Farbe verringert werden. In diesem Fall spricht man von gebrochenen Farben. (Abb. 4).

Mit Helligkeit wird der Helligkeits- oder Dunkelheitsgrad einer Farbe bezeichnet. Zu unterscheiden sind: Eigenhelle der reinbunten Farben (Abb. 5) und Helligkeit oder Dunkelheit von getrübten Farben (Tonwerte). (Abb. 6)

Vgl. Johannes Pawlik: *Theorie der Farbe*. Köln 1969, S. 11 – 15.
Vgl. Norbert Welsch: *Farben, Natur, Technik*, 2. Auflage. München 2004, S. 384, 388, 401.


1


2


3

4

5

6

K08 ERSCHEINUNGSFARBEN

Beobachtet man vierundzwanzig Stunden einen Palmenhain von oben, würde man zunächst sagen, man habe zu allen Tageszeiten grüne Palmen gesehen. Bei genauerem Nachdenken müsste man aber zugeben, dass man im Morgenlicht andere Farbtöne gesehen hat als am Mittag, am Nachmittag, am Abend und bei Mondschein. Durch den Sonnenverlauf unterliegt die spektrale Zusammensetzung des Beleuchtungslichtes einem dauernden Wechsel. Um die jeweils aktuellen Grüntöne der Palmen überhaupt zu erkennen, müsste das Farbkonstanz-Denken überlistet werden. Allein die Farbkonstanz hilft dem Betrachter, bei veränderter Beleuchtung mit der Zuordnung der Farben zu den Gegenständen nicht in Verwirrung zu geraten.
Betrachtet man die Erscheinungsfarbe vom Zusammenhang losgelöst, erstaunt es, dass sie zur selben Substanz gehören. So kann beispielsweise ein Olivgrün die Erscheinungsfarbe eines hellen Zitronengelbs sein.

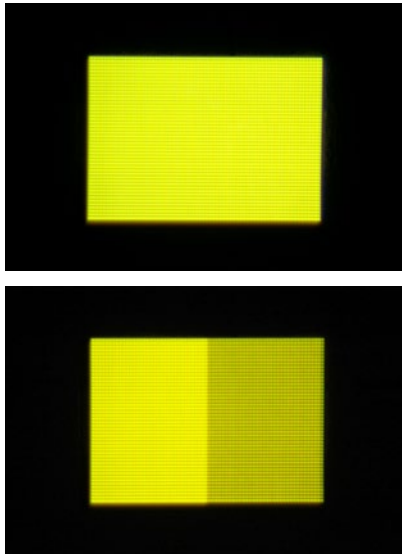


Abb. Beim Abdunkeln einer gelben Fläche ist das farbliche Umschlagen ins Olivgrün besonders auffällig.

K09 FARBE (PHYSIKALISCH)

An der Oberfläche von lichtundurchlässigen und nicht spiegelnden Substanzen und Gegenständen wird Licht absorbiert, d.h. ein Teil des auftreffenden Spektrums wird subtrahiert, der andere diffus zurückgeworfen. Man spricht von diffuser Reflexion oder einfach von »Reflexion«.[1] Ein blauer Gegenstand beispielsweise absorbiert gelbes Licht aus dem Spektrum des Beleuchtungslichts und emittiert blaues. Die Farbbenennung eines Gegenstandes beruht auf dem emittierten Licht, das ins Auge des Betrachters fällt.

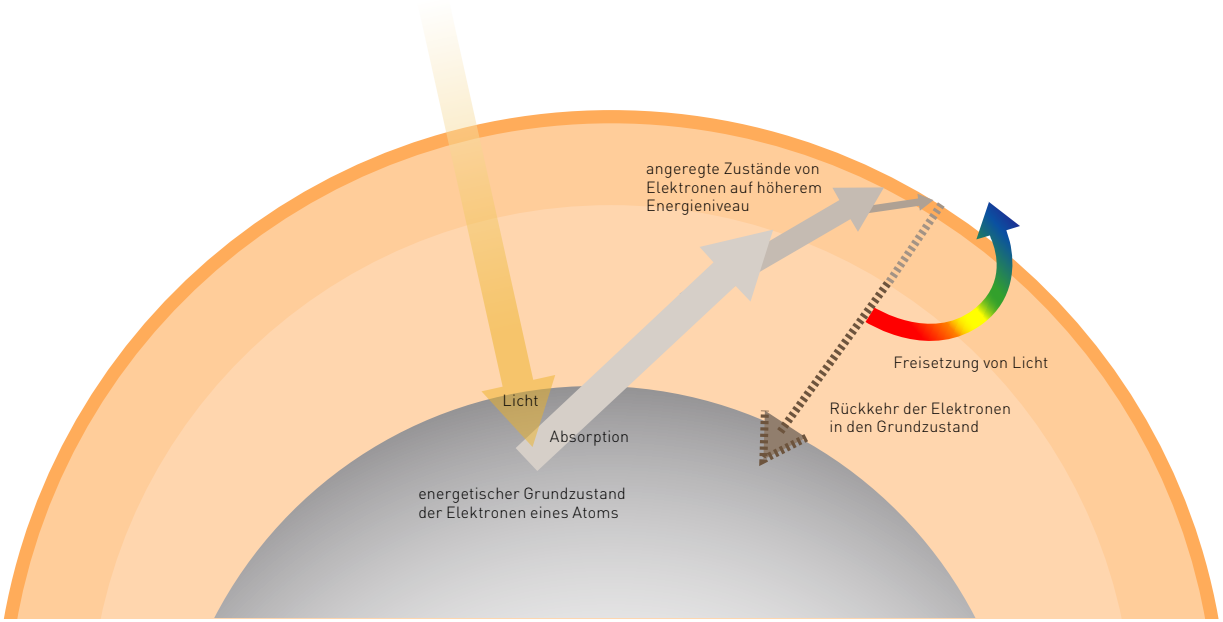
Im Atom-Modell der Quantenphysik wird die Absorption von Lichtteilchen als ein Vorgang gedacht, bei dem die Lichtteilchen ihre Energie auf Elektronen übertragen, die an Atomkerne gebunden sind. Dabei werden diese in einen angeregten Zustand versetzt. Beim Zurückfallen in den Ausgangszustand setzen sie wiederum Lichtteilchen frei. Diese werden als reflektiertes Licht ins Auge des Betrachters zurückgeworfen. Man spricht von spontaner Emission oder Freisetzung von Lichtteilchen.[2] Sie sind jedoch energieärmer als die eingestrahlten Lichtteilchen und besitzen somit eine längere Wellenlänge.

1 Vgl. Ekbert Hering, Rolf Martin, Martin Stohrer: *Physik für Ingenieure*, 6. Auflage. Berlin, Heidelberg 1997, S. 404ff.
Vgl. Jost J. Marchesi: *Handbuch der Fotografie*. Band 1: *Geschichte, Chemisch-physikalische und optische Grundlagen*. Schaffhausen 1993, S. 136.

2 Vgl. Horst Hänsel, Werner Neumann: *Physik, Atome, Atomkerne, Elementarteilchen*. Heidelberg, Berlin, Oxford 1995, S. 242ff.

Abb. 1 Das intensiv angestrahlte Pigment erscheint in heller Farbigkeit.
Abb. 2 Das molekulare Energieschema zeigt die Anregung der Elektronen auf ein höheres Energieniveau.

1

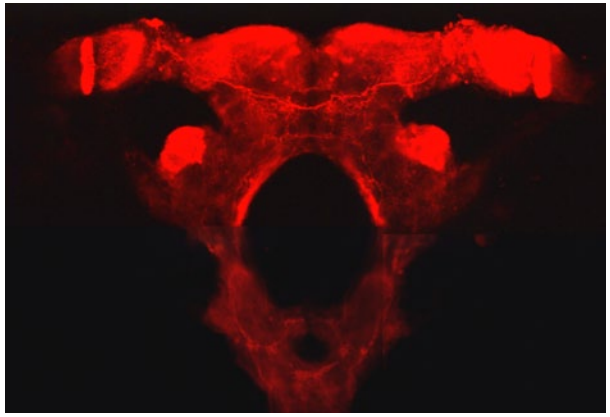


2

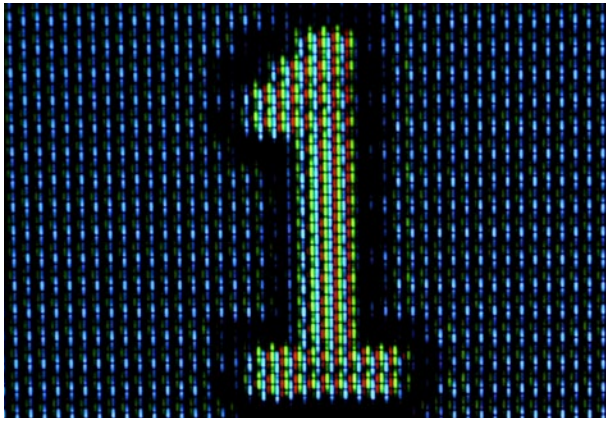
K10 LUMINESZENZ

Im Gegensatz zur thermischen Abstrahlung von Licht, die nach der Erhitzung eines Stoffes entsteht, gibt es auch eine nichtthermische Abstrahlung, die Lumineszenz genannt wird.
Im Sommer lassen sich bei Nacht »Glühwürmchen« im Flug beobachten. Bei ihnen tritt die Form der Biolumineszenz auf, die auch einigen Tiefseefischen und Rotalgen eigen ist.
Wird energiereiches ultraviolettes Licht auf das Mineral Fluorit gestrahlt, beginnt es zu leuchten. Dieses Leuchten ist keine bloße Reflexion des eingestrahlten Anregungslichts. Hierbei wird zunächst eingestrahltes Licht in den Atomen des Minerals gespeichert und schließlich als langwelliges Licht ausgestrahlt. Man spricht von Fluoreszenz. In der heutigen Mikroskopie bindet man fluoreszierende Substanzen an Zellstrukturen, die untersucht werden sollen. Wird ultraviolettes Licht eingestrahlt, fluoreszieren die markierten Bereiche. Diese Technik hat die risikoreiche radioaktive Markierung von Substanzen weitgehend abgelöst.
Auch Phosphor-Verbindungen können durch energiereiche Bestrahlung zum Leuchten angeregt werden. Da dieses Leuchten in den Ausgangsfarben der additiven Farbmischung möglich ist, werden sie zur Herstellung von Farbfernseh-Bildschirmen verwendet. Diese Technik basiert auf der Fluoreszenz von Leuchtphosphoren.

Abb. 1 Markierung von Zellstrukturen mit fluoreszierenden Farbstoffen in der Fluoreszenz-Mikroskopie.
Abb. 2 Aus nächster Nähe lassen sich bei einem Farbfernseher die einzelnen Leuchtphosphore eines Röhren-Bildschirms erkennen.



1



2

K11 FARBTEMPERATUR

»Heiße Körper senden aufgrund ihrer Temperatur eine Lichtstrahlung aus«[1], was sich auch beim Beheizen eines industriellen Ofens beobachten lässt. Zunächst ist es im Innern dunkelrot, dann geht die Farbe von Hellrot und Gelb zur »Weiß«-Glut über. In der Pyrometrie wird anhand der Farbe die in einem Ofen herrschende Temperatur bestimmt. Jeder Farbe des Beleuchtungslichts lässt sich eine bestimmte Temperatur zuordnen, die so genannte Farbtemperatur. Ihre Maßeinheit ist das Kelvin, das sich auf den absoluten Temperatur-Nullpunkt bezieht. (0 Kelvin entsprechen –273° C, 0° C entsprechen 273 Kelvin) Bei zunehmend höherer Temperatur verschieben sich die Wellenlängen des abgestrahlten Lichts von Rot zu Blau. Eine Kerzenflamme beispielsweise gibt überwiegend gelbes Licht ab, nur an ihrer heißesten Stelle ist sie bläulich. Glühlampen strahlen durch die Erhitzung von dünnem Wolframdraht Licht von etwa 3400 Kelvin ab. Ungefähr 90% ihrer Leistung geht als reine Wärmestrahlung verloren, der Rest wird als rötliches bis gelbliches Licht sichtbar. Sehr helles Sonnenlicht kann eine Farbtemperatur von bis zu 10 000 Kelvin haben. Die Tageslichtnorm liegt jedoch bei 5600 Kelvin. Die in der Fotografie gebräuchlichen Tageslichtfilme sind hierauf abgestimmt, Kunstlichtfilme dagegen auf das Glühlampenlicht von etwa 3200 Kelvin.[2]

1 Vgl. Hermann Haken, Hans Christoph Wolf: *Atom- und Quantenphysik. Einführung in die experimentellen und theoretischen Grundlagen. Berlin Heidelberg 2000, S. 55ff.*

2 Vgl. Jost J. Marchesi: *Handbuch der Fotografie*. Band 1: Geschichte, Chemisch-physikalische und optische Grundlagen. Schaffhausen 1993, S. 132ff.

1

2

3

Abb. 1 Kerzenflammen haben je nach Temperatur eine gelblich bis bläulich weiße Färbung.
Abb. 2 Mit hohen Temperaturen und bläulichen Flammen wird beim Schweißen gearbeitet.
Abb. 3 Beim Feuerwerk werden Metalle verbrannt, die in allen Farbvariationen ein buntes Bild abgeben.

K12 SUBSTANZFARBEN

Substanzfarben sind als Körperfarben das genaue Gegenteil von farbigem Licht. Sind mit farbigem Licht genau vorausberechenbare additive Farbmischungen möglich, ist bei den subtraktiven Farbmischungen der Substanzfarben das Mischungsergebnis nur ungefähr vorhersagbar. Eine entscheidende Rolle spielt die Licht absorbierende und reflektierende Materialoberfläche. Ihre Eigenschaften sind sehr komplex und lassen sich kaum mathematisch erfassen.
Die Substanzfarben Cyan, Magenta und Gelb sind die Ausgangsfarben für subtraktive Farbmischungen. Deren Mischung jedoch ergibt nur theoretisch Schwarz. Praktisch ergibt sich ein dunkles Grau. Beim Vierfarbendruck setzt man daher zu diesen Farben immer reines Schwarz hinzu. So ergibt sich der CMYK genannte Farbcode aus »Cyan«, »Magenta«, »Yellow« und K als Schwarzwert (keycolor).
Wird weißes Licht eingestrahlt, so absorbieren Substanzfarben ihre Komplementärfarbe und reflektieren den Rest des Spektrums. Die reflektierte Strahlung mischt sich additiv zur wahrgenommenen Farbe.

Abb. Die Substanzfarben in den Glasschalen sind die Farben des Systems »Farbdimensionen«.

K13 PIGMENTE[1]

Pigmente sind wasserunlösliche, meist kristalline Farbkörnchen, die mit einem Durchmesser von einem Tausendstel bis Millionstel Millimeter Licht absorbieren und gestreut reflektieren. Jeder Lichtwellenlänge entspricht eine optimale Teilchengröße. Je kleiner die Farbteilchen sind, umso größer ist die Farbstärke eines Pigments. Damit gemeint ist die Fähigkeit, andere Substanzen in ihrer Farbe zu beeinflussen.

Zur Herstellung einer Malfarbe aus einem Pigment bedarf es immer eines Bindemittels, denn das Pigment selbst ist nur ein feines, farbiges Pulver. Die Ölfarbe beispielsweise besteht aus einem mit Leinöl versetzten Pigment. Die Acrylfarbe besteht aus einem mit Acryl-Bindemittel versehenen Pigment.

Es lassen sich natürliche und künstliche Pigmente unterscheiden. Zu den natürlichen Pigmenten zählen die Erdfarbenpigmente und die Pflanzenfarbstoffe. Erdfarbenpigmente sind Metalloxide. Sie sind die ältesten Farbmittel, die schon von steinzeitlichen Höhlenmalern verwendet wurden. Gelbliche, rötliche und bräunliche Farberden wurden von ihnen zu Ocker, Terra di Siena und Umbra verarbeitet. Auch die wasser- und fettlöslichen Pflanzenfarbstoffe werden als Pigmente bezeichnet. Blattgrün ist das häufigste Pigment (Chlorophyll), Carotinoide verleihen Gemüse und Früchten gelbe bis violette Färbungen.

Zu den künstlichen Pigmenten gehören die Mineral- und synthetischen Pigmente. Mineralpigmente werden aus natürlichen Metalloxiden hergestellt. 96% der künstlich erzeugten Pigmente sind Mineralpigmente. Als erstes wurde 1704 Berliner Blau synthetisiert. Titanweiß, künstliches Ultramarinblau, hochgiftiges Quecksilberoxid (Zinnober) sind ebenfalls Mineralpigmente.

Abb. Mineralpigment Zinnober, die wärmste Farbe des Malfarbensystems.

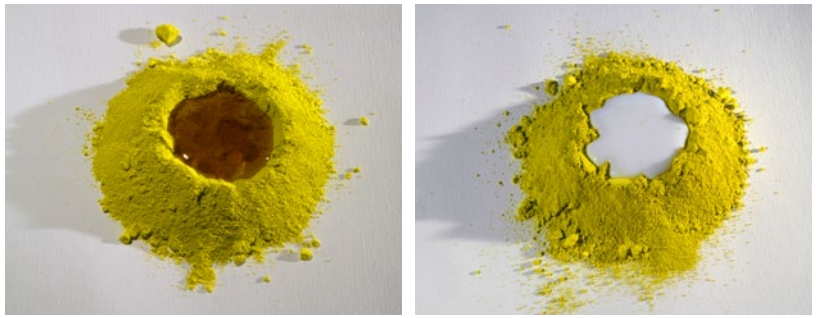
Synthetische Pigmente werden aus Erdöl, Steinkohle und Steinkohleteer gewonnen und liefern leuchtende Buntfarben für die Druck- und Textilindustrie, die Malerei und das Baugewerbe. Sie sind lichtecht und gut haltbar, ihre Produktion ist jedoch mit ökologischen Risiken verbunden.

1 Vgl. Norbert Welsch, Claus Chr. Liebmann: *Farbe, Natur, Technik, Kunst.* München 2004, S. 151 – 153.

K14 BINDEMITTEL

Um aus Pigmentpulver eine gebrauchsfertige Malfarbe herzustellen, muss man ein Bindemittel hinzufügen. Das Bindemittel selbst ist transparent und farblos. Es umhüllt die Pigmentpartikel und verklebt diese gleichzeitig mit dem Trägermaterial bzw. mit der Grundierung in der Malerei. Je nach zugesetztem Bindemittel unterscheidet man Ölfarben, Acrylfarben oder Kaseinfarben. Das Bindemittel entscheidet über die Malweise und prägt den Charakter des fertigen Bildes. Wird einem Pigment nebst anderen Bestandteilen beispielsweise das von der Akazie stammende Gummi Arabicum zugesetzt, ergibt sich daraus eine Aquarell-Farbe.

Das Pigment in Reinform.



Das Pigment wurde mit Leinöl gemischt und zu Ölfarbe verarbeitet. (links)
Das Pigment wurde mit Acryl-Bindemittel zur Acrylfarbe verarbeitet. (rechts)

Ölfarbe und Acrylfarbe wirken ganz unterschiedlich, wenn sie auf die Grundierung aufgetragen werden.

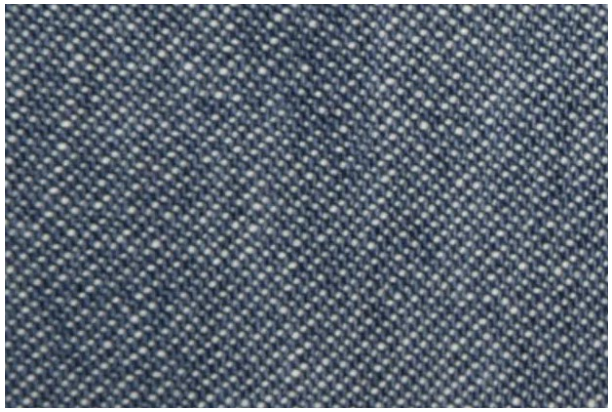
K15 FARBSTOFFE

Den wasserunlöslichen Pigmenten stehen als lösliche Farbmittel die Farbstoffe gegenüber. Sie lösen sich in Wasser oder anderen Flüssigkeiten. Beim Färbevorgang gehen sie chemische Verbindungen mit ihrem Trägermaterial ein. Beispiele dafür sind das Färben von Wolle, Seide und Baumwolle oder auch das Beizen von Holz. Für Farbstoffe ist kein Zusatz von Bindemitteln nötig, denn sie haften selbst auf ihrem Träger.

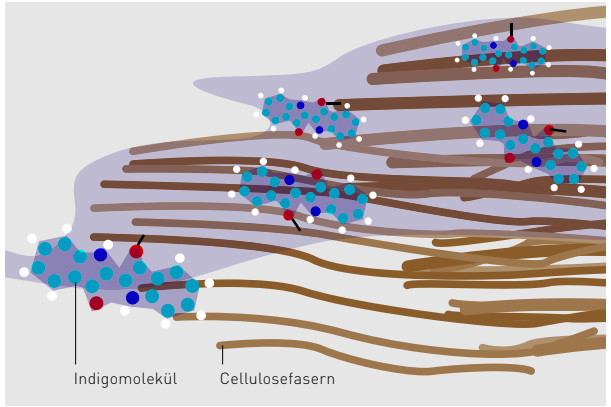
Nach der Entdeckung des künstlichen Indigo im Jahr 1878, wurde das Färben von Baumwolle zur industriellen Angelegenheit. Die mit Indigo gefärbten Bluejeans beispielsweise wurden zum wichtigen Exportartikel.

Heute prägen Tausende von künstlichen Farbstoffen alle Lebensbereiche. Die Lebensmittelindustrie zum Beispiel verwendet bestimmte Farbstoffe, um ihre Erzeugnisse schmackhafter aussehen zu lassen. Allerdings ist deren Herstellung mit zahlreichen hochgiftigen Nebenprodukten verbunden.

Abb. 1 Die Baumwollfasern der Bluejeans wurden mit Indigo gefärbt.
Abb. 2 Der Farbstoff bindet sich chemisch an die Textilfaser.



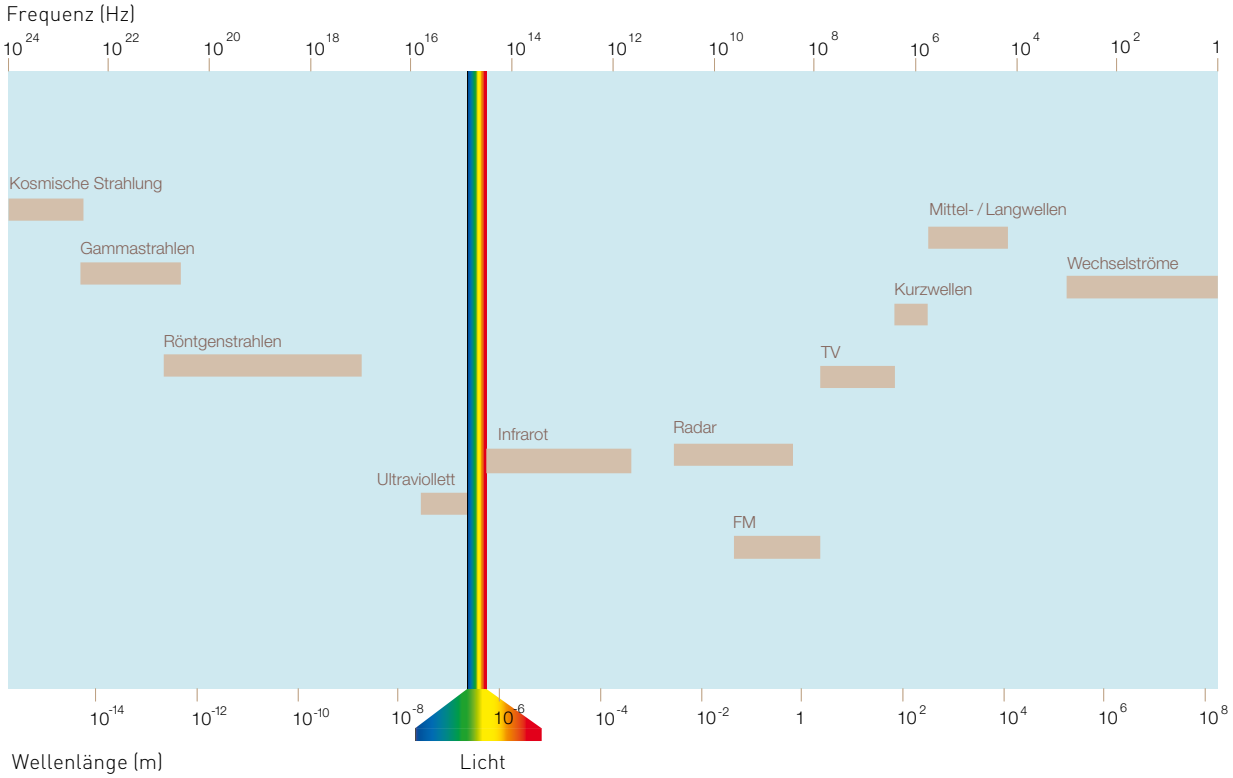
1



2

K16 LICHT (PHYSIKALISCH)

Licht ist eine Form von Energie. Experimentell ist Licht ein großes »Weder-noch« oder »Sowohl-als-auch«. Licht hat den Charakter einer elektromagnetischen Welle und auch den eines Teilchens.
Lange Zeit galt das Wellen-Modell der klassischen Optik als die umfassende Erklärung für das Phänomen Licht. Licht ist der sichtbare Bereich des elektromagnetischen Wellenspektrums.
Was Licht ist, lässt sich aber mit streng geradlinigem Denken, wie es die klassische Physik kennzeichnet, durchaus nicht erfassen.[1] Beobachtungen, wie sie Max PlancK1900 veröffentlichte, zwangen ihn geradezu, das klassische Denken zu verlassen.[2] Im herkömmlichen Denken kann ein Teilchen nur ein Teilchen sein und nicht gleichzeitig auch eine Welle. Die makroskopische Welt der klassischen Physik musste abgelöst und neue Grundlagen für die Beschreibung des Lichts geschaffen werden.
Es waren Max Planck und Albert Einstein, die 1900 und 1905 das Feld der Mikrophysik eröffneten. Sie entzieht sich der Anschauung und ist nicht mehr unmittelbar erfahrbar. Die Annahme, Licht könne auch in definierten Paketen, so genannten Lichtquanten oder Photonen auftreten, war revolutionär. Einstein entwickelte mit der Erklärung des »Lichtelektrischen Effekts« ein neues Denken. Dafür erhielt er den Nobelpreis, nicht für seine viel bekanntere Relativitätstheorie.
Licht konnte nach Einstein auch Masse und Impuls haben, wie ein sehr kleines Teilchen, das sich mit rasender Geschwindigkeit bewegt und niemals ruht. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht im luftleeren Raum ist die aus dem Science-Fiction-Film bekannte Lichtgeschwindigkeit c, die 300 000 Kilometern pro Sekunde entspricht.



1 Vgl. Ekbert Hering, Rolf Martin, Martin Stohrer: *Physik für Ingenieure*, 6. Auflage. Berlin, Heidelberg 1997, S. 2 – 5.
2 Vgl. Joachim Grehn (Hg.): *Metzler Physik*, 2. Auflage. Stuttgart 1989, S. 365. Vgl. Horst Hänsel, Werner Neumann: *Physik, Atome, Atomkerne, Elementarteilchen*. Heidelberg, Berlin, Oxford 1995, S. 15.

Abb. Das elektromagnetische Wellenspektrum zeigt, dass der menschliche Lebensraum von Wellen erfüllt ist, aber nur ein sehr kleiner Teil ist sichtbares Licht (der Bereich 380 bis 700 Nanometer).

K17 WELLEN-MODELL DES LICHTS

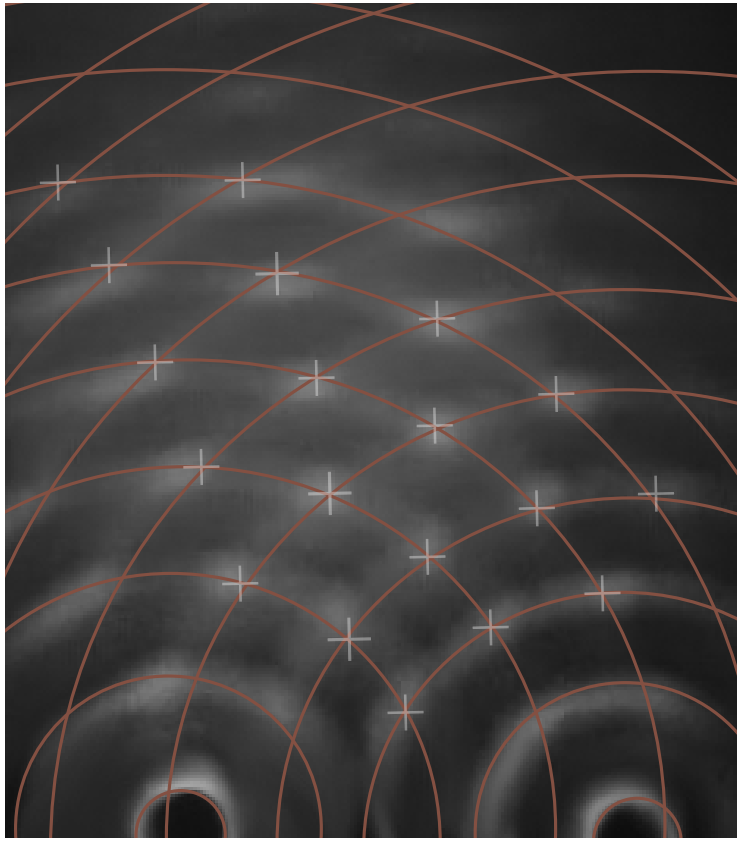
Im 18. und 19. Jahrhundert wendeten Physiker die zwei Wellen-Phänomene Beugung und Interferenz, die sie für den Schall und das Wasser genau berechnen konnten, auf die Untersuchung des Lichts an. Sie hatten damit Erfolg. Denn Licht kann als elektromagnetische Welle dieselben Verhaltensweisen an den Tag legen.[1]

Werden zwei gleich aussehende Wellen mit gleich hohen Wellenbergen und -tälern um eine halbe Wellenlänge gegeneinander verschoben, dann füllt genau ein Wellenberg ein Wellental auf und beide Wellen löschen sich gegenseitig aus.[2] Das wird mit »Interferenz« bezeichnet. Sie tritt bei Wasser-, Schall- und Lichtwellen in gleicher Weise auf.

Laufen Wasserwellen auf eine Öffnung in einer Wand zu, bilden sich hinter der Öffnung wieder neue, sich kreisförmig ausbreitende Wellen. So gibt es hinter der Öffnung keine Stelle, die sozusagen im »Wellen-Schatten« liegt. Dieses Phänomen wird mit dem Begriff der »Beugung« umschrieben.[3] Auch Licht wird am Spalt gebeugt.

Bei Licht handelt es sich um elektromagnetische Wellen aus dem sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Wellenspektrums. Telefon, Radio und Fernsehen beruhen auf der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen. Auch das Sonnenbad ist ein Wellenphänomen langwelliger infraroter Strahlung auf der Haut. Ultraviolett-Strahlung aus dem kurzwelligen Bereich des Spektrums ist für Körper und Hautzellen durchaus gefährlich, die noch kürzere Röntgenstrahlung ebenso.

Abb. Zwei sich überlagernde Wasserwellen durchdringen sich und verstärken sich an Kreuzungspunkten.



1 Vgl. Horst Hänsel, Werner Neumann: *Physik, Atome, Atomkerne, Elementarteilchen.* Heidelberg, Berlin, Oxford 1995, S. 2 – 5.

2 Vgl. Joachim Grehn (Hg.): *Metzler Physik*, 2. Auflage. Stuttgart 1989, S. 128.
Vgl. Ekbert Hering, Rolf Martin, Martin Stohrer: *Physik für Ingenieure*, 6. Auflage. Berlin, Heidelberg 1997, S. 392.

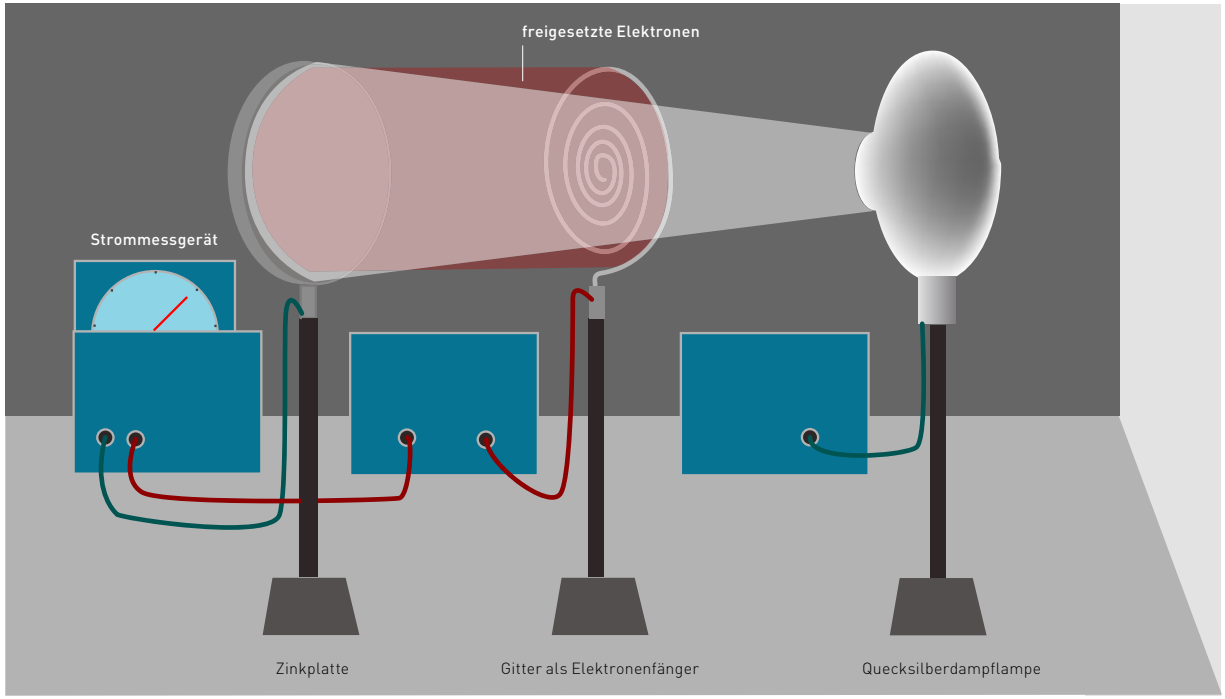
3 Vgl. Joachim Grehn (Hg.): *Metzler Physik*, 2. Auflage. Stuttgart 1989, S. 135.
Vgl. Hering, Martin, Stohrer: *Physik für Ingenieure*, a.a.O., S. 397.
Vgl. Jost J. Marchesi: *Handbuch der Fotografie. Band 1: Geschichte, Chemisch-physikalische und optische Grundlagen.* Schaffhausen 1993, S. 191.

K18 TEILCHEN-MODELL DES LICHTS

Eines der entscheidenden Experimente, die mit der Teilchen-Natur des Lichts erklärt werden können, war der lichtelektrische Effekt.[1] Er war den Physikern bereits 1902 bekannt, bereitete aber Probleme, wenn man versuchte, diesen Effekt mit dem Wellen-Modell zu verstehen. Es war Albert Einstein, der ihn 1905 mit seiner »Lichtquantenhypothese« erklärte (Quant = Teilchen). Dabei war die Quantelung des Lichts für ihn vor allem ein nützliches Modell, das zahlreiche Lichtphänomene erklären konnte. Eine gleichberechtigte Vereinigung von Wellen- und Teilchenmodell wurde erst später in Form der Quantentheorie erreicht.

Zur Demonstation des lichtelektrischen Effekts wird eine Metallplatte aus Zink mit dem Licht einer hellen Quecksilberdampflampe bestrahlt. Dabei lösen sich Elektronen aus dem Metall und bilden einen messbaren elektrischen Strom, doch nicht in jedem Fall. Man erkannte, dass man Licht mit einer ausreichend kleinen Wellenlänge benötigte. Nur beim Einstrahlen von ultraviolettem, d.h. energiereichem und kurzwelligem Licht fließt Strom. Nur in diesem Fall bewirkte eine höhere Intensität auch einen stärkeren Stromfluss. Einsteins Erklärung dafür war: Elektronen, die Einheiten, die den elektrischen Strom ausmachen, sind im Metall an Atome gebunden. Sie befinden sich im Anziehungsbereich des Atomkerns der Metallatome. Will man sie herauslösen und einen Strom erzeugen, muss man Energie aufwenden. Wird ein solches Elektron von einem Lichtteilchen mit der richtigen Energie getroffen, so kann es aus dem Verband der Metall-Atome heraustreten und im elektrischen Feld fließen, so dass ein messbarer elektrischer Strom entsteht.

Sind die Lichtteilchen zu energiearm, dann passiert nichts, auch wenn man die Intensität noch so weit erhöht. Mit dem klassischen Wellen-Modell ist dies nicht mehr fassbar, denn nach ihm müsste eine Intensitätssteigerung auf jeden Fall eine größere Wirkung hervorrufen.



1 Vgl. Joachim Grehn (Hg.): *Metzler Physik*, 2. Auflage. Stuttgart 1989, S. 359 – 366. Vgl. Horst Hänsel, Werner Neumann: *Physik, Atome, Atomkerne, Elementarteilchen.* Heidelberg, Berlin, Oxford 1995, S. 242ff.

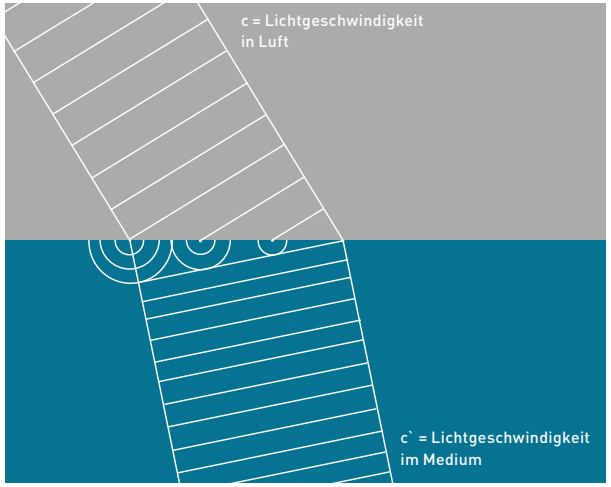
Abb. Versuchsaufbau zum lichtelektrischen Effekt. Aus einer Zinkplatte treten nach der Bestrahlung mit Licht einer Quecksilberdampflampe Elektronen aus, die als Strom messbar sind.

K19 BRECHUNG

Das Wellen-Modell des Lichts eignet sich als Beschreibung der Licht-Brechung. Sie tritt auf, wenn Licht von einem Medium in ein anderes übertritt. Brechungsphänome kann man zum Beispiel an der Grenzfläche von Luft und Wasser beobachten. In der Luft breitet sich Licht in einer anderen Geschwindigkeit aus als in Wasser oder Glas. Luft bezeichnet man als optisch dünneres, Wasser als optisch dichteres Medium. Beim Übertritt von Licht in Wasser oder Glas, wird das Licht in einem genau bestimmbaren Winkel gebrochen.
Das Verhältnis der mathematisch errechneten Werte für den Einfalls- und Brechungswinkel entspricht dem Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten in den unterschiedlichen Medien.[1] Aus der Optik ist das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum zu der des Mediums als »Brechungsindex« bekannt.
Trifft die Wellenfront eines Lichtstrahls beispielsweise aus der Luft auf die Wasseroberfläche, dann wird ein Teil des Lichts gespiegelt, der andere fällt ins Wasser und es kommt zur Brechung.[1] Sie rührt daher, dass nicht alle Teile der Wellenfront gleichzeitig auf die Wasseroberfläche auftreffen. Während der eine Teil des Strahls sich schon im Wasser ausbreitet, ist der andere noch unterwegs zur Wasseroberfläche. Die neue, sich im Wasser fortbewegende Wellenfront läuft nun in einem geknickten Winkel weiter, und zwar mit anderer Geschwindigkeit. Mit der Geometrie von Dreiecken lässt sich die Brechung mathematisch beschreiben.

1 Vgl. Ekbert Hering, Rolf Martin, Martin Stohrer: *Physik für Ingenieure*, 6. Auflage. Berlin, Heidelberg 1997, S. 409ff.

1



2

Abb. 1 Der Pinsel im Glas ist eine klassische Darstellung der Brechung.
Abb. 2 Brechung einer ebenen Welle an einer Grenzfläche.

K20 INTERFERENZFARBEN

Wer kennt nicht das Schillern der Seifenblasen, der Schmetterlingsflügel und Pfauenfedern? Oder die Farben, die eine Ölspur auf dem Wasser oder eine CD an ihrer Oberfläche zurückwirft?
All diese Erscheinungen sind Auswirkungen desselben physikalischen Phänomens: der Interferenz. Die schillernden Farben, die sehr dünne Materialschichten durch Interferenz hervorrufen, werden Interferenzfarben genannt. Die Interferenz ist eine Auslöschungserscheinung von gleichartigen Lichtwellen, bei der sich Wellenberge mit Wellentälern durch eine gegenseitige Verschiebung um eine halbe Wellenlänge vernichten. Dies wurde von Thomas Young 1801 zuerst demonstriert. Allerdings muss für Lichtwellen eine wesentliche Voraussetzung gegeben sein: Die Bewegung ihrer Wellenberge und -täler muss für die Dauer der Beobachtung gleichbleibend verlaufen. Licht zweier unterschiedlicher Quellen kann diese Bedingung praktisch nicht einlösen. Unter natürlichen Bedingungen kann dies nur von Lichtwellen, die vom selben Punkt ausgehen, erfüllt werden.[1]
Wird die Oberfläche einer Seifenblase, die nur 0,00012 Millimeter (120 Nanometer) dick ist, von Sonnenlicht angestrahlt, dann trifft Licht des gesamten Sonnenspektrums, d. h. aller Farben, auf diese sehr dünne Seifenblasen-Wand. Sie ist dünner als die Wellenlängen des sichtbaren Lichts. Die Lichtwellen werden je nach Einfallswinkel des Lichts und Brechungsindex der Seifenlauge an der Blasenoberfläche teils reflektiert, teils gebrochen. Diese durchdringen die Oberfläche und treffen auf die Innenwand der Seifenblase und werden auch dort teils reflektiert, teils gebrochen. Die Lichtwellen, die an der Oberfläche reflektiert werden »interferieren« mit den Lichtwellen, die von der Innenwand in derselben Richtung reflektiert werden. Dabei löschen sich bestimmte Lichtwellen gegenseitig aus. Dem eingestrahlten Spektrum wird so eine Farbe entzogen. Die übrigen Spektralfarben

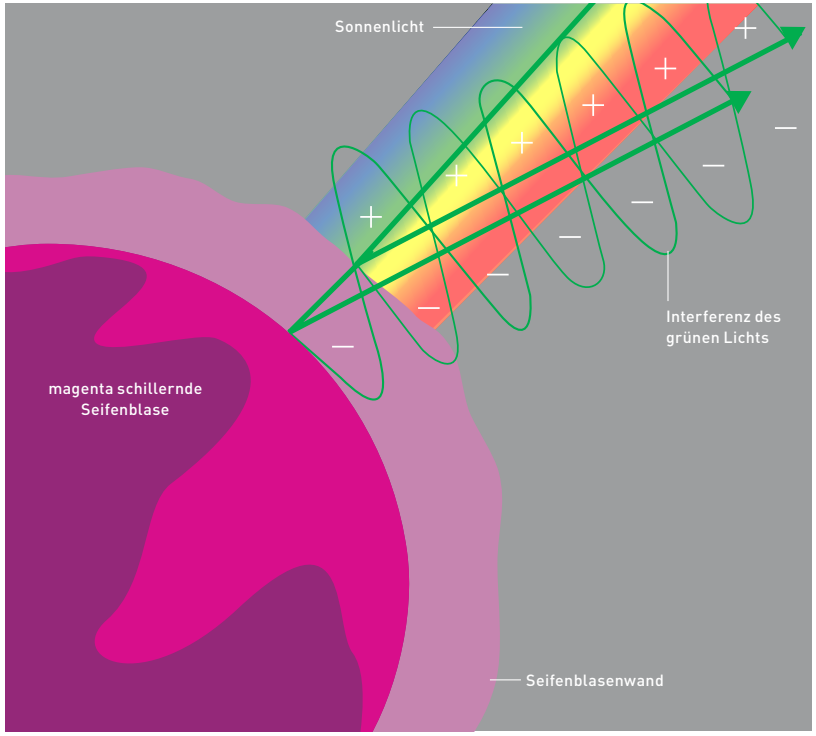


Abb. Schematische Darstellung der Interferenz an der Oberfläche einer Seifenblase.

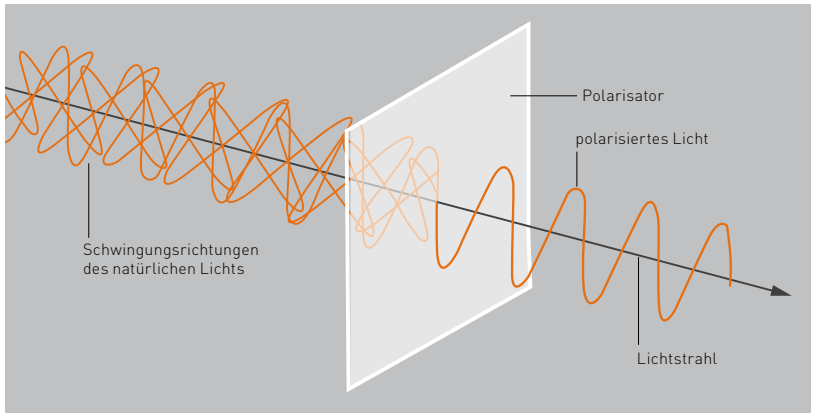
werden zurückgeworfen. Bei einer 120 Nanometer dünnen Schicht wird das blaugrüne Licht ausgelöscht. Die Seifenblase erscheint rötlich. (Weiß minus Blaugrün ergibt Rot). In Abhängigkeit von der Dicke der Seifenblasenwand und dem Einfallswinkel des Lichts relativ zur Oberfläche, wird eine ganz bestimmte Wellenlänge ausgelöscht. Die Seifenblase schillert in allen Farben.
Farbe und Schichtdicke sind voneinander abhängig. Diesen Zusammenhang macht man sich beim Filtern von Licht zu Nutze. Mit einer spezifisch gewählten Schichtdicke, die man auf Glas aufbringt, kann durch Interferenz eine Farbe aus dem Sonnenspektrum gezielt herausgelöscht werden, während alle anderen Farben das Material durchscheinen und als komplementärfarbiges Licht sichtbar sind. (siehe dazu Dichroidfilter)

1 Vgl. Ekbert Hering, Rolf Martin, Martin Stohrer*: Physik für Ingenieure,* 6. Auflage. Berlin, Heidelberg 1997, S. 444 – 450.
Vgl. Jost J. Marchesi: *Handbuch der Fotografie. Band 1: Geschichte, Chemisch-physikalische und optische Grundlagen.* Schaffhausen 1993, S. 186 – 189.

Abb. Beispiele von Interferenzfarben im Alltag.

K21 POLARISATION

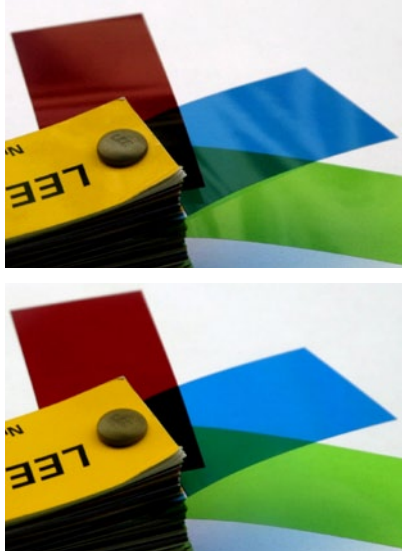
Licht breitet sich als Lichtwelle geradlinig im Raum aus. Diese Lichteigenschaft macht man sich gerade in der Optik für genaue Berechnungen zu Nutze. Aber Licht hat noch eine weitere Eigenschaft. Senkrecht zur Ausbreitungsachse schwingen natürliche Lichtwellen in alle Richtungen. Denkt man sich die Ausbreitungsrichtung als eine senkrechte Linie, so ordnen sich die Schwingungsrichtungen des Lichts um dieses Zentrum wie um die Speichen eines Rades.[1]
Polarisation ist ein Ausleseprozess: aus all diesen möglichen Schwingungsrichtungen werden nur wenige bestimmte oder nur eine einzige Richtung herausgefiltert. E. L. Malus betrachtete 1808 durch ein Prisma aus Kalkspat ein spiegelndes Fenster. Durch Drehen des Prismas wurde seine Lichtdurchlässigkeit verändert. Bei einer bestimmten Stellung kam gar kein Licht mehr durch. Malus erkannte, dass das Licht, nachdem es das Fenster passiert hatte, nur noch eine bestimmte Schwingungsebene hatte. Es war durch das Glas der Fensterscheibe »polarisiert« worden.[2] Wird Licht an Glas teilweise gespiegelt, teilweise gebrochen, so werden beide Teile des Lichtstrahls polarisiert. Dabei spielt der Einfallswinkel eine wichtige Rolle. Licht wird nicht nur beim Durchtritt durch Glas, sondern auch in der Atmosphäre durch Streuung und Brechung an den Luftmolekülen polarisiert. Viele Insekten haben spezielle Augentypen, die die Richtung des an der Atmosphäre polarisierten Sonnenlichts erkennen können, gleich einem zusätzlichen Informationswert. Sie nutzen diese Fähigkeit dazu, sich am Sonnenstand zu orientieren. Auch wenn Wolken sich vor die Sonne schieben, bleibt die Polarisation des Sonnenlichts erhalten. Bienen und Ameisen finden damit immer in ihren Bau zurück. Die Polarisation des Lichts an Wasseroberflächen hilft Käfern, wenn ihr Biotop austrocknet, bei der Suche nach Wasser.[3]



1

Abb. 1 Licht vor und nach dem Durchtritt durch einen Polarisator.
Abb. 2 Lichtreflexe werden mit Polarisationsfilter unterdrückt. Das gleiche Motiv oben ohne, unten mit Polarisationsfilter aufgenommen.

Die Eigenschaft bestimmter Materialien, Licht zu polarisieren, wird bei der Herstellung von Filtern genutzt, z. B. von Dichroidfiltern.



2

1 Vgl. Jost J. Marchesi: *Handbuch der Fotografie. Band 1: Geschichte, Chemisch-physikalische und optische Grundlagen.* Schaffhausen 1993, S. 194 – 201.
2 Vgl. Ekbert Hering, Rolf Martin, Martin Stohrer: *Physik für Ingenieure,* 6. Auflage. Berlin, Heidelberg 1997, S. 468 – 469.
3 Vgl. M. F. Land & D-E. Nilsson: *Animal Eyes.* Oxford 2002, S. 29 – 32.

K22 FILTER[1]

Glas und bestimmte Kunststoffe absorbieren und polarisieren Lichtwellen.
Will man aus allen Farben des Sonnenspektrums nur eine einzige gewinnen, muss ein Farbfilter benutzt werden. Mit seiner Hilfe passiert Licht der gewünschten Farbe das Glas, während alle anderen Spektralfarben absorbiert oder reflektiert werden. Farbfilter arbeiten nach dem Prinzip der subtraktiven Farbmischung. Sie zeigen gleiches Verhalten wie die Pigmente. So erscheint die Komplementärfarbe sehr dunkel bis schwarz. Mit Farbfiltern erzeugte Lichteffekte erscheinen besonders rein, da Farben direkt aus dem Spektrum herausgenommen werden und sich die restlichen Farben des Lichts additiv mischen. Filter kommen besonders in der analogen Fotografie zum Einsatz. Um bei Aufnahmen im Gebirge zu viel Ultraviolett-Strahlung, d.h. einen »Blaustich« der Bilder zu vermeiden, wird ein »Skylight«-Filter verwendet.
Bei der Schwarzweißfotografie benutzt man Farbfilter, um den Kontrast zu verstärken. Die Eigenfarbe des Filters wirkt dabei heller, die Komplementärfarbe hingegen dunkler. Darum erscheint beispielsweise ein mit Gelbfilter aufgenommener bewölkter Himmel kontrastreicher. Grünfilter hingegen dunkeln das komplementäre Rot ab und lassen Grüntöne heller und intensiver erscheinen. Sie kommen insbesondere bei der Landschaftsfotografie zum Einsatz. In der Landschafts- und Architekturfotografie werden Polarisationsfilter verwendet, um störende Spiegelungen und Lichtreflexe auf Wasseroberflächen oder Fensterscheiben zu vermeiden. Diese Filter bestehen aus besonders gestrafften Kunststoffen, deren Moleküle parallel in langen Ketten parallel nebeneinander liegen. So kann nur eine Schwingungsrichtung den Filter passieren.

1 Vgl. http://www.foto-net.de/objektive/filter.html

1

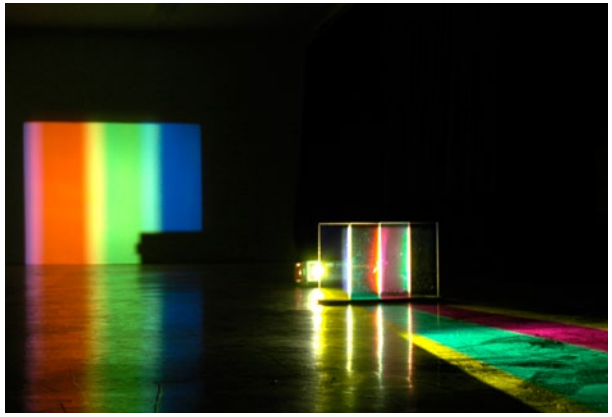
2

Abb. 1 Mit Farbfiltern lassen sich recht genaue subtraktive Farbmischungen herstellen.
Abb. 2 Komplementärfarbige Farbfilter lassen kein Licht passieren.

K23 DICHROIDFILTER

»Dichroos« kommt aus dem Griechischen und heißt zweifarbig. Dichroidfilter haben eine bemerkenswerte Doppelnatur. Sie sind Spiegel, die Licht einer bestimmten Farbe reflektieren und gleichzeitig die Komplementärfarbe des gespiegelten Lichts passieren lassen.
Dichroitische Substanzen, vor allem Kristalle wie Quarz, Kalkspat und Turmalin und besondere Kunststoffe, teilen die einfallenden Lichtstrahlen entsprechend ihrer Polarisation. Dabei hat der eine Teil die immer gleiche materialabhängige Lichtgeschwindigkeit, der andere wird gebrochen und hat einen eigenen richtungsabhängigen Brechungsindex. Die beiden Lichtstrahlen sind dann senkrecht zueinander polarisiert.[1]
Um einen grünen Dichroidfilter herzustellen, werden bis zu fünfzig Kunststoffschichten unterschiedlicher Dicke auf einen Glasträger aufgedampft. Fällt weißes Licht auf den grünen Dichroidfilter, wird magentafarbenes Licht gespiegelt, weil polarisiertes grünes Licht bei der Reflexion durch Interferenz an den dünnen Schichten ausgelöscht wurde. Grünes Licht aber, das senkrecht zum ausgelöschten Licht polarisiert ist, passiert ungehindert den Filter.[2] Der Farbeffekt hängt entscheidend vom Einfallswinkel des Lichts ab.

1 Vgl. Ekbert Hering, Rolf Martin, Martin Stohrer: *Physik für Ingenieure*, 6. Auflage. Berlin, Heidelberg 1997, S. 470 – 473.
Vgl. Jost J. Marchesi: *Handbuch der Fotographie. Band 1: Geschichte, Chemisch-physikalische und optische Grundlagen.* Schaffhausen 1993, S.196 – 197
2 Vgl. Homepage der Firma Rosco, *www.rosco.com*



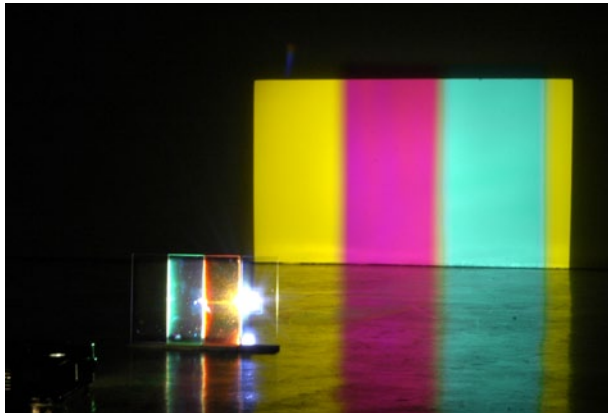
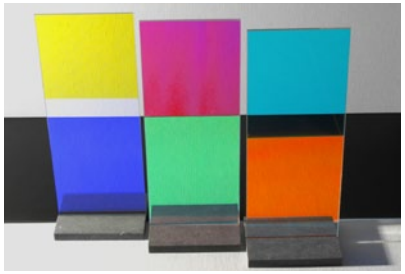


Abb. Vier Dichroidfilter stehen vor einem Diaprojektor. Auf der einen Seite erscheinen die gefilterten Farben (Gelb, Magenta, Cyan), auf der gegenüberliegenden Seite die reflektierten Komplementärfarben (Blau, Grün, Rot), sowie die additiven Mischfarben als schmale Streifen.



K24 GEOMETRISCHE OPTIK

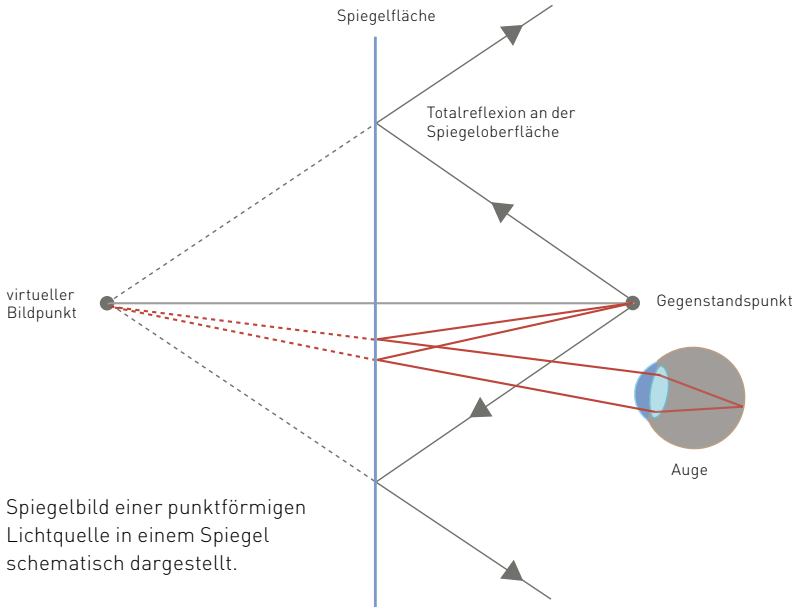
Die Grundvoraussetzung einer geometrischen Physik des Lichts, d.h. der geometrischen Optik, ist die gradlinige Ausbreitung von Lichtstrahlen im Vakuum und in homogenen Medien wie Luft und Glas. Der Weg eines Lichtteilchens kann darin als geradliniger Strahl dargestellt werden. Auch die Senkrechte auf einer Lichtwellenfront stellt einen solchen geraden Stahl dar. Dies ist die eigentliche Bedeutung des Begriffs »Lichtstrahl«. Die Geometrie ist ein gutes Mittel, dieses makroskopische Verhalten des Lichts zu berechnen.

Zum Beispiel gilt für die Reflexion von Lichtstrahlen an spiegelnden Flächen das von Euklid 300 v. Chr. aufgestellte Reflexionsgesetz. Es besagt, dass Einfalls- und Reflexionswinkel gleich sind und der auftreffende und der reflektierte Lichtstrahl in einer Ebene liegen. Dem Betrachter scheint sich ein Spiegelbild als virtuelles Bild hinter der spiegelnden Fläche zu befinden. In diesem haben die Spiegelpunkte den gleichen Abstand zur Oberfläche wie die Punkte des gespiegelten Bildes.[1]

Auch der Strahlengang durch eine Sammellinse lässt sich mit Hilfe der geometrischen Optik darstellen. Für Objekte, die sich innerhalb der Linsenbrennweite befinden, entsteht ebenfalls ein virtuelles Bild. Lichtbrechungen in allen Arten von Prismen sind ebenso geometrisch berechenbar. Die Visualisierung des Strahlengangs in optischen Geräten wie Fernglas und Mikroskop ist eine Anwendung der geometrischen Optik.

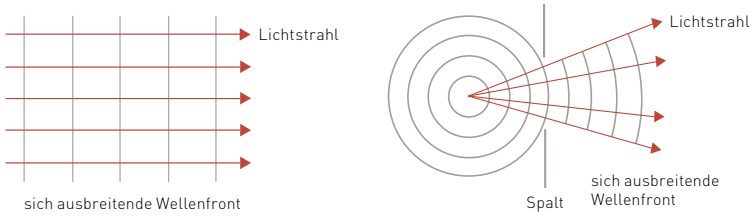
1 Vgl. Ekbert Hering, Rolf Martin, Martin Stohrer: *Physik für Ingenieure*, 6. Auflage. Berlin, Heidelberg 1997, S. 404 – 405.

Spiegelung



Spiegelbild einer punktförmigen Lichtquelle in einem Spiegel schematisch dargestellt.

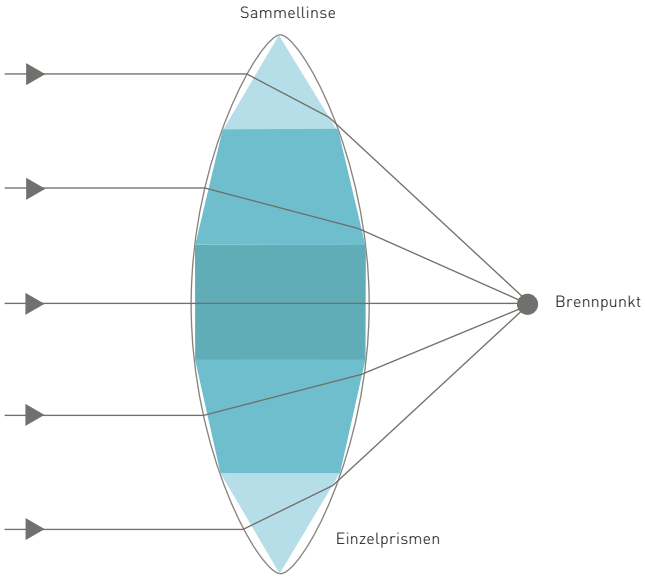
Schematische Darstellungen von Lichtstrahlen



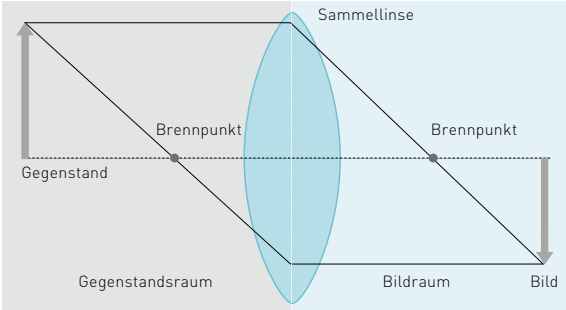
K25 SAMMELLINSE

Sammel- oder Konvexlinsen sind runde, nach außen gewölbte, meist gläserne Körper. Sie sind, mathematisch gesprochen, die Summe unendlich vieler ineinander übergehender Prismen. Parallel auf die Linse auftreffendes Licht wird auf einen Punkt hin gebrochen. Dieser wird als »Brennpunkt« bezeichnet. Wird darin starkes Sonnenlicht gebündelt, kann dort Papier zum Brennen gebracht werden.
Vor der Linse liegt der Gegenstandsraum mit seinen Gegenstandspunkten, dahinter der Bildraum mit den Bildpunkten. In beiden Räumen gibt es wegen der Symmetrie der Linse jeweils einen Brennpunkt. Die beiden Brennpunkte liegen auf einer senkrechten Mittelachse durch die Linse. Im Idealfall wird ein Gegenstandspunkt durch ein Parallelogramm in seinen Bildpunkt überführt. Hinter der Linse entsteht ein umgekehrtes virtuelles Bild. Das Verhältnis der Bildgröße zur Gegenstandsgröße wird Abbildungsmaßstab genannt.[1]
Im Grunde genommen hat das Bild, das in der Kamera auf die Filmebene geworfen wird, nur eine einzige Ebene im Gegenstandsraum, die scharf abgebildet werden kann. Das Auge kann aber beim Scharfstellen der Kamera keineswegs so scharf sehen, und so existiert vor und hinter dieser Ebene ein Bereich, der immer noch als scharf interpretiert wird. Er wird Schärfentiefe genannt.[2]
In der Praxis liefert die Glaslinse fehlerhafte Abbildungen, denn rotes, grünes und blaues Licht hat drei verschiedene Brennpunkte (chromatische Längenaberration).
Auch im Randbereich bricht die Linse stärker als in der Mitte. Wieder treffen sich die gebrochenen Strahlen nicht in einem Punkt. Dies wird als sphärische Aberration bezeichnet.[3]

Abb. 1 Aufbau der Sammellinse als eine Summe vieler Prismen.
Abb. 2 Idealisiertes Schema der Linse.



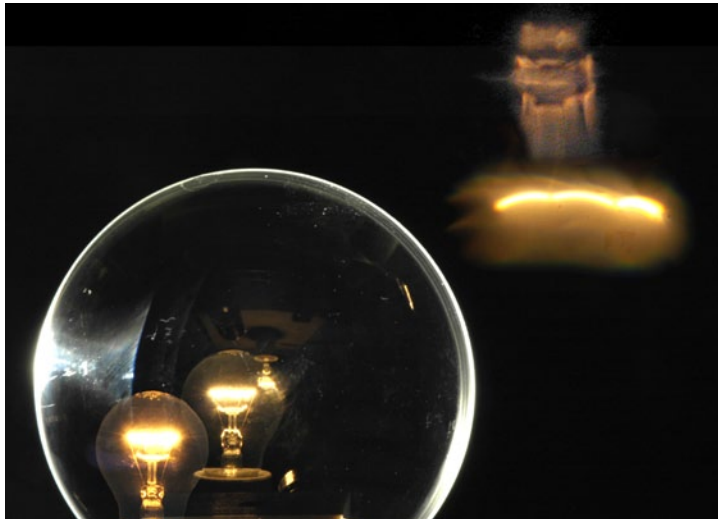
1



2

In der Biologie tragen Linsenaugen elastische, natürliche Sammellinsen, die die gleichen Abbildungsfehler aufweisen. Das Linsenauge und die Verarbeitung optischer Reize im Gehirn haben sich hieran optimal angepasst, so dass dieser »Mangel« nicht wahrgenommen wird.

1 Vgl. Jost J. Marchesi: *Handbuch der Fotografie. Band 1: Geschichte, Chemisch-physikalische und optische Grundlagen.* Schaffhausen 1993, S. 156ff.
2 Vgl. *Marchesi, Handbuch der Fotografie. Band 1,* ebd., S.169 – 173.
3 *Vgl. Marchesi: Handbuch der Fotografie. Band 1*, ebd., S. 225 – 229.



3

Abb. 3 Glaslinse allein und mit Brennpunkt und Projektion.

K26 DISPERSION

Newton erkannte als Erster, dass weißes Licht ein Gemisch aus den verschiedensten Farben ist. Das Hilfsmittel, das er dazu benutzte, war ein geschliffenes Glas mit dreieckigem Querschnitt – ein Prisma. Er konnte damit den einfallenden weißen Lichtstrahl in seine Bestandteile zerlegen. Diesen Vorgang nennt man Dispersion.[1]

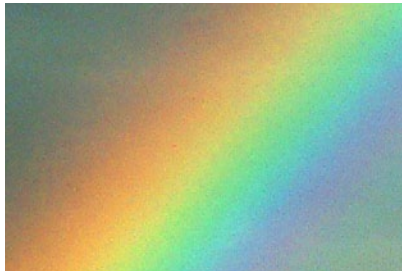
Der Regenbogen beruht auf der Dispersion des Sonnenlichts an Regentropfen, die genau wie das Prisma das Sonnenlicht brechen und auftrennen. Das Band des Regenbogens nennt man »Spektrum« und die entstehenden, nicht weiter auftrennbaren Farben Spektralfarben oder prismatische Farben.

Alle Spektralfarben, in einer Linse gebündelt, ergeben weißes Licht. Das ist der Hintergrund der additiven Farbmischung. Gebrochenes Sonnenlicht erzeugt ein kontinuierliches Spektrum. Leuchtende Gase, so zum Beispiel Neon, weisen nur einige wenige Linien auf, wenn man ihr Licht im Prisma bricht. Sie haben ein diskontinuierliches Spektrum. Jede Lichtquelle hat ihre eigene spektrale Zusammensetzung.

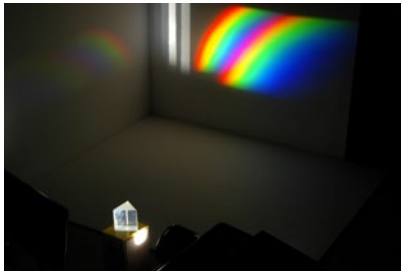
Das Spektrum des sichtbaren Lichts umfasst die Wellenlängen von 380 bis 700 Nanometer (nm). Es wird begrenzt von nicht sichtbarem kurzwelligem Ultraviolett und langwelligem Infrarot und vom sichtbaren Blau und Rot.

Mischt man blaues und rotes Licht, so erhält man das nicht spektrale, 100% gesättigte Magenta und alle Purpur-Farbtöne.

1 Vgl. Ekbert Hering, Rolf Martin, Martin Stohrer: *Physik für Ingenieure*, 6. Auflage. Berlin, Heidelberg 1997, S. 413ff.
Vgl. Jost J. Marchesi: *Handbuch der Fotografie. Band 1: Geschichte, Chemisch-physikalische und optische Grundlagen*. Schaffhausen 1993, S.182 –183.



1



2

3

Spektrum des Lichts

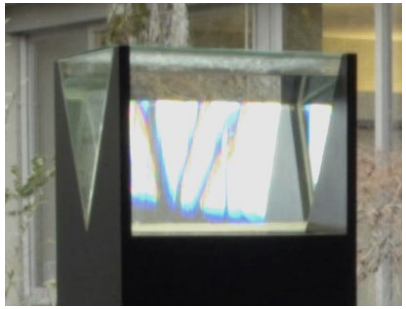
Wellenlängen in nm (Nanometer)

4

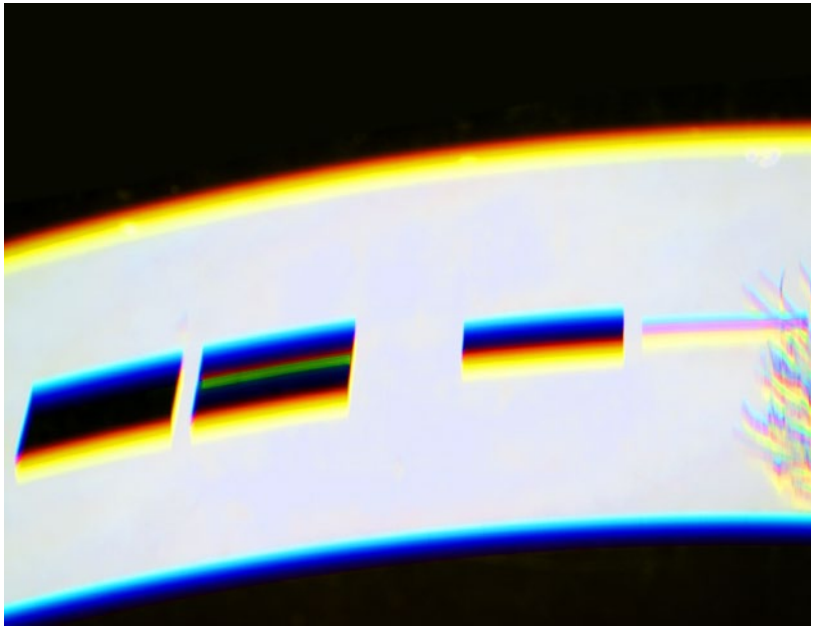
Abb. 1 Der Regenbogen ist ein Beispiel von Dispersion an Regentropfen
Abb. 2 Das Glasprisma teilt weißes Licht in die Spektralfarben.
Abb. 3 Überlagern sich zwei Spektren so, dass der Blau-Bereich des einen sich mit dem Rot-Bereich des anderen mischt, wird Magenta sichtbar.
Abb. 4 Die Skala der Lichtwellenlängen mit ihren Farbtönen.

K27 KANTENSPEKTREN

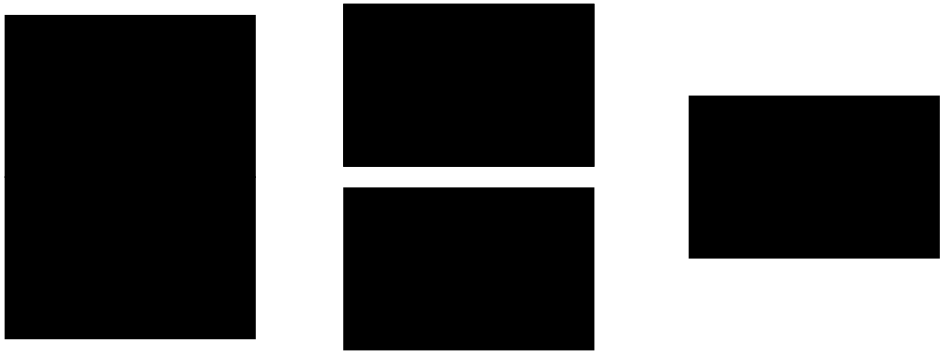
Betrachtet man rechteckige, schwarze Flächen auf weißem Grund durch ein Prisma, so sieht man an den Schwarz-Weiß-Übergängen einen Teil des Spektrums des weißen Lichts, die so genannten Kantenspektren. Sie werden als Farbverläufe sichtbar. Die eine Kante des Rechtecks hat den Verlauf von Rot bis Gelb, die gegenüberliegende Kante von Ultramarin bis Cyan. Hat die schwarze Fläche einen schmalen weißen Spalt, so überlagern sich die Kantenspektren-Anteile Gelb und Cyan zu Grün. Betrachtet man eine dünne schwarze Linie, überlagert sich der Blau-Anteil mit dem Rot-Anteil zu Magenta. Derselbe Effekt wird erreicht, wenn das schwarze Rechteck durch das Prisma über Eck gesehen wird.



1



2



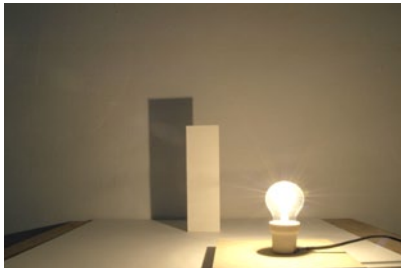
3

Abb. 1 Installation in der Kantonsschule Zürich-Stadelhofen.
Abb. 2 Durch das Prisma betrachtet werden die Kantenspektren sichtbar.
Abb. 3 Die abgebildeten schwarzen Flächen ermöglichen mit einem Prisma die Kantenspektren sichtbar werden zu lassen.

K28 SCHATTEN

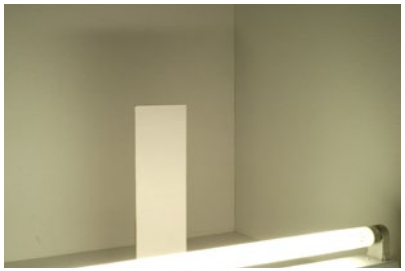
Licht und Schatten gehören unauflöslich zusammen. Dabei spielt die Lichtquelle eine wichtige Rolle. Wesentlich sind ihre Entfernung[1], Form und Lage.
Die weit entfernte Sonne wirft nahezu paralleles Licht auf die Erde. Auf der Grundfläche entstehen klar umrissene Schlagschatten. Künstliche Lichtquellen wie Glühbirnen haben einen viel geringeren Abstand von den Gegenständen und entsprechend werden größere Schatten erzeugt. Auch die räumliche Form der Lichtquelle beeinflusst die Art der Schattenbildung. So wirft beispielsweise das Licht einer kleinen Glühbirne mit klarem Glas einen scharf umrissenen Schatten, während eine Fluoreszenz-Leuchtstoffröhre oder sehr große Glühbirnen aus derselben Entfernung verschwommene Schattengrenzen haben. Den dunkelsten Bereich des Schattenwurfs nennt man Kernschatten, den Übergangsbereich zum Licht Halbschatten. Wenn sich mehrere Schatten überlagern, liegt die Überlagerungszone im Kernschatten.[2] Die Position der Lichtquelle steuert den Schattenwurf und hat Einfluss auf seine Größe. Die Form des Schattens ist ein Wechselspiel der Beziehung zwischen Lichtquelle, beleuchtetem Objekt und Fläche, auf die der Schatten fällt. Diese Beobachtungen beziehen sich alle auf die von den Objekten geworfenen Schatten. Der dem Objekt eigene Schatten wird als Körper- oder Eigenschatten bezeichnet.

1



2

3



4

5

Abb. 1 – 2 Schlagschatten-Variationen durch verschiedene Entfernungen.
Abb. 3 Körperschatten von plastischen Objekten.
Abb. 4 Fluoreszenz-Leuchtstoffröhren haben diffuse Schattengrenzen, Punktlichtquellen dagegen scharf umrissene Schatten. (siehe Abb. 2)
Abb. 5 Kernschatten und Halbschatten bei zwei Lichtquellen.

Die Wahrnehmung der Schatten ist von anderer Qualität, je nachdem, ob man die Gesamtszene im Blick hat oder sich auf ein Detail konzentriert, das im Schatten liegt. Der Blickwechsel allein verändert die Wahrnehmung der Helligkeit. Ein im Schatten liegendes dunkles Objekt erscheint heller, wenn es fokussiert wird. Denn analog zur Farbkonstanz gibt es auch eine Helligkeitskonstanz.[3]

1 Vgl. Ralph M. Evans: *An Introduction to Color*. New York, London 1948, S. 50 – 52.
Vgl. Friedrich Dorn, Franz Bader: *Physik Mittelstufe*. Hannover 1980, S.194 – 195.
2 Vgl. Joachim Grehn (Hg.): *Metzler Physik*, 2. Auflage. Stuttgart 1989, S. 304 – 305.
3 Vgl. Evans, *Introduction to Color*, a.a.O., S. 162.

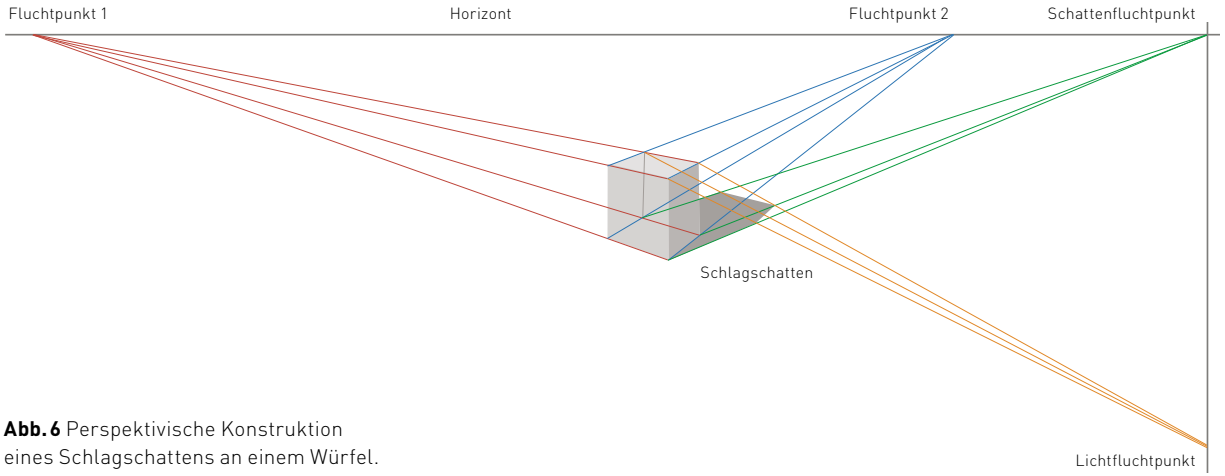
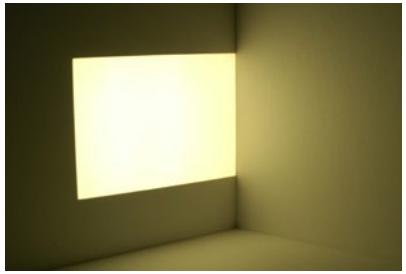


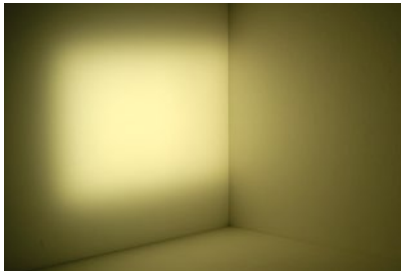
Abb. 6 Perspektivische Konstruktion eines Schlagschattens an einem Würfel.

K29 LICHTSTREUUNG

Lichtstrahlen, die auf nicht transparente Hindernisse auftreffen, werden umgelenkt und in auseinanderstrebende Bündel geteilt. Dabei spielt die Größe des Hindernisses eine entscheidende Rolle für die verlustfreie Umleitung.
Diffuse Lichtstimmungen wie bei Nebel sind Erscheinung der Lichtstreuung. Auch der blaue Himmel beruht auf der Streuung des Sonnenlichts an Luftteilchen in den oberen Schichten der Atmosphäre. Blaues Licht wird hierbei stärker gestreut und intensiv blau wahrgenommen. Selbst die von Prof. Gernot Böhme beschriebenen »Lichtstrahlen«, die sichtbar werden, wenn die Sonne durch die Wolken bricht, sind eine Erscheinung der Lichtstreuung an kleinen kugelförmigen Wassertropfen.[1]
Wird ein Bild auf eine Mattscheibe projiziert, bedingt sich die Bildentstehung durch die Lichtstreuung auf ihrer Oberfläche. Lampenschirme aus Papier oder weißem Glas streuen Licht in gleicher Weise.[2] Auch die Lichtkegel von Projektoren entstehen durch Lichtstreuung an kleinen undurchsichtigen Schwebeteilchen.

1 Vgl. Ulrich Bachmann (Hg.): *Farben zwischen Licht und Dunkelheit.* Sulgen/Zürich 2006, S. 115, *Licht sehen*, Gernot Böhme
2 Vgl. Jost J. Marchesi: *Handbuch der Fotografie. Band 1: Geschichte, Chemisch-physikalische und optische Grundlagen.* Schaffhausen 1993, S. 193.
Vgl. Ralph M. Evans: *An Introduction to Color.* New York, London 1948, S.162.


1


2

3

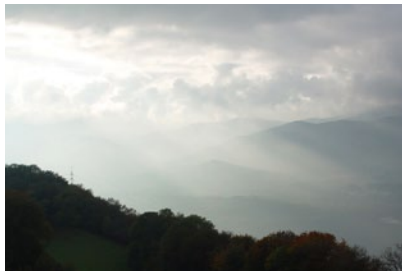
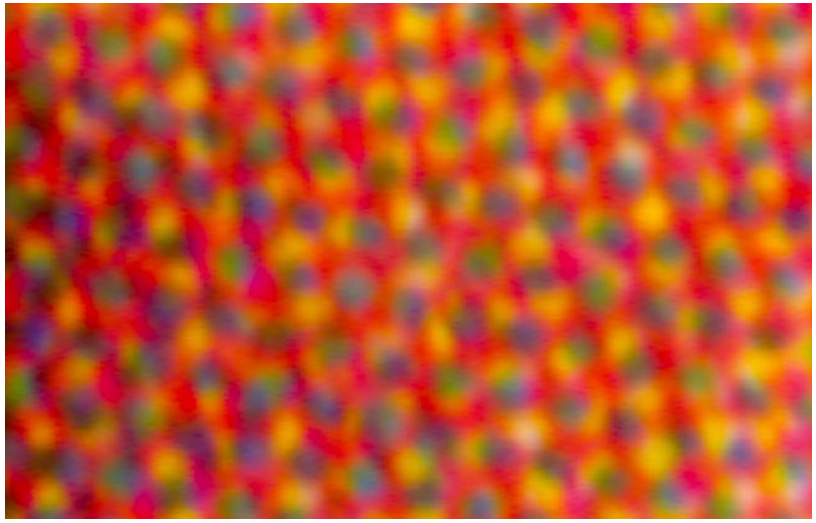

4

Abb. 1 Indirekte Beleuchtung
Abb. 2 Transparente Lampenschirme strahlen Licht in gestreuter Form ab.
Abb. 3 Das Blau des Himmels ist eine Folge der Lichtstreuung.
Abb. 4 Das durch die Wolken brechende Sonnenlicht ist eine Erscheinung der Lichtstreuung.

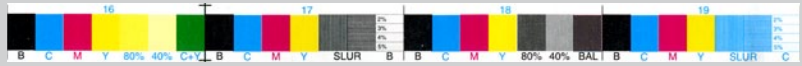
K 30 FARBDRUCK: CMYK

Das Vierfarbendruckverfahren wurde erstmals von Jakob Christoph Le Blon um 1710 angewendet.[1] Der Offset-Druck ist als Flachdruckverfahren am gebräuchlichsten. Mit den Grundfarben der subtraktiven Farbmischung Cyan, Magenta, Gelb und reinem Schwarz werden vier Einzelbilder übereinander gedruckt. Um möglichst viel reine Farbe aufzubringen, werden die Einzelbilder gerastert, d.h. sie werden in eine Vielzahl von nebeneinander liegenden Rasterpunkten zerlegt. Die Punkte sind meist rund, können aber auch elliptisch oder quadratisch sein. Dabei treten unerwünschte Moiré-Muster auf, wenn die Rasterpunkte nicht bestimmte Winkel einnehmen. Beim Farbdruck wird daher jeder Farbe ein bestimmter Winkel zugeordnet. Die im Bild überwiegende Farbe wird immer auf den 45°-Winkel positioniert. Meistens steht das Schwarz in der Nachbarschaft von Gelb auf dem 90°-, Cyan auf dem 105°- und Magenta auf dem 165°-Winkel. Die Feinheit des Rasters entscheidet über die Qualität der reproduzierten Farbskala. Die Grenze ist dort erreicht, wo einzelne Farbpunkte ineinander laufen und die Kontraste in den dunklen Partien des Bildes verloren gehen. Neben der Feinheit des Rasters spielt auch das verwendete Papier eine Rolle. Bei einem hellen Bild im Bogenoffset-Druckverfahren auf gestrichenem Papier kann ein feines Raster verwendet werden. Im Gegensatz dazu müssen für dunkle Bilder auf groben Zeitungspapier im Rollenoffset-Druckverfahren viel größere Rasterweiten verwendet werden.[2]

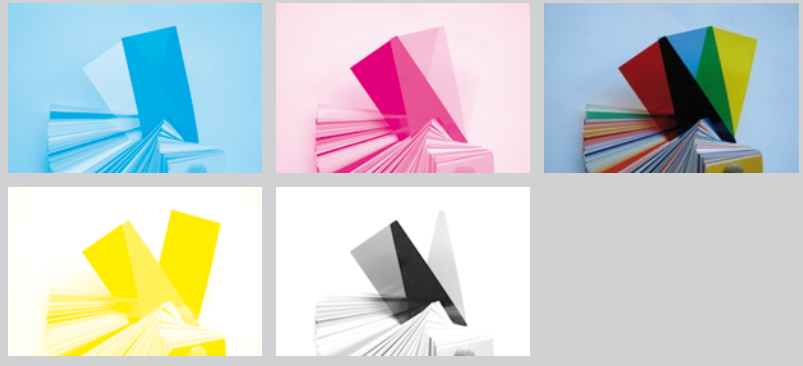
1 Vgl. Norbert Welsch, Claus Chr. Liebmann: *Farbe, Natur, Technik, Kunst.* München 2004, S. 131, S. 324 – 331.
2 Vgl. Mattias Nyman: *4 Farben – ein Bild. Grundwissen für die Farbbildbearbeitung mit DTP,* Berlin, Heidelberg 1994, S. 2 – 5.



1



2



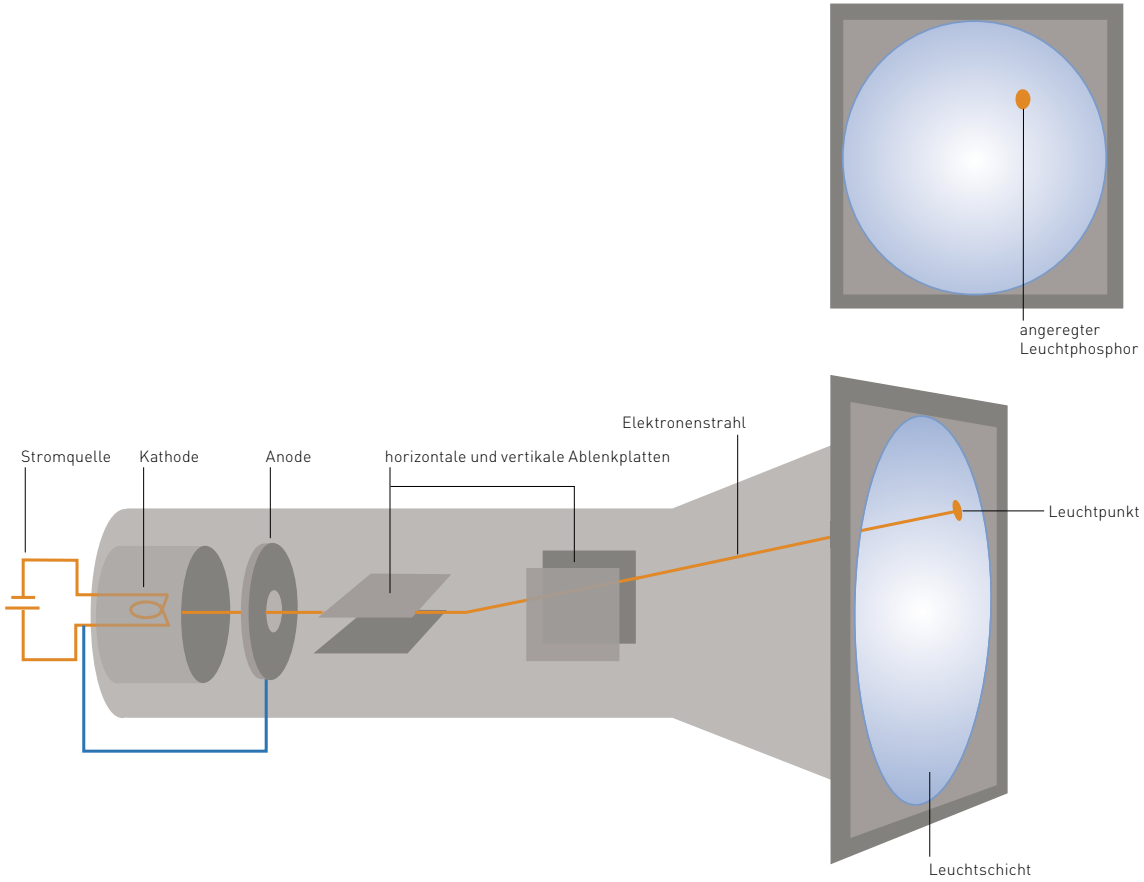
3

Abb. 1 Die Winkelverschiebungen der einzelnen Farben auf einem Vierfarbendruck.
Abb. 2 Auf bedruckten Papierverpackungen findet man auch CMYK- Andruckstreifenproben.
Abb. 3 Jeder Farbkanal hat ein eigenes Bild. Alle Farbkanäle zusammen ergeben das vierfarbige Endprodukt.

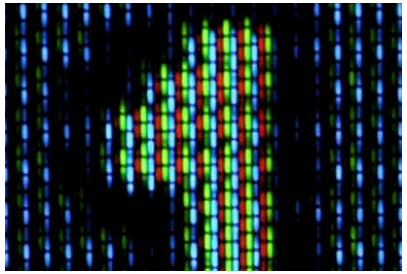
K31 BILDSCHIRM: RGB

Der klassische Bildschirm ist die Braunsche Röhre. Ein Elektronenstrahl wandert zeilenweise über eine mit fluoreszierenden Substanzen beschichtete Glasscheibe. Nach dem Auftreffen beschleunigter Elektronen auf einen Fluoreszenz-Farbstoff wird dort ein Lichtsignal erzeugt. Das Bild eines Schwarzweißfernsehers entsteht, wenn der Strahl 625 Zeilen abtastet. Bei 50 bis 85 Bildern in der Sekunde kann das menschliche Auge sie nicht mehr auflösen.
Röhrenbildschirme von Farbfernsehern arbeiten analog mit drei Strahlen zur Anregung von roten, grünen und blauen Leucht-Phosphoren. Durch additive Farbmischung entsteht das farbige Bild. Bei der Übertragung von Fernsehsignalen nennt man die Helligkeitsinformation Luminanz und die codierte Farbinformation Chrominanz.
Ein wesentlicher Nachteil der Röhrenbildschirme ist ihr Gewicht und die sperrige Form. Dies hat zur Entwicklung so genannter Flüssigkristall- oder LCD-Bildschirme geführt. Zuerst kamen Flüssigkristall-Anzeigen in digitalen Uhren zum Einsatz. Später wurde diese Technik auf Bildschirme übertragen. Im elektrischen Feld können Flüssigkristalle sehr schnell zwischen optisch unterschiedlichen Zuständen wechseln und Licht polarisieren. Flüssigkristalle arbeiten wie Lichtventile. Für jeden Bildpunkt oder Pixel eines farbigen Bildes werden rote, grüne und blaue Farbfelder durchleuchtet. Wird eine Spannung angelegt, werden die Flüssigkristalle ausgerichtet und es wird kein Licht mehr durchgelassen. So wird gezielt die Bildentstehung durch additive Farbmischung an den jeweiligen Bildpixeln gesteuert. Mittlerweile ist diese Art der Bildentstehung aus der digitalen Fotografie und Computertechnologie nicht mehr wegzudenken.[1]

1 Vgl. Norbert Welsch, Claus Chr. Liebmann: *Farbe, Natur, Technik, Kunst.* München 2004, S. 131, S. 337.



1



2

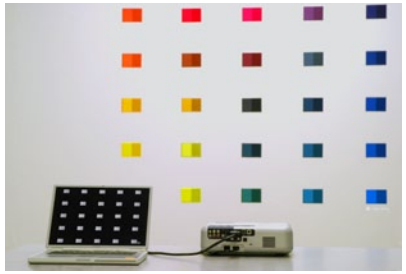
Abb. 1 Schema einer Braunschen Röhre
Abb. 2 Röhrenbildschirm, Bildentstehung durch additive Farbmischung von leuchtenden roten, grünen und blauen Leuchtphosphoren.

K32 BEAMER

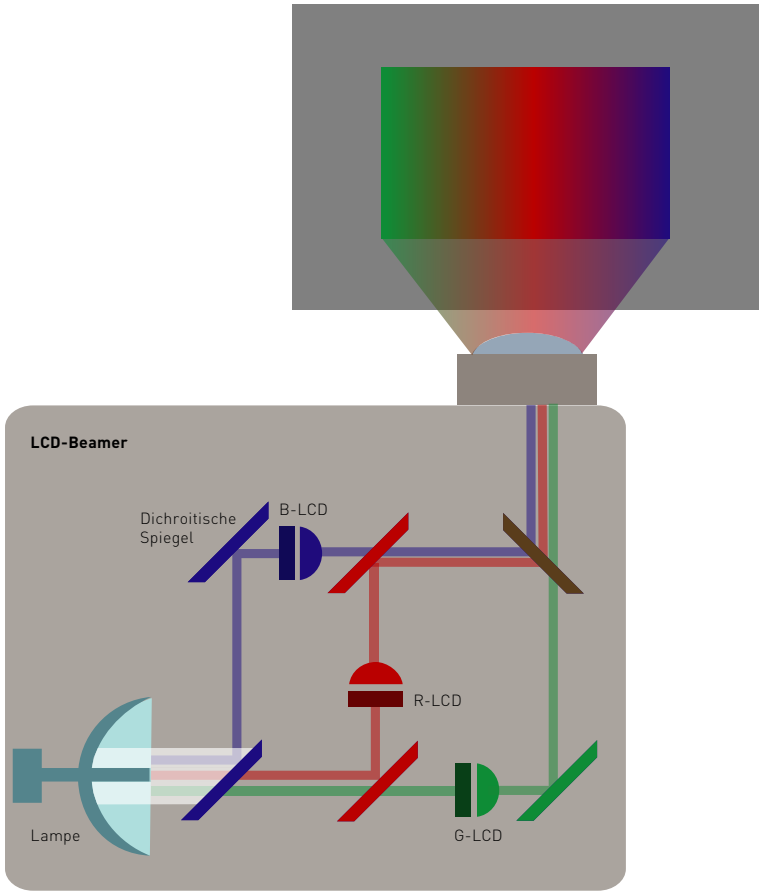
Der Beamer wurde nach dem englischen Wort »beam« (Lichtstrahl) benannt. Er ist ein Projektor, der ein bildgebendes Signal vom Monitorausgang eines Computers oder Laptops empfängt und es wieder in ein eigenes projizierbares Bild umwandelt. Es gibt zwei unterschiedliche Typen von Beamern: LCD- und DLP-Beamer. Beiden gemeinsam ist ihre Optik. Sie vergrößert ein kleines Bild mit einer Linse und bildet es auf einer entfernten Fläche scharf ab.

Beim Flüssigkristall- oder LCD-Beamer wird Licht zunächst durch drei dichroitische Spiegel in die Grundfarben Rot, Grün und Blau zerlegt und gleichzeitig auf viele kleine Flüssigkristallfelder mit eigenen Transistoren geworfen. Elektrische Signale, die vom Computer oder Laptop übertragen werden, entscheiden dort über den Lichtfluss. Drei Prismen vereinigen das Licht der drei Flüssigkristall-Teilbilder zu einem einzigen Bild, welches anschließend projiziert wird. LCD-Beamer erzeugen scharfe, lichtstarke Bilder mit einheitlichen Farben. Sie eignen sich gut für Präsentationen. Allerdings werden zum Teil einzelne Bildpixel sichtbar.

Die andere Beamer-Technik beruht auf der digitalen Licht-Verarbeitung (Digital Light Prozessing). Licht einer eingebauten Lampe fällt durch ein sich schnell drehendes Farbrad. Dieses lässt jeweils rotes, grünes und blaues Licht nacheinander durch eine Linse auf eine Art »Lichtventil« fallen. Es handelt sich hierbei um einen Halbleiterchip, der eine Vielzahl winziger drehbarer Spiegel trägt. Jeder Bildpunkt wird von einem dieser kleinen Spiegel einzeln projiziert. Die Bildinformation wird durch die Stellung der einzelnen Spiegel kodiert. Je nachdem kann ein Punkt auf der Projektionsfläche erhellt oder abgedunkelt werden. Nacheinander entstehen ein rotes, grünes und



1



2

Abb. 1 Die Projektion ist eine Wiedergabe der Bildschirm-Anzeige.
Abb. 2 Aufbau eines LCD- Beamers

blaues Bild, das durch die Trägheit des Auges nicht mehr aufgelöst werden kann und als vielfarbiges Bild erscheint. Diese Geräte können sehr handlich gebaut werden, da ihre Bildgebung nur auf einem Chip beruht. Sie sind sehr lichtstark und erzeugen homogenere Bilder als LCD-Beamer.

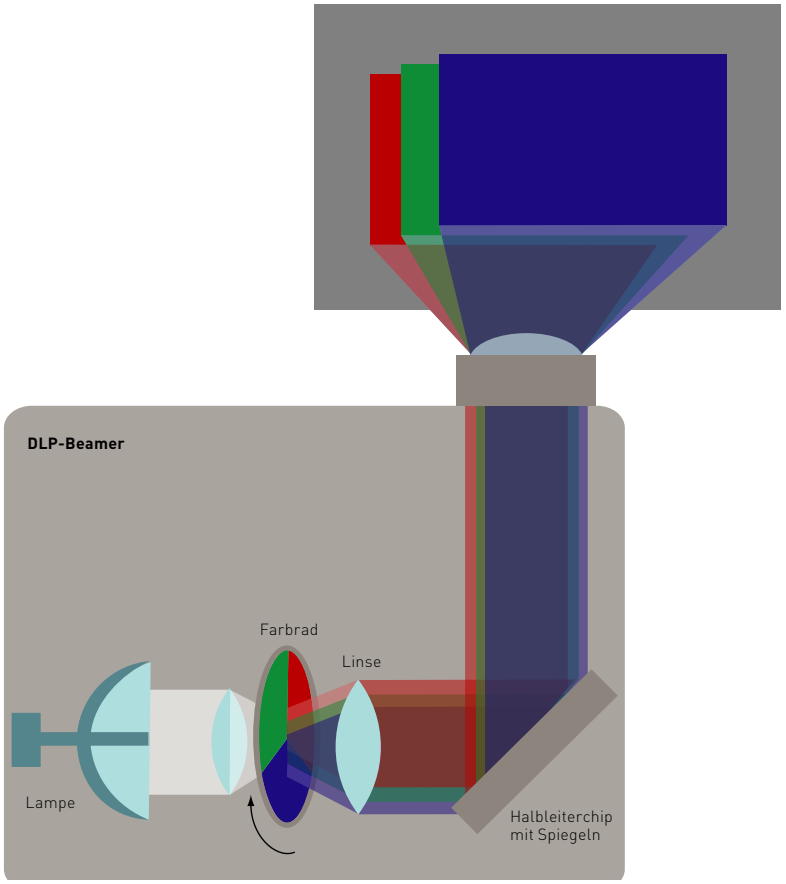


Abb. 3 Aufbau eines DLP- Beamers

3

K33 LED (LIGHT EMITTING DIODE)

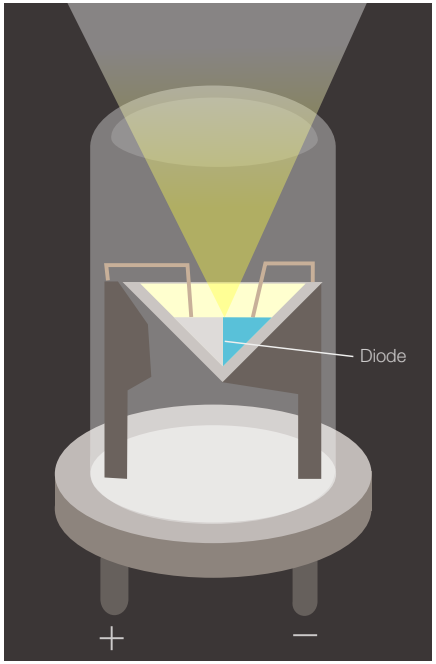
Nach dem Einschalten elektrischer Geräte leuchtet meist ein kleines rotes, grünes oder weißes Lämpchen auf. Dieses energiesparende, »kalte« Leuchten geht von einer leuchtenden Diode oder LED aus. Da hierbei keine Hitze in Lichtrichtung abgestrahlt wird, wie bei anderen Lampen, handelt es sich um ein sogenanntes »kaltes« Leuchten. LEDs werden heute in allen Farben hergestellt. Zuletzt wurden blaue LEDs entwickelt. Rote, grüne und blaue LEDs sind z.B. die Bauelemente von Grossbildschirmen.

LEDs werden aus chemisch veränderten Halbleiter-Materialien hergestellt. Reines Silizium oder Germanium leitet bei Zimmertemperatur keinen Strom. Wird es dagegen etwas erhitzt oder beleuchtet, werden im Kristall gebundene Elektronen freigesetzt. Sie erhöhen die Leitfähigkeit des Halbleiters sprunghaft. Diese halb isolierende, halb leitende Eigenschaft ist die Grundlage unserer heutigen Elektronik. In Verbindung mit anderen Substanzen, die entweder zusätzliche Elektronen liefern oder verschlucken, hat man Halbleiter-Effekte bei Zimmertemperatur erreicht.

Eine Diode ist ein elektronisches Bauelement, das aus einem elektronenreichen n-Halbleiter und einem elektronenarmen p-Halbleiter zusammengesetzt ist. Strom kann nur in einer Richtung die Diode passieren, d.h. nur vom elektronenreichen zum elektronenarmen Halbleiter. Damit kann man ganz gezielt auf kleinstem Raum Stromflüsse lenken.[1]

1

2

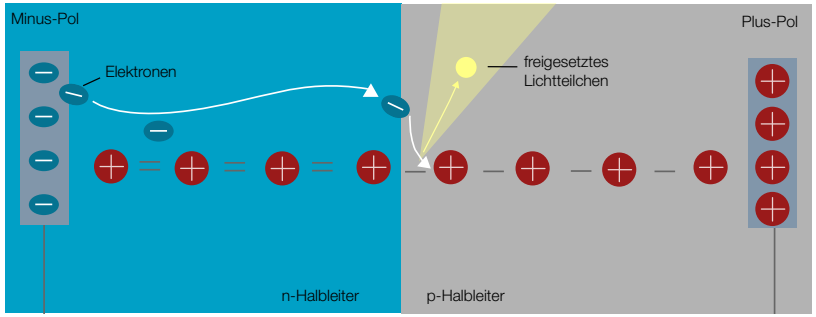


3

Abb. 1 Auf großen LED-Bildschirmen werden alle Farbmischungen erzeugt. Das Präsentieren von Farbfilmen auf LED-Bildschirmen ist inzwischen möglich.
Abb. 2 Nahaufnahme einer LED- Leuchte
Abb. 3 Schematische Darstellung einer LED

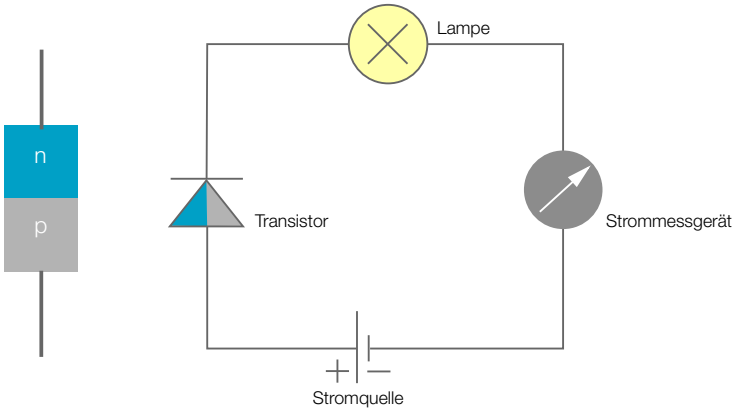
Springen Elektronen vom n-Halbleiter zum p-Halbleiter, werden bei diesem Übergang auch Lichtteilchen freigesetzt. Bei den zuerst eingesetzten Materialien war dieser Effekt nur ganz schwach feststellbar. In den letzten Jahren hat man die Halbleiter chemisch derart verbessert, dass die Ausbeute an freigesetzten Lichtteilchen immer größer wurde. Diese Art der Lichtausbeute ist nicht thermisch wie bei Glühlampen, sondern rein elektronisch.[2]

1 Vgl. Friedrich Dorn, Franz Bader: *Physik Mittelstufe*, Hannover 1980. S. 358 – 360.
2 Vgl. Norbert Welsch, Claus Chr. Liebmann, *Farbe: Natur, Technik, Kunst*. München 2004, S. 338 – 339.
Vgl. Ekbert Hering, Rolf Martin, Martin Stohrer: *Physik für Ingenieure, 6.* Auflage. Berlin, Heidelberg 1997, S. 690 – 691.



2

Abb. 4 Beim Übergang von Elektronen vom n-Halbleiter zum p-Halbleiter werden Lichtteilchen freigesetzt.



K34 WEISSABGLEICH

Die Farbfotografie kämpft seit ihren Anfängen mit dem Problem der Wiedergabe eines wirklichkeitsgetreuen Farbeindrucks bei sich ständig verändernden Lichtverhältnissen. Jede Lichtquelle, sei sie natürlich oder künstlich, hat ihre eigene Farbtemperatur. Diese ist charakterisiert durch eine ihr eigene spektrale Helligkeitsverteilung.
Das menschliche Auge ist in der Lage, sich dem ständigen Wechsel perfekt anzupassen. Selbst Mischlicht in Innenräumen aus einfallendem Sonnenlicht und künstlicher Beleuchtung hat für den Betrachter keinen Farbstich. Das Auge wählt die hellste Stelle des Gesichtsfeldes als Referenz- oder Weißpunkt. Es stimmt alle Farbempfindungen auf diesen Punkt der hellsten Lichtintensität ab, d.h., es macht einen »Weißabgleich.
In der analogen Fotografie begegnet man dieser Problematik mit dem Einsatz von speziellen Filmmaterialien wie beispielsweise Kunstlicht- oder Tageslichtfilmen. Zusätzlich kommen alle Arten von Filtern zum Einsatz. Auch Blitzlicht sorgt für einen Sekundenbruchteil für eine Farbtemperatur der Beleuchtung, die dem Tageslicht sehr nahe kommt.
In der digitalen Fotografie hingegen löst sich die Frage des Weißabgleichs oder der »white balance« auf elegantere Weise. Elektronische Lichtsensoren wandeln dabei ein eingehendes Lichtsignal in ein elektrisches Spannungssignal um.[1] Dieses wird in einen binären Zahlencode übertragen und in Anpassung an das jeweilige Beleuchtungslicht mit einem bestimmten Rechenverfahren umgerechnet. Die Kamera ermittelt an Hand einer weißen oder grauen Bildfläche, welches Rechenverfahren sie anwendet. Für spezielle Lichtverhältnisse kann man aber vom automatischen zu einem manuellen Weißabgleich umschalten. Gerade Mischlichtsituationen führen zu Irritationen der Automatik. Die Kamera stellt sich möglicherweise auf die nicht gewünschte Lichtquelle ein und das Bild bekommt einen Farbstich. In diesem Fall bietet sich ein manueller Weißabgleich auf das gewünschte Beleuchtungslicht an.

1

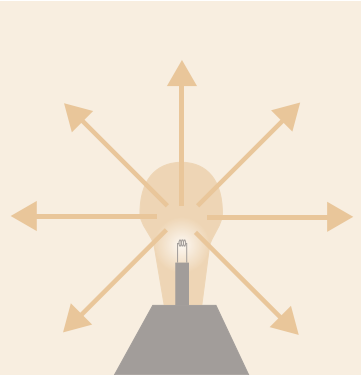
2

Abb. 1 Ohne Weißabgleich erhält die Aufnahme des gleichen Raumes bei Neonlicht einen Blaustich.
Abb. 2 Die Aufnahme des Raumes bei Glühlampenlicht hat ohne Weißabgleich einen Gelbstich.

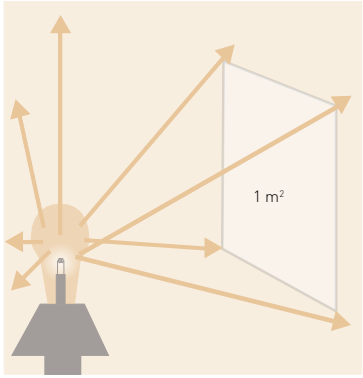
1 Vgl. Jost J. Marchesi: *Handbuch der Fotografie. Band 3: Farbtheorie und Farbmetrik, Farbumkehrtechnik, Negativ-Positiv- und Direkt-Positivtechnik, Digitale Fotografie*. Gilching 1998, S. 247 – 260.

K35 PHYSIKALISCHE WERTE UND EINHEITEN[1]

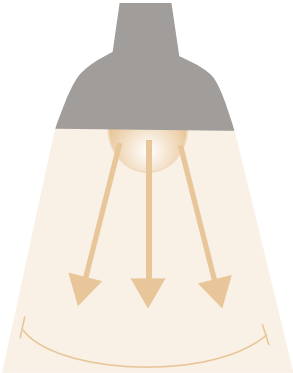
Lichtstrom Ð (Einheit: Lumen [lm]): Die gesamte von einer Lichtquelle ausgehende, sichtbare Strahlung wird als Lichtstrom bezeichnet. (Abb 1)
Lichtmenge Q (Einheit: Lumen mal Sekunde oder Stunde [lms], [lmh]): Der Lichtstrom, der über eine bestimmte Zeiteinheit aufsummiert von einer Lichtquelle abgegeben wird, wird als Lichtmenge definiert.
Beleuchtungsstärke E (Einheit: Lux, das ist Lumen pro Quadratmeter [lx]): Der auf eine Fläche auftreffende Lichtstrom wird als Beleuchtungsstärke definiert. (Abb 2)
Lichtstärke I (Einheit: Candela [cd]): Der Lichtstrom, der in einen bestimmten Raumwinkel (Steradiant) abgestrahlt wird, wird als Lichtstärke bezeichnet. Die Einheit Candela ist der Lichtstrom, den 1/60 cm^2 eines schwarzen Körpers bei der Schmelztemperatur des Platins abstrahlt. (Abb 3)
Leuchtdichte L (Einheit: Candela pro Quadratmeter [cd/m2]): Die Leuchtdichte ist die von einer Oberfläche senkrecht abgestrahlte Lichtstärke. Sie charakterisiert die wahrgenommene Helligkeit einer Substanzfarbe oder Lichtquelle. (Abb 4)
Lichtausbeute Ð (Einheit: Lumen pro Watt [lm/W]): Sie kennzeichnet den erzeugten Lichtstrom, den ein elektrischer Strom liefert.
Farbwiedergabe (Einheit: Ra–Wert): Sie gibt an, wie weit Farben, die durch die Beleuchtung mit einer Lichtquelle hervorgerufen werden, von genormten Farben einer DIN-Lichtquelle abweichen. Bei Ra = 100 erscheinen alle Farben wie unter der optimalen Bezugslichtquelle.
Belichtung H (Einheit: Lux mal Sekunde [lxs]): Sie ist eine wichtige Einheit in der Fotografie. Sie gibt die Dauer an, in der Filmmaterial belichtet wird.



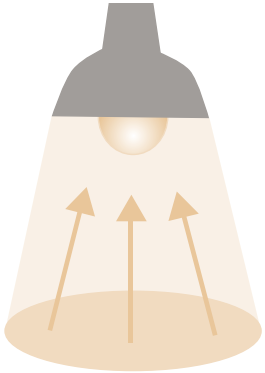
1 Lichtstrom



2 Beleuchtungsstärke



3 Lichtstärke



4 Leuchtdichte

1 Vgl. Jost J. Marchesi: *Handbuch der Fotografie. Band 1: Geschichte, Chemisch-physikalische und optische Grundlagen.* Schaffhausen 1993, S. 137 – 140.

K36 FARBENSEHEN

Zum Farbensehen sind mindestens zwei Lichtsinneszelltypen erforderlich, die unterschiedliche maximale Lichtabsorptionen ihrer Photopigmente aufweisen, damit verschiedene, voneinander unabhängige Informationen zu einem Farbeindruck verrechnet werden können. Ein einziger Typ von Lichtsinneszellen kann nicht unterscheiden, ob ihm viel Licht mit langwelliger energiearmer Strahlung oder wenig Licht kurzwelliger energiereicher Strahlung präsentiert wird. Das farbenblinde Nachtsehen, das nur einen Typ Lichtsinneszellen hat, ist durch diese Einschränkung gekennzeichnet.

Das Tagessehen stützt sich beim Menschen auf drei verschiedene Licht absorbierende Sinneszelltypen, die Zapfen. Diese Lichtsinneszellen werden beim Einstrahlen von Licht einer bestimmten Wellenlänge unterschiedlich gereizt. Ihr werden jeweils drei Einzelwerte zugeordnet, die zueinander in einem ganz bestimmten Verhältnis stehen. Dieses Verhältnis bestimmt den Eindruck einer bestimmten Farbe.

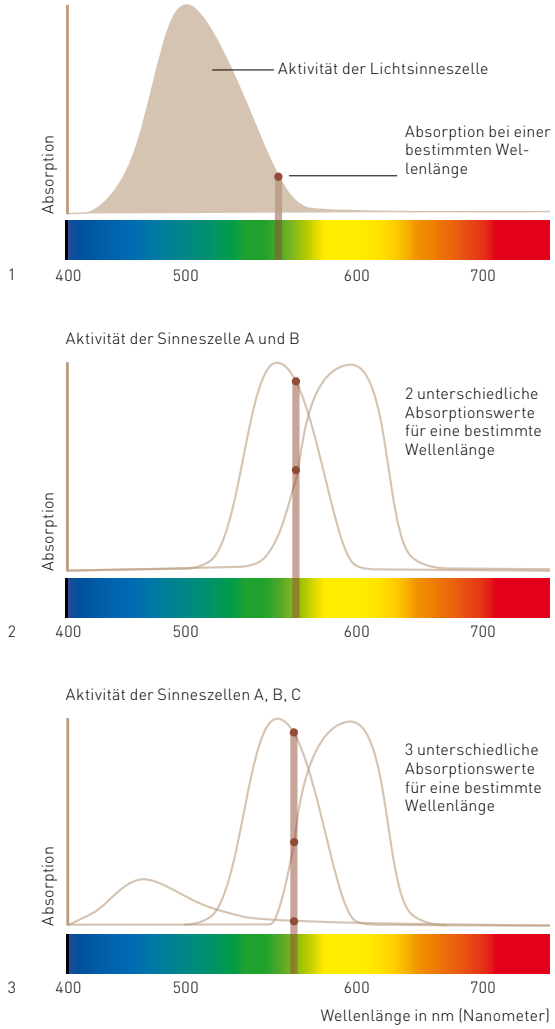
Würde man die Einzelwerte durch das Einstrahlen von drei Lichtwellenlängen erzeugen, so ergäbe sich der gleiche Farbeindruck.[1]

Die Erregungswerte der drei Lichtsinneszelltypen entsprechen dem RGB-Farbraum, der auf der additiven Farbmischung basiert. Die drei Ausgangsfarben Rot, Grün, Blau werden gemischt und führen zu einem wirklichkeitsgetreuen Farbeindruck.

Die menschliche Farbwahrnehmung an sich ist jedoch viel komplexer und nicht allein von den drei Werten der Zapfenabsorptionen abhängig. Allerdings sind sie die notwendige Voraussetzung für das Farbensehen.

Je mehr Typen von Lichtsinneszellen eine Netzhaut in der Tierwelt aufweist, desto differenzierteres Farbensehen ist möglich. Unabdingbare Voraussetzung ist aber in jedem Fall, dass mindestens zwei unterschiedliche Typen von Lichtsinneszellen vorhanden sind.

Abb. 1 Über dem Wellenspektrum des sichtbaren Lichts ist das Sehen mit nur einer Lichtsinneszelle dargestellt. Mit diesem einzigen Typ Lichtsinneszelle ist nur Hell-Dunkel-Sehen möglich, Farben können nicht unterschieden werden.
Abb. 2 Sind zwei Typen von Lichtsinneszellen vorhanden, ergeben sich zwei Absorptionswerte a und b bei einer bestimmten Wellenlänge. Aus dem Verhältnis von a : b ergibt sich die Farbinformation.
Abb. 3 Sind drei verschiedene Typen von Lichtsinneszellen vorhanden, ergeben sich beim Einstrahlen von Licht einer bestimmten Wellenlänge drei Werte a, b und c. Aus dem Verhältnis von a : b : c ergibt sich ein dreifarbiger Sinneseindruck.

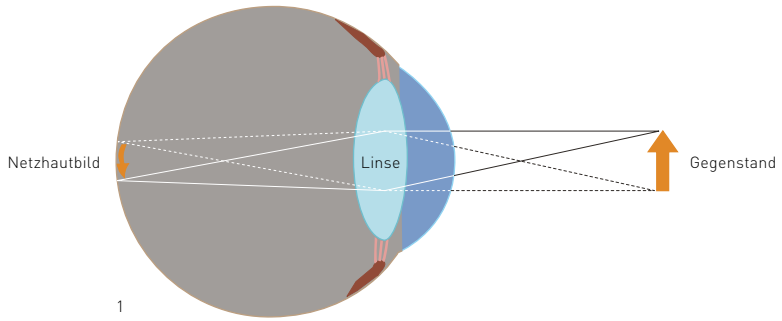


1 Vgl. Werner Schmidt: *Biophysik des Farbensehens*. Konstanz 1999, S. 52–56.

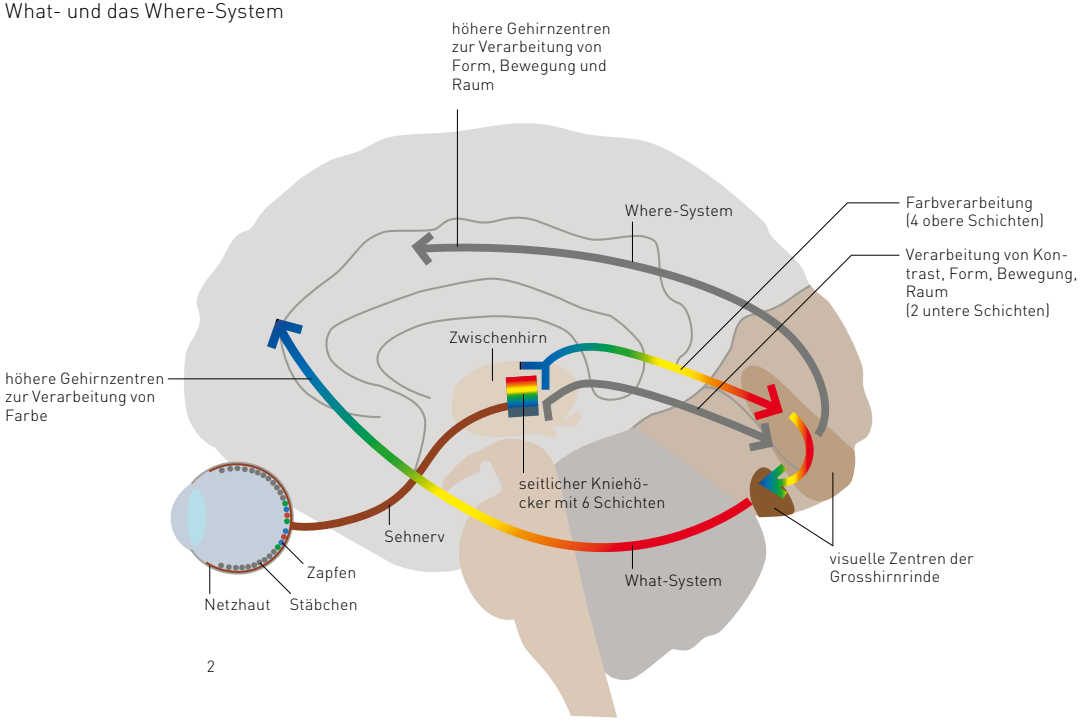
K37 VISUELLE WAHRNEHMUNG

In der Forschung ist viel darüber nachgedacht worden, wie aus einem auf dem Kopf stehenden, nur im zentralen Gesichtsfeld wirklich scharfen Netzhautbild der Eindruck von Wirklichkeit entsteht.
Anhand der Zellreaktion auf allen Stufen der Sehbahn nach bestimmten Reizangeboten konnten erste Rückschlüsse gezogen werden, wie das visuelle System des Menschen arbeitet. Wichtige Erkenntnisse wurden durch das Studium von Schädigungen am visuellen Teil des Gehirns und der Farbenblindheit gewonnen.
Erste Untersuchungen wurden direkt am Sehnerv, d. h. an den Ganglienzellen durchgeführt. Sie ergaben, dass die Netzhaut in rezeptiven Feldern organisiert ist. Die Trennung von Figur und Grund wurde dadurch verständlicher.[1]
Eingehende Untersuchungen am seitlichen Kniehöcker des Gehirns, dem Zielgebiet des Sehnervs, zeigten zwei unterschiedliche Wege der Informationsverarbeitung.[2] Der eine ist unfähig zur Farbdifferenzierung, äußerst empfindlich für kleinste Kontrastunterschiede, weist eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit auf, unter Verlust der vollen Wahrnehmungsschärfe. Er ist verantwortlich für das Sehen von Bewegung, Dreidimensionalität sowie für die Orientierung im Raum. Margaret Livingstone nennt ihn deshalb das Where-System. Der andere Weg arbeitet mit sehr gut aufgelöster Farbwahrnehmung. Diese hat zum einen eine geringere Kontrast-Empfindlichkeit und langsamere Verarbeitung zur Folge, zum andern führt sie dazu, dass Oberflächen und komplexe Details gut erkannt werden können. Livingstone nennt dieses Wahrnehmungssystem das What-System. Die Eindrücke werden also beim Wahrnehmungsprozess in bestimmte Kategorien unterteilt und dann getrennt verarbeitet.

Abb. 1 Idealisiertes Schema des Strahlengangs im Auge. Die konvexe Linse sammelt das einfallende Licht. Es entsteht ein auf dem Kopf stehendes Netzhautbild.
Abb. 2 Die Trennung der unterschiedlichen Wahrnehmungsaspekte in zwei voneinander getrennte Systeme: das What- und das Where-System



1



2

Dabei laufen alle Verarbeitungsvorgänge gleichzeitig und miteinander vernetzt ab. Die beiden Systeme steuern jeweils ihren Teil zu einem Gesamteindruck der Umwelt bei.
Eine weitere wichtige Eigenschaft der visuellen Wahrnehmung ist das Streben nach Konstanz. In einer physikalisch sich ständig verändernden Welt ist die Konstanz der Wahrnehmung unabdingbar und bildet die eigentliche Voraussetzung für die biologisch sinnvolle Nutzung der visuellen Möglichkeiten.[3]

1 Vgl. David Hubel, Torsten Wiesel: *Brain and Visual Perception. The story of a 25-Year Collaboration*. Oxford 2005, S. 93–103.
2 Vgl. Margaret Livingstone: *Vision and Art. The Biology of Seeing*. New York 2002, S. 46–68.
3 Vgl. Vincent Walsh, Janusz Kulikowski: *Perceptual Constancy. Why things look as they do*. Cambridge 1998, S. 262–282 u. 323–351.

Abb. 3 Bei der Bildmontage von Leuten in einem Park fällt sofort auf, wenn die Größenkonstanz nicht berücksichtigt wird.

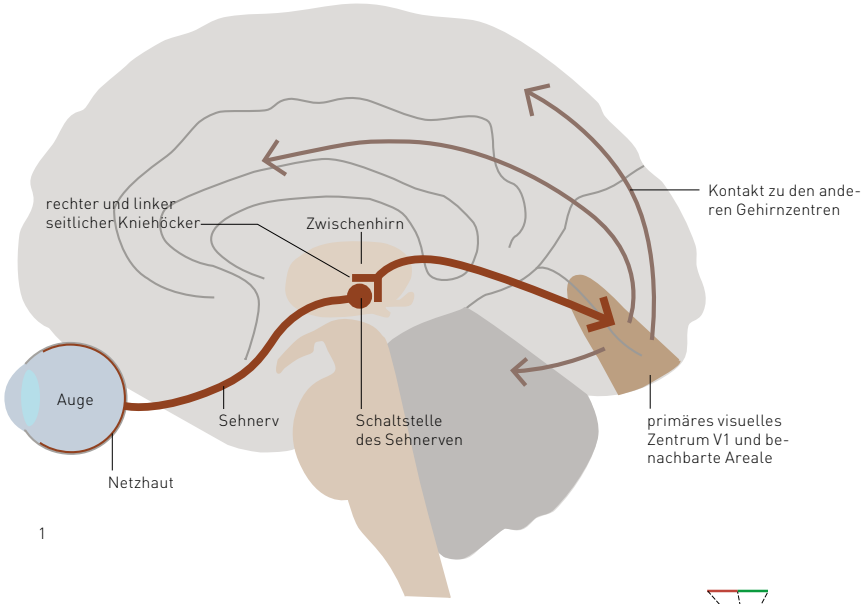
K38 SEHBAHN

Lichtreize werden in einer Kette von aufeinander folgenden Nervenzellen verarbeitet, die als »Sehbahn« bezeichnet wird. Ihr Ausgangspunkt ist die Netzhaut. Ihre Lichtsinneszellen schicken elektrische Impulse über den Sehnerv ins Zwischenhirn und von dort aus weiter zu den visuellen Verarbeitungszentren der Großhirnrinde im Hinterkopf, die wiederum mit vielen anderen Gehirnzentren in Verbindung stehen.[1]

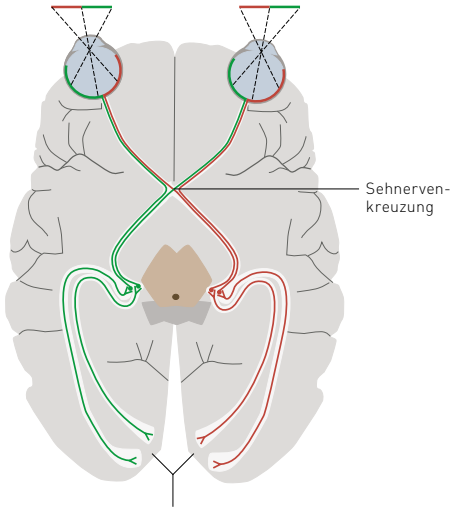
Circa 126 Millionen Lichtsinneszellen werden auf 1 Million Sehnervenzellen geschaltet. Das Innere des Sehnervs steht mit der zentralen Region der Netzhaut, der Sehgrube, in Verbindung. Sein Äußeres bekommt Eingänge aus der Peripherie der Netzhaut. Das weist auf die Topographie der Netzhaut hin, die als Karte in der Sehbahn erhalten bleibt. Nachbarschafts-Beziehungen zwischen Lichtsinneszellen spiegeln sich im Bau der nachgeschalteten Verarbeitungszentren.[2]

Da zudem Signale aus zwei Augen verarbeitet werden, müssen die Verarbeitungswege sorgfältig aufeinander abgestimmt werden. Auf der Höhe des Zwischenhirnbodens kommt es zur Sehnerven-Kreuzung (Chiasma Optikum). Hier werden die optischen Eingänge regelrecht sortiert. Was in der Netzhaut rechts liegt, wird in der rechten Gehirnhälfte verarbeitet, was links liegt in der linken Gehirnhälfte.

Die Fasern der Sehnerven enden auf den Zellen des rechten und linken seitlichen Kniehöckers im Zwischenhirn. Die topographische Karte der Netzhaut ist hier gut erkennbar. Die Region der Sehgrube ist hier überproportional vertreten, was der hohen Auflösung des zentralen Sehens entspricht. Im Kniehöcker, mit seinen sechs Schichten, kommt es zu einer Trennung der Bildverarbeitung[3]:



1



2

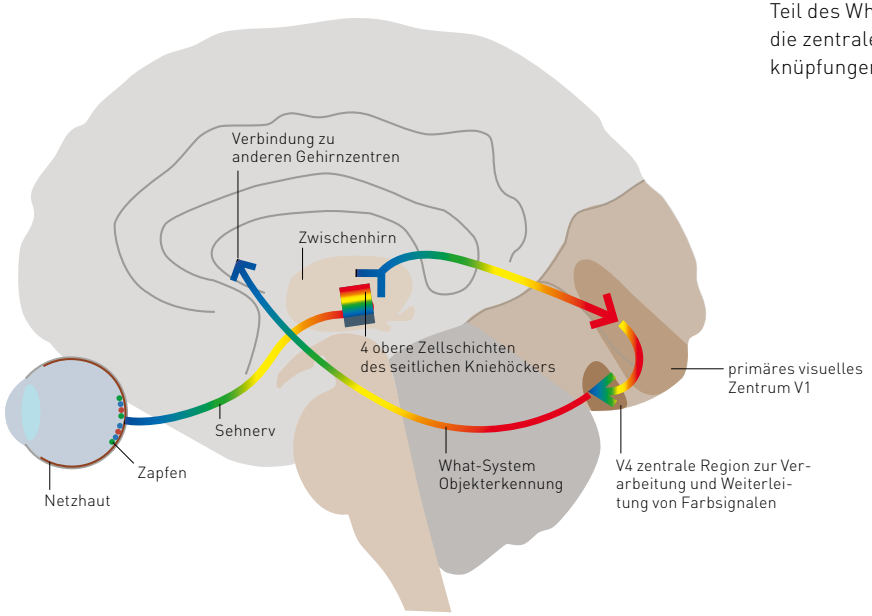
Abb. 1 Schematische Darstellung der Sehbahn, von der Seite gesehen.
Abb. 2 Schematische Darstellung der Sehnerven-Kreuzung, die bewirkt, dass rechte und linke Netzhautbereiche auch jeweils in der rechten und linken Gehirnhälfte verarbeitet werden. Die Linse bewirkt eine Umkehrung des Netzhautbildes, was aber nicht weiter wahrgenommen wird.

Die zwei unteren Schichten mit großen Zellkörpern verarbeiten sehr schnell Kontraste, Bewegung, räumliche Tiefe, sind aber farbenblind. Die vier oberen Schichten mit kleinen Zellen reagieren kaum auf Kontraste, arbeiten langsamer, sind aber empfindlich für farbiges Licht. Sie sind ein Teil des farbverarbeitenden Sehsystems.[4]
Die getrennte Verarbeitung der Bildinformation wird an das Großhirn weitergeleitet. Die erste Station im Großhirn ist das primäre visuelle Zentrum. Liegt eine Schädigung vor, erblindet der Patient trotz intakter Augen und Sehnerven. Beeinträchtigungen in den Kontaktgebieten des primären visuellen Zentrums schränken das Erkennen des Gesehenen ein. Von dort aus werden immer spezialisierte Großhirnregionen angesteuert. Bei Störungen dieser Verbindungen können Linien und Teile eines Gesichts beispielsweise klar erkannt werden, nicht aber die Person, zu der es gehört.

1 Vgl. Margaret Livingstone: *Vision and Art. The Biology of Seeing*. New York 2002, S. 48.
Vgl. N. Welsch, C. Liebmann: *Farbe*. Heidelberg 2003, S. 255.
Vgl. Stephen E. Palmer: *Vision Science. Photons to Phenomenology*. Cambridge 1999, S. 25.
2 Vgl. Robert F. Schmidt, Gerhard Thews: *Physiologie des Menschen*. Berlin, Heidelberg, New York 1995, S. 295–296.
Vgl. Roger Eckert: *Tierphysiologie*. Stuttgart, New York 1993. S. 263.
3 Vgl. Margaret S. Livingstone, David H. Hubel: »*Psychological Evidence for Separate Channels for the Perception of Form, Color, Movement and Depth*«, in: *The Journal of Neuroscience*, 7 (11), November 1987, S. 3416–3468.
4 Vgl. Livingstone, *Vision and Art, a.a.O.*, S. 46–52.

K39 FARBVERARBEITUNG IM GEHIRN

Abb. Innerhalb der Sehbahn hat die Farbbahn ihren eigenen Platz. Sie ist Teil des What-Systems. Das Areal V4 ist die zentrale Stelle für alle weiteren Verknüpfungen zu anderen Gehirn-Zentren.



Von der Netzhaut bis zu höheren Gehirnzentren verläuft die Verarbeitung der Farbreize auf einer Kette von Nervenzellen, die man die Farbbahn nennt. Die Analyse von Bildeigenschaften wie Tiefe, Bewegung, Kontrast und Form findet von der Farbe getrennt statt.[1]
Die farbcodierenden Zapfensignale der Netzhaut werden im Sehnerv in Ganglienzellen gesammelt. Sie ziehen ins Gehirn und übertragen ihre elektrischen Impulse auf die vier oberen Zell-Schichten des seitlichen Kniehöckers. Er besteht aus den vier oberen Schichten der sehr kleinen Zellen (P-Zellen), und zwei unteren Schichten mit viel größeren Zellen (M-Zellen).
Die Untersuchung der P-Zellen ergab, dass sie fähig sind, auf farbige Lichtreize zu reagieren. Sie arbeiten langsamer und sind nicht sehr empfindlich für Kontrastunterschiede. Ihre rezeptiven Felder haben ein einfarbiges Zentrum und ein komplementärfarbiges Umfeld. Zentrum und Umfeld zeigen gegensätzliche Arbeitsweisen. Auf nachgeschalteten Verarbeitungsstufen nimmt die Komplexität der rezeptiven Felder weiter zu. Anatomisch gehören die Zellen der Farbbahn zu dem Teil der Wahrnehmung, die mit der Objekterkennung verbunden ist. Farbigkeit und Objekterkennung bilden ein System, das Livingstone als das »What-System« beschreibt.[2]
Die Farbbahn führt weiter zur primären visuellen Großhirnrinde. Auch diese hat definierte Zellschichten, die hereinkommende Farbsignale aufnehmen und an tropfenförmige Zellkomplexe (blobs) weitergeben. In Blob-Regionen findet man vermehrt farbempfindliche Zellen.
Die weitere Farbverarbeitung findet im Areal V4 der Großhirnrinde im Bereich des Hinterkopfs statt. Es liegt in der Nachbarschaft der primären visuellen Grosßhirnrinde (V1), die alle Signale der visuellen Wahrnehmung zunächst auffängt. Menschen mit geschädigtem V4-Areal sind weder zum Farbensehen noch zum Farbverständnis fähig. Ihre Welt gleicht einem Schwarzweißfilm. Sie können sich auch keine Farben vorstellen.

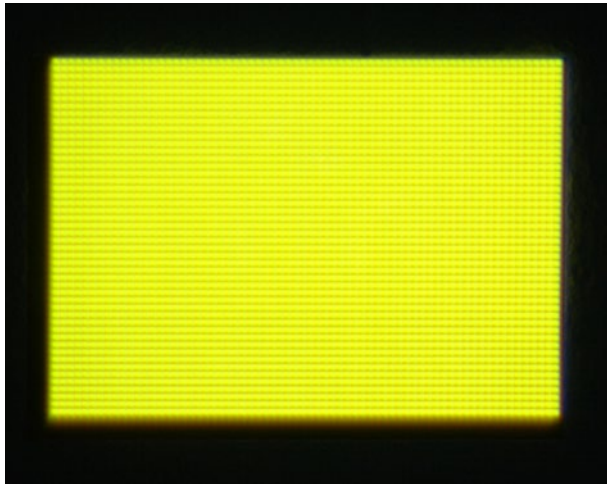
1 Vgl. John G. Nicholls, A. Robert Martin, Bruce G. Wallace: *Vom Neuron zum Gehirn. Zum Verständnis der zellulären und molekularen Funktion des Nervensystems*. Stuttgart, Jena, New York 1995, S. 427.
Vgl. Margaret Livingstone, David Hubel, »*Psychological Evidence for separate Channels for the Perception of Form, Color, Movement, and Depth*«, in: *The Journal of Neuroscience*, November 1987, S. 3416–3468.
Vgl. Margaret Livingstone, David Hubel, »Segregation of Form, Color, Movement and Depth: Anatomy, Physiology and Perception«, in: *Science*, May 6, 1988, S. 740 – 749.
2 Vgl. Margaret Livingstone: *Vision and Art. The Biology of Seeing*. New York 2002, S. 46–67.

K40 FARBKONSTANZ

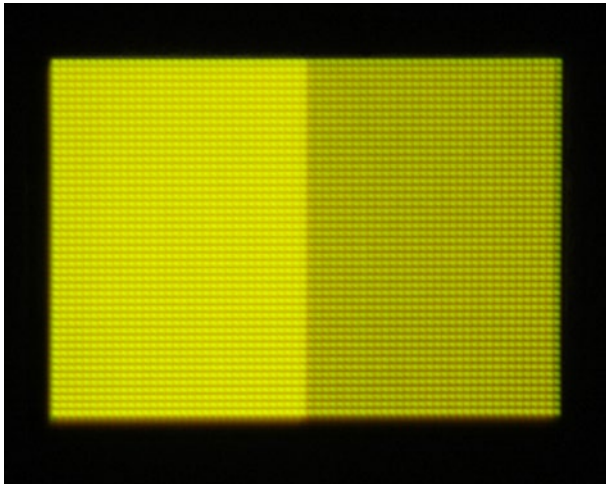
Beim unbedarften Fotografieren von Außen- und Innenräumen kann es dazu kommen, dass alle bei Kunstlicht im Innenraum aufgenommenen Bilder einen Gelbstich aufweisen. Beim Betreten des Innenraumes stellt sich die Wahrnehmung sofort auf die Kunstlicht-Situation ein, ohne dass dem Betrachter die Andersartigkeit der künstlichen Lichtquelle bewusst wird. Das Gleichbleiben der wahrgenommenen Farbigkeit unabhängig von der Lichtquelle wird Farbkonstanz genannt. Dieser Prozess unterdrückt die Wahrnehmung der Erscheinungsfarben, die in stetigem Wandel begriffen sind. Mit Übung und Konzentration auf einzelne Farbtöne lassen sich Erscheinungsfarben aber auch bewusst wahrnehmen.

Lichtsinneszellen reagieren auf unterschiedliche Farbwerte immer in einem Gesamtzusammenhang. Sie sehen einzelne Flächen nie isoliert. Auch bei der weiteren Verarbeitung der Lichtinformation spielt das reflektierte Licht der gesamten Umgebung eine Rolle. Die hellste Stelle liefert dabei einen Referenzwert, dem sich das visuelle System anpasst: den Weißpunkt. Dazu analog macht die digitale Fotografie einen Weißabgleich, um Bildpunkte in Anpassung auf die Farbtemperatur der Lichtquelle zu berechnen.

Die ersten überraschenden Untersuchungen zur Farbkonstanz kamen 1986 von Edwin Land, dem Erfinder der Sofortbild-Kamera. Er beobachtete, dass eine beleuchtete Einzelfläche vor schwarzem Hintergrund ihre Farbigkeit in Abhängigkeit vom Beleuchtungslicht deutlich veränderte. Wurde sie dagegen in einen Zusammenhang mit gleichwertigen Farbflächen gestellt, so war, unter Beibehaltung des Gesamteindrucks, der physikalische Wechsel der Farbigkeit der Einzelfläche nicht mehr wahrnehmbar. Land zeigte, dass durch den Einfluss der Farbkonstanz gleiche Farbeindrücke unter wechselndem Licht möglich sind.[1]



1



2

Die Erklärung der Farbkonstanz erfordert das Verständnis des gesamten visuellen Systems auf allen seinen Ebenen und ist bis heute Gegenstand intensiver Forschung.[2]

1 Vgl. John G. Nicholls, A. Robert Martin, Bruce G. Wallace: *Vom Neuron zum Gehirn.Zum Verständnis der zellulären und molekularen Funktion des Nervensystems. Stuttgart,* Jena, New York 1995, S. 431.

2 Vincent Walsh, Janusz Kulikovsky: *Perceptual Constancy. Why things look as they do.* Cambridge 1998, S. 323ff.

Abb. 1 Unter weissem Beamer-Licht erscheinen Oberflächenfarben einheitlich in der entsprechenden Farbe.

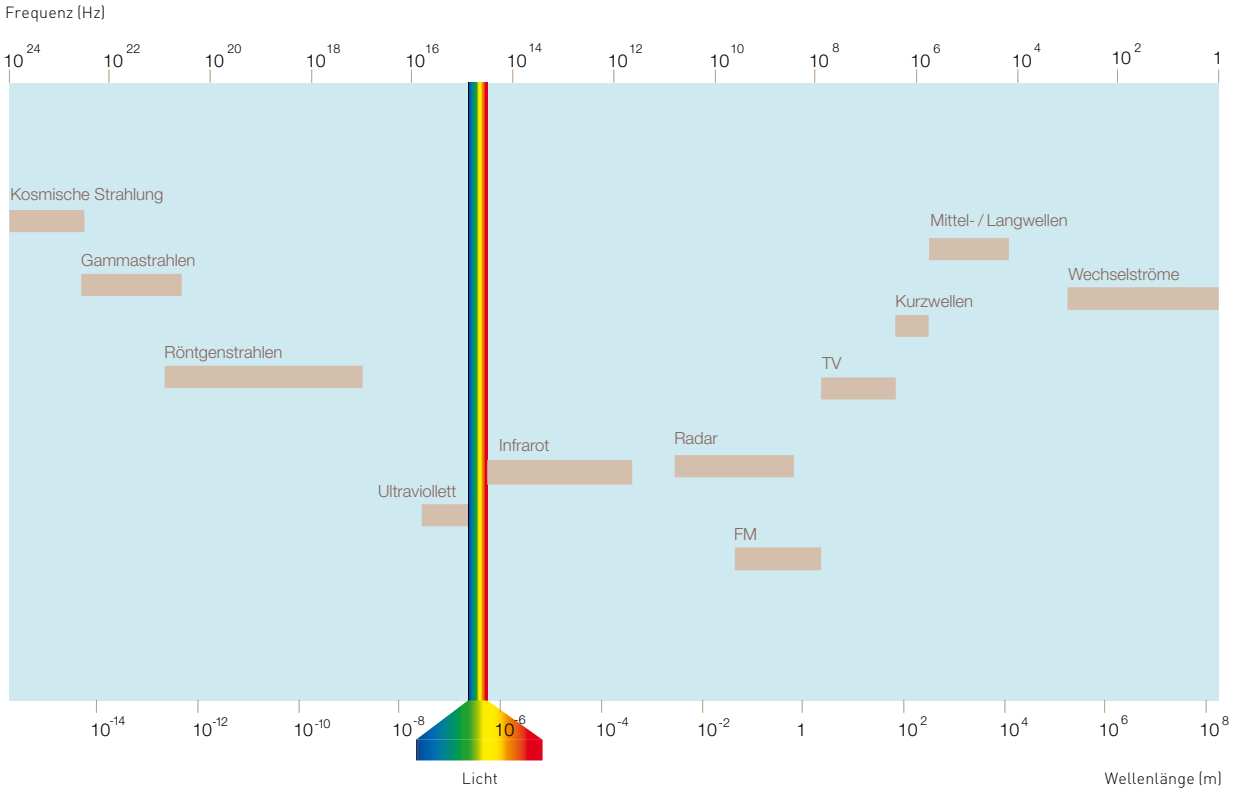
Abb. 2 Wird die Lichtintensität vermindert, so dass die helle und dunkle Erscheinungsfarbe direkt aneinander grenzt, kann es zu auffälligen Farbveränderungen kommen. So wird z.B. Zitronengelb als Olivgrün wahrgenommen. Fehlt dieser Vergleich, fällt uns diese Farbänderung infolge der Farbkonstanz kaum auf.

K41 LICHT (BIOLOGISCH)

Der Mensch ist umgeben von einem breiten Spektrum elektromagnetischer Wellen.[1] Sein Lebensraum ist durchflutet von sehr kurzwelliger kosmischer Strahlung und den künstlich erzeugten Lang- bis Ultrakurzwellen der Radio-, Fernseh- und Handy-Stationen. Für das menschliche Auge ist aber nicht das gesamte Wellenspektrum sichtbar, sondern nur der Bereich von 380–760 Nanometer (das sind Milliardstel Meter). Die Wellen dieses sehr kleinen Bereichs stellen für uns das sichtbare Licht dar. Ultraviolettes Licht ist für den Menschen unsichtbar, ebenso wie die langwellige Infrarot-Strahlung, die er nur als Wärme empfindet.
Die dazugehörigen Lichtteilchen werden Photonen genannt. Fallen sie auf die lichtempfindliche Netzhaut des Auges, löst dies ein Signal aus, das vom Nervensystem registriert wird.

1 Vgl. Jost J. Marchesi: *Handbuch der Fotografie*, Band 1. Schaffhausen 1993, S. 125–126.

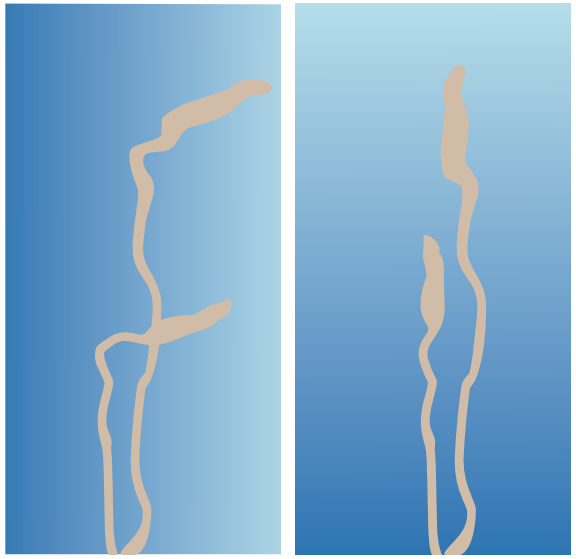
Abb. Nur ein kleiner Teil des elektromagnetischen Wellenspektrums ist sichtbar und wird Licht genannt



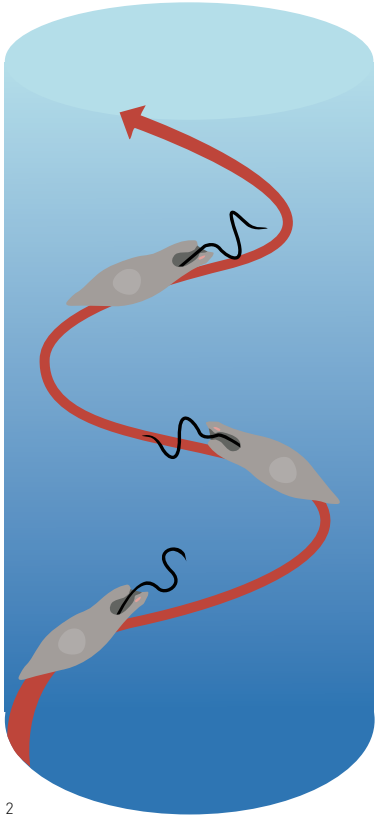
K42 LICHTSINN

In der Photosynthese ist Licht die Basis der Energiegewinnung und ein wichtiger Faktor, der Lebensräume bestimmt. Lebewesen, ob Einzeller, Vielzeller, Pflanzen, Tiere und Menschen sind fähig, auf Licht zu reagieren und sich am Lichteinfall zu orientieren.
Auf der Suche nach optimalen Lebensbedingungen messen selbst Einzeller die Intensität und den Wellenlängenbereich des Umgebungslichts mit Hilfe lichtempfindlicher Strukturen.[1] So bewegen sie sich in Abhängigkeit von der Richtung des einfallenden Lichts (Phototaxis).
Bei Pflanzen verbessert sich der Prozess der Photosynthese, wenn sie ihre Blätter dem Licht entgegenstrecken (Photoropismus).[2] Der dabei gebildete Sauerstoff ist die Existenzgrundlage der atmenden Lebewesen.

1 Vgl. Jerome J. Wolken: *Light Detectors. Photorezeptors and Imaging Systems in Nature.* Oxford 1995, S. 17ff.
2 Vgl. *ebd.*, S. 64ff.



1



2

Abb. 1 Der Pilzkörper von Dictyostelium giganteum richtet sich nach der Richtung des einfallenden Lichts aus.
Abb. 2 Euglena grazilis, ein Einzeller, misst die Lichtrichtung und schwimmt mit Hilfe seiner Geißel dem Licht entgegen.

K43 AUGE

Das Auge stellt ein hoch entwickeltes Organ dar, für das drei Bestandteile wesentlich sind: ein Apparat zur Lichtsammlung, ein Komplex lichtempfindlicher Zellen und die Anbindung an ein Nervensystem. Sein Bau kann sehr unterschiedlich sein, aber das zugrunde liegende Prinzip ist immer dasselbe.
Die Besonderheit der Lichtsinneszellen ist ihre Fähigkeit zur Absorption von Lichtteilchen und die Übersetzung dieses Ereignisses in die Sprache der Nervenzellen. Das erzeugte Signal wird weitergeleitet und verarbeitet. Die Sprache der Sinnenszellen codiert sehr präzise die Qualität des eingestrahlten Lichts und vermittelt einen genauen Eindruck der Außenwelt.

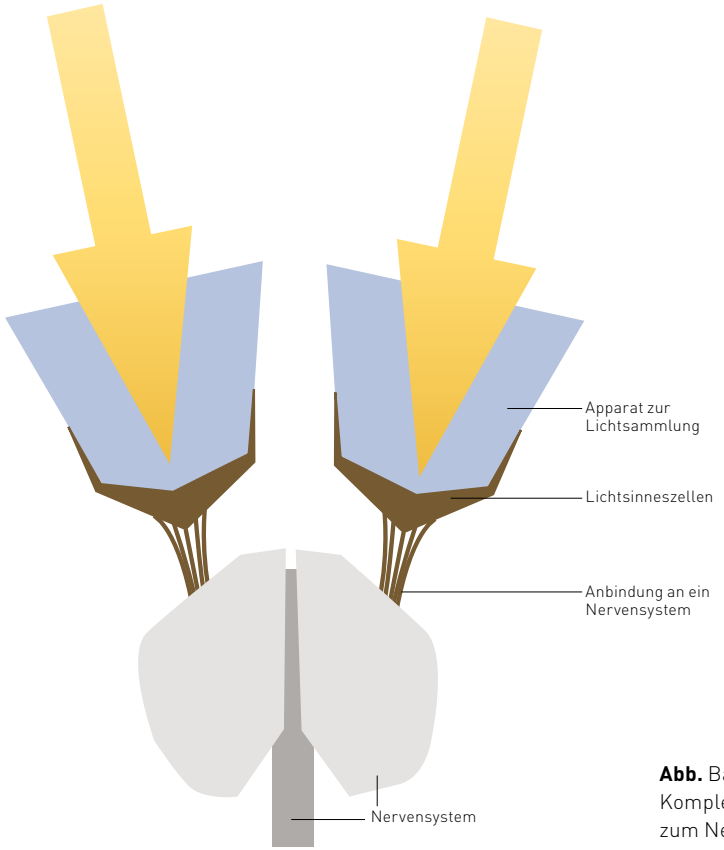
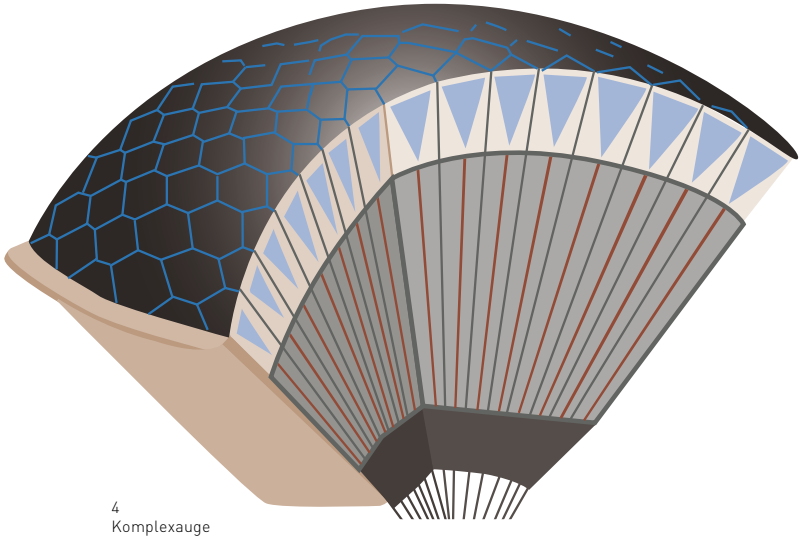


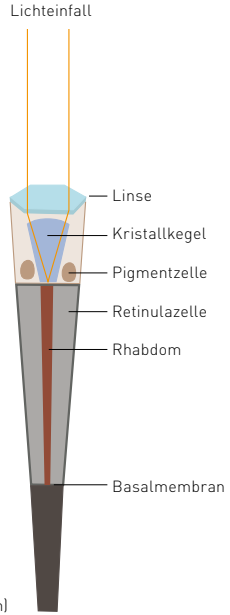
Abb. Bauprinzip des Auges: Lichtsammel-Komplexe, Sinneszellen mit Verbindung zum Nervensystem und Gehirn.

K44 AUGENTYPEN

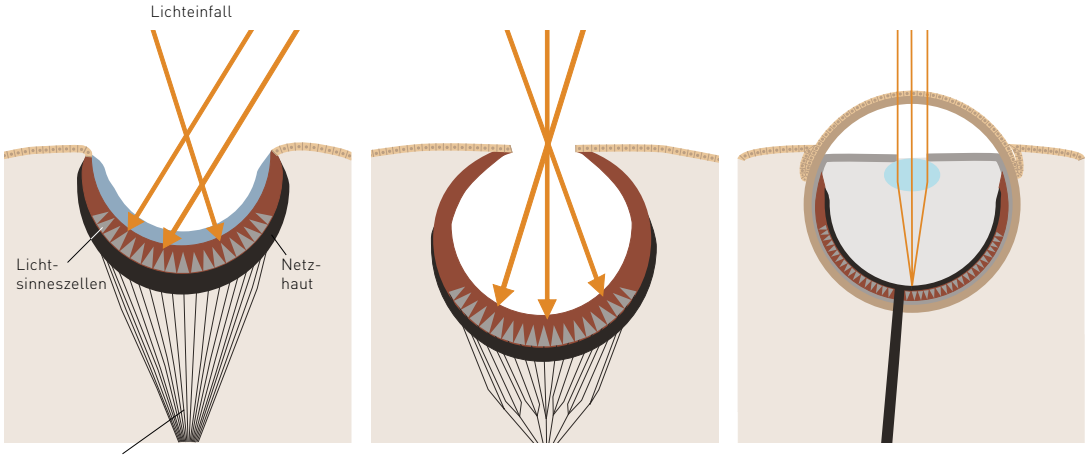
Bei verschiedenen Tiergruppen haben sich aus einfachen, lichtempfindlichen Sinneszellen komplizierte und leistungsfähige Augen entwickelt. Beim Leben in unterschiedlichen Lichtverhältnissen setzen Lichtempfindlichkeit und Auflösungsvermögen den Maßstab für die Qualität des Augentyps[1].
Der Größe und dem Bau der Augentypen sind Grenzen gesetzt. Dennoch sind große Augen aus physikalischen und physiologischen Gründen günstig[2]. So können die Komplexaugen der Libellen aus bis zu 30 000 Einzelaugen bestehen[3]. An die Lebensweise in lichtarmen Gewässern angepasst, lässt die Optik des Hummer-Auges über 256 mal mehr Licht einfangen als das menschliche Auge am Tage.



4
Komplexauge



5
Einzelauge
(Ommatidium)



1 2 3

Abb. 1 Das Grubenauge sammelt unspezifisch Licht. Nur die grobe Lichtrichtung wird erkannt.
Abb. 2 Das Lochauge ist nach außen geöffnet, was im Wasser nicht stört. Licht wird stärker gebündelt und erzeugt ein qualitativ feineres Bild.
Abb. 3 Das Linsenauge bündelt den Lichtstrahl und erzeugt ein scharfes Bild auf der Netzhaut.

Abb. 4 Das Komplexauge der Insekten ist aus vielen Einzelaugen zusammengesetzt. Die Art ihrer Zusammenarbeit entscheidet über die Qualität und Auflösung des Bildes.
Abb. 5 Das Ommatidium ist ein einzelnes Auge im Verband eines Komplexauges. Durch seinen besonderen Bau kann sogar die Polarisierung des Lichts wahrgenommen werden.

Die folgende Tabelle gibt Aufschluss über die unterschiedlichen Augentypen und ihre Sinnesleistungen:

Augentyp	**Sinnesleistung (Wahrnehmung)**	**Beispiel**
Lichtsinneszellen in der Haut	hell/dunkel	Regenwurm
Grubenauge	hell/dunkel; Richtungssehen	Napfschnecke, Meduse
Blasenauge	scharfes, lichtschwaches Bild (Lochkamera-Prinzip)	Nautilus
Linsenauge	scharfes, lichtstarkes Bild (Kamera-Prinzip)	Weinberg-schnecke, Wirbeltiere, Mensch
Komplexauge	UV-Sehen, Polarisations-Sehen, Bildentstehung aus dem Mosaik aller Einzelaugen	Insekten, Krebse

1 Vgl. Rüdiger Wehner, Walter Gehring: *Zoologie*. Stuttgart, New York 1990, S. 406–417.
2 Vgl. M. F. Land, D. E. Nielsson: *Animal Eyes*. Oxford 2002, S. 51.
3 Vgl. ebd., S. 125.

K45 MENSCHLICHES AUGE

Zur Erzeugung einer scharfen Abbildung auf der Netzhaut sind alle Teile des menschlichen Linsenauges aufeinander abgestimmt. Lichtstrahlen werden beim Eintritt ins Auge zunächst an der transparenten Hornhaut gebrochen. Sie ist stark gewölbt. Diese Form erlaubt nur eine Sehachse und einen Punkt schärfsten Sehens auf der Netzhaut. Dort, im Brennpunkt der Linse, befindet sich die Sehgrube. Die Sehgrube als sehr dünne Netzhautstelle lässt Licht noch intensiver auf die Lichtsinneszellen für das Tagessehen, die Zapfen, fallen. An dieser Stelle treten Zapfen auch am dichtesten auf. Das Auge erneuert ständig das gesehene Bild durch schnelle Augenbewegungen.
Es ist gut gegen Streulicht geschützt. Auf Abbildungsfehler der Linse[1] begegnet das Auge mit spezifischen Anpassungen. So gibt es ein Zapfen-Mosaik, das genau auf die unterschiedliche Brechung von kurz- und langwelligem Licht abgestimmt ist und die chromatische Aberration korrigiert.
Wenn sich die menschliche Pupille im Sonnenlicht auf 2 mm Durchmesser verengt und im Dunkeln auf 8 mm öffnet, erzielt sie eine Verzehnfachung des Lichteinfalls. Das erscheint vergleichsweise wenig, da das Auge in der Lage ist, einen 10^{10}-fachen Wechsel der Lichtmenge zu verarbeiten, das ist vergleichbar mit einem Millimeter im Verhältnis zu zehntausend Kilometern. Der Pupillenreflex sorgt für eine genaue Abstimmung der Lichtmenge im Auge und der Lichtempfindlichkeit der Netzhaut.[2] Dies garantiert eine optimale Auflösung bei jeglicher Lichtmenge. In hellem Licht z.B. ist ein Pupillen-Durchschnitt von 2–3 mm in dem Sinn optimal, dass er für die beste Auflösung sorgt, welche die Optik des Auges unterstützt[3].

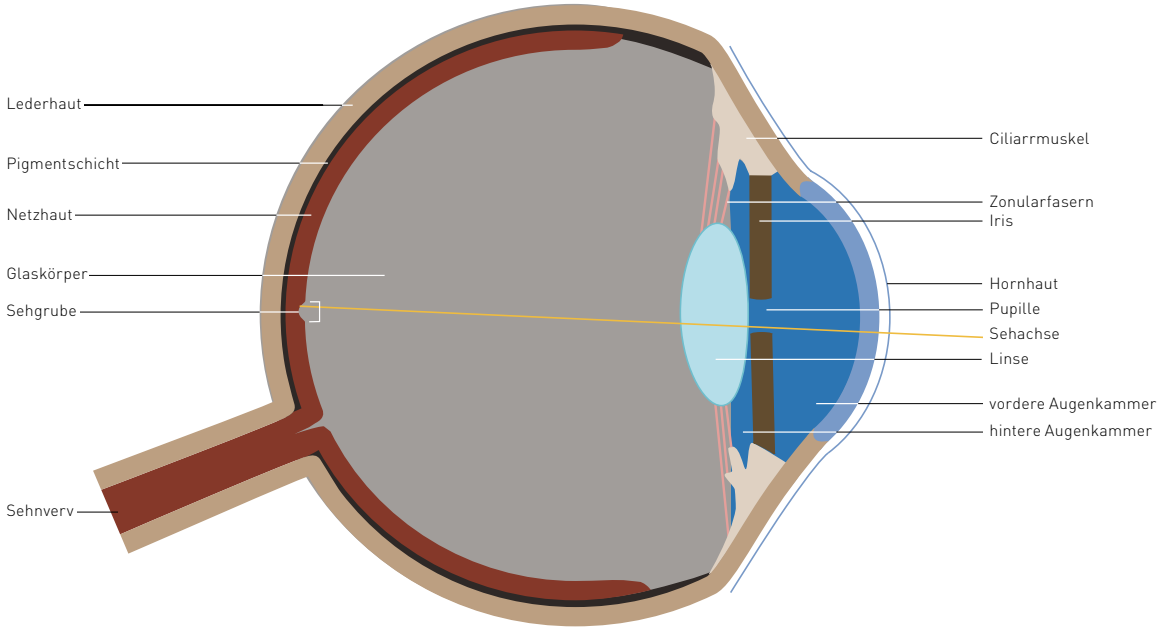


Abb. Schematisch dargestellt ist der Aufbau des menschlichen Auges. Die Sehachse ist zur optischen Achse leicht geneigt und trifft ins Zentrum der Sehgrube. Die Pigmentschicht oder Choroidea schluckt Licht und versorgt die Netzhaut mit Nährstoffen. Die Lederhaut umschließt und schützt das Auge.

Die Linse erzeugt ein auf dem Kopf stehendes Netzhautbild, das an Schärfe nur von einigen Greifvögeln übertroffen wird[4]. Die Netzhaut ist dabei ein hochkomplexes Nervengewebe und ist ein nach außen gelagerter Teil des Gehirns.
Hornhaut, Linse und der den Augapfel ausfüllende Glaskörper wirken als Filter auf ultraviolettes, sehr kurzwelliges Licht. D.h.: nähme man diesen Filter weg, könnte der Mensch sehr wohl – wie die Bienen – ultraviolettes Licht sehen[5].
Das Sehen mit zwei Augen ermöglicht eine räumliche Wahrnehmung. Dies erfordert aber eine Spezialisierung der Verarbeitung der visuellen Information.

1 Vgl. Jost J. Marchesi: *Handbuch der Fotografie*, Band 1. Schaffhausen 1993, S. 224 – 230.
Vgl. David S. Falk, Dieter R. Brill, David G. Stork: *Ein Blick ins Licht. Einblicke in die Natur des Lichts und des Sehens, in Farbe und Fotografie*. Basel, Boston, Berlin 1990, S. 155.
2 Vgl. M. F. Land, D. E. Nielsson: *Animal Eyes*. Oxford 2002, S. 88.
3 Vgl. ebd., S. 72 – 81.
4 Vgl. Margaret S. Livingstone: *Vision and Art. The Biology of Seeing*. 2002, S. 70.
5 Vgl. David S. Falk, Dieter R. Brill, David G. Stork: *Ein Blick ins Licht. Einblicke in die Natur des Lichts und des Sehens, in Farbe und Fotografie*. Basel, Boston, Berlin 1990, S. 156.

K46 ABSORPTIONSSPEKTRUM

Im Umgang mit farbigen biologischen Substanzen begegnet man immer wieder Diagrammen, in denen die »Absorption« als Funktionskurve über der Lichtwellenlänge aufgetragen ist. Diese Darstellung stammt aus der Spektral-Photometrie, eine genaue Methode, um flüssige gefärbte Lösungen zu untersuchen.
Nach der prismatischen Zerlegung von weißem Licht in die einzelnen Spektralfarben wird eine Probe Wellenlänge für Wellenlänge bestrahlt.[1] Absorption bezeichnet das Verhältnis des von der Probe verschluckten Lichts zur Intensität des eingestrahlten Lichts. Werden diese Werte über der jeweiligen Wellenlänge aufgetragen, erhält man das Absorptionsspektrum. Wird das aus der Probe wieder austretende Licht gemessen, spricht man vom Transmissionsspektrum.

1 Vgl. Werner Schmid: *Biophysik des Farbensehens*. Konstanz 1999, S. 37.

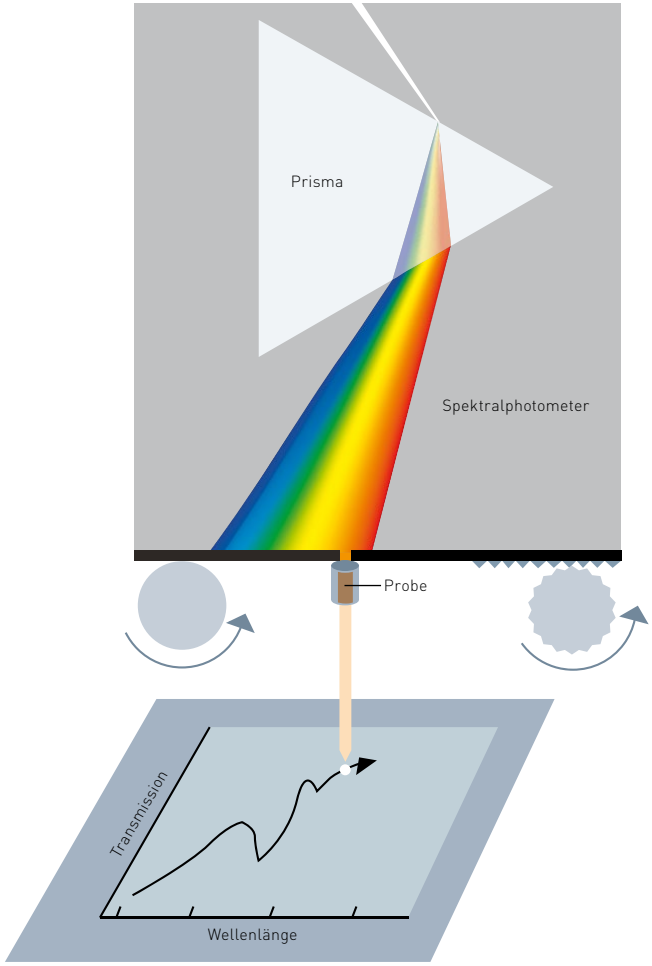


Abb. Schematische Darstellung der Funktionsweise eines Spektralphotometers.

K47 LICHTSINNESZELLE

Das Kernstück jeder Netzhaut ist ein Verband von so genannten Lichtsinneszellen oder Photorezeptoren. Die Lichtsinneszellen übertragen den physikalischen Lichtreiz der auf sie auftreffenden Lichtteilchen in elektrische Impulse, d.h. in die Sprache des zentralen Nervensystems. Dieser Funktion entsprechend gibt es in den Lichtsinneszellen immer einen Licht sammelnden Teil mit großer Oberfläche und Pigmenten, einen zweiten Teil, der ein elektrisches Signal generiert und einen dritten Teil, der es über eine Kontaktstelle an ein Nervensystem weitergeleitet. Eine Lichtsinneszelle bzw. eine Gruppe gleichartiger Sinneszellen vermittelt, entsprechend der Intensität des einfallenden Lichts, einen Hell-Dunkel-Eindruck.
Jede Lichtsinneszelle hat ihr eigenes Absorptionsspektrum. Charakteristisch ist eine maximale Absorption bei einer bestimmten Lichtwellenlänge. Wenn mindestens zwei Lichtsinneszelltypen mit unterschiedlichen Absorptionsmaxima vorhanden sind, ist Farbensehen möglich. Je mehr unterschiedliche Typen von Photorezeptoren in der Netzhaut eines Auges vorhanden sind, desto differenzierter wird der farbliche Eindruck, der wahrgenommen werden kann.
Hühner beispielsweise haben fünf verschiedene Sinneszelltypen, die Mantis-Krabbe bis zu zwölf, der Mensch vier, Delphine und Hunde nur zwei.[1]

1 Vgl. Almut Kelber, Misha Vorobyev, Daniel Osorario, *»Animal colour vision – behavioral tests and physiological concepts«*, in: *Biological Reviews*, 78, 2003, S. 81 – 118, hier: S. 84.

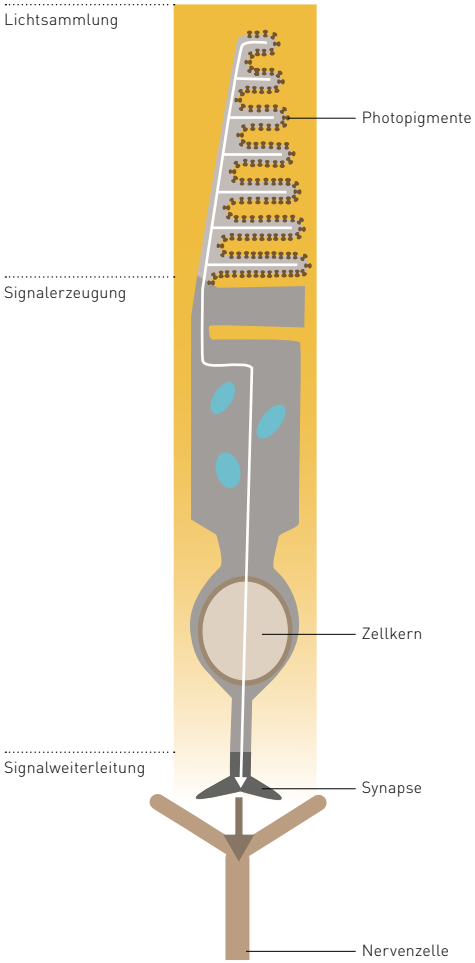


Abb. Schematische Darstellung einer Lichtsinneszelle mit ihren drei verschiedenen Licht-Verarbeitungszonen. Die genaue Form dieser drei Bereiche ist auf die spezifische Arbeitsweise des Auges, d. h. den Augentyp abgestimmt.

K48 MENSCHLICHE LICHTSINNESZELLEN

Die Netzhaut liegt am Grund der Augenhöhle und ist in die lichtdichte Pigmentschicht unter der Lederhaut eingebettet. Auf der Oberseite der Netzhaut gibt es viele Schichten von Nervenzellen. Die Lichtsinneszellen liegen dagegen auf der dem Licht abgewandten Unterseite und sind vor Licht geschützt. Im gesunden Auge haben alle Lichtsinneszellen eine direkte Verbindung über den Sehnerv zum Gehirn, das ihre Signale verarbeitet.

In Anpassung an eine tag- und nachtaktive Lebensweise gibt es im menschlichen Auge zwei Arten lichtempfindlicher Zellen: Stäbchen für das Sehen in der Nacht und Zapfen für das Tagessehen. Der enorme Wechsel von sehr großen Lichtmengen am Tag und wenigen Lichteinheiten in der Nacht reicht über 1010 Potenzen – das ist vergleichbar mit einem Millimeter im Verhältnis zu zehntausend Kilometern.[1] Der spezialisierte Bau des Licht sammelnden Teils der Zellen ermöglicht diese enorme Leistung.

Bei Nacht steht dem Menschen nur ein Typ Stäbchen zur Verfügung, wodurch nur ein farbloser Hell-Dunkel-Eindruck entstehen kann. Helles Tageslicht blockiert die Stäbchen, weil ein Überangebot an Licht hemmend wirkt. Jetzt beginnen die Licht unempfindlicheren Zapfen mit ihrer Arbeit. Da es drei verschiedene Zapfentypen für rotes, grünes und blaues Licht gibt, ist das menschliche Tagessehen farbig. Stäbchen und Zapfen sind reich mit Licht sammelnden Pigmenten bestückt. Sie absorbieren Licht besonders optimal in ganz bestimmten Wellenlängen-Bereichen: Stäbchen-Pigmente bei 498 Nanometer im blaugrünen, Zapfen-Pigmente bei 437 Nanometer im blauen d. h. kurzwelligen Spektralbereich, bei 533 im grünen mittelwelligen Bereich und im gelbgrünen bei 564 nm.[2] Es ist erstaunlich, dass der Zapfen, der rotes, langwelliges Licht verarbeitet, seine maximale Absorption im gelbgrünen Bereich hat. Er hat große Ähnlichkeit mit dem Grün-Zapfen.

Je nach Qualität des einfallenden Lichts arbeiten immer ganz bestimmte Sets von Lichtsinneszellen. In der Dämmerung, wenn noch Farben erkennbar sind und auch die Stäbchen anfangen zu arbeiten, sind alle Typen von Lichtsinneszellen gleichzeitig aktiv.

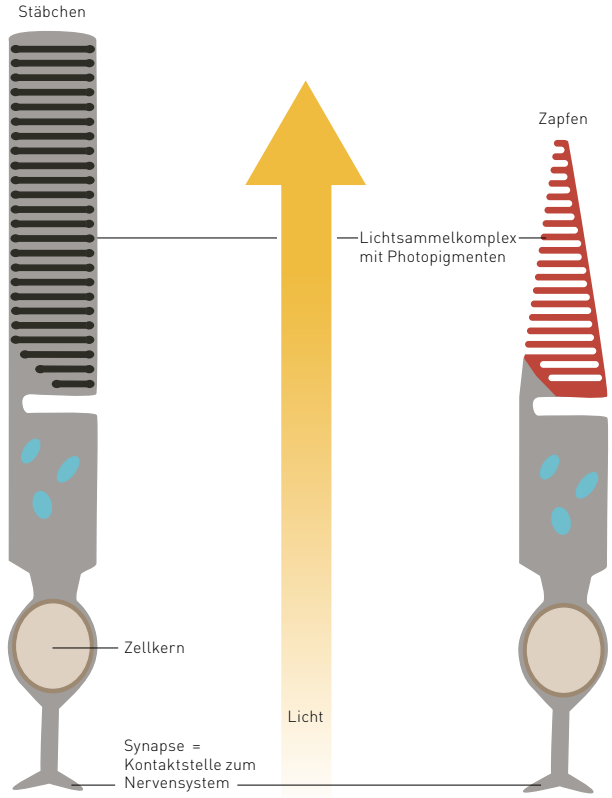


Abb. Das Bild von Stäbchen und Zapfen steht nicht auf dem Kopf. Die Lichtsinneszellen im menschlichen Auge erhalten von hinten her Licht. Stäbchen vergrößern ihre Oberfläche durch das Einlagern von dicht mit Pigment besetzten Scheiben. Das lässt sie sogar einzelne Lichtteilchen einfangen und registrieren. Ein Lichtsignal wird elektrisch codiert und am Übergang zum Nervensystem in ein chemisches Signal übertragen. Das Nervensystem wandelt es wieder in elektrische Impulse um.

1 Vgl. M. F. Land, D. E. Nielsson: *Animal Eyes*. Oxford 2002, S. 19 – 20.
2 Vgl. A. Kelber, M. Vorobyev, D. Osorio: »*Animal colour vision – behavioral tests and physiological concepts*«, in: *Biological Reviews*, 78, 2003, S. 81 – 118.

K49 STÄBCHEN

Die Basis des menschlichen Nachtsehens beruht auf der Aktivität der Stäbchen. Sie kommen auf der ganzen Netzhaut mit Ausnahme der Sehgrube vor.[1]
Stäbchen besitzen ein Außen- und ein Innensegment. Das Außensegment ist für die Lichtsammlung, das Innensegment für die Erzeugung und Weiterleitung eines Nervensignals verantwortlich.[2]
Das Außensegment der Stäbchen-Zellen ist außerordentlich gut an kleine Lichtmengen angepasst. Mit vielen übereinander gestapelten Scheiben, die dicht mit dem Sehfarbstoff Rhodopsin besetzt sind, wird die Licht sammelnde Oberfläche enorm vergrößert. Einzelne Lichtteilchen können dank dieses Bau-Prinzips ein Lichtsignal in der Zelle hervorrufen.
Stäbchen sind aber nur in der Lage, ein Hell-Dunkel-Signal zu übertragen. Nachtsehen ist daher farblos. Die Unmöglichkeit nachts im Dunkeln scharf zu sehen ergibt sich einerseits aus der Tatsache, dass die Sehgrube nachts gar nicht gebraucht wird, und andererseits die Stäbchen-Aktivitäten von vielen Zellen immer gebündelt verarbeitet werden.
Das Stäbchenseh-Pigment ist besonders effektiv im blaugrünen Spektralbereich (498 Nanometer).[3] Blaugrüne Oberflächen wirken im Dunkeln heller, rote Oberflächen dagegen viel dunkler oder schwarz. Rot erzeugt kein Lichtsignal in den Stäbchen, da keine Absorption stattfindet. Der Eindruck von Schwarz ist die Folge (Purkinje Phänomen).

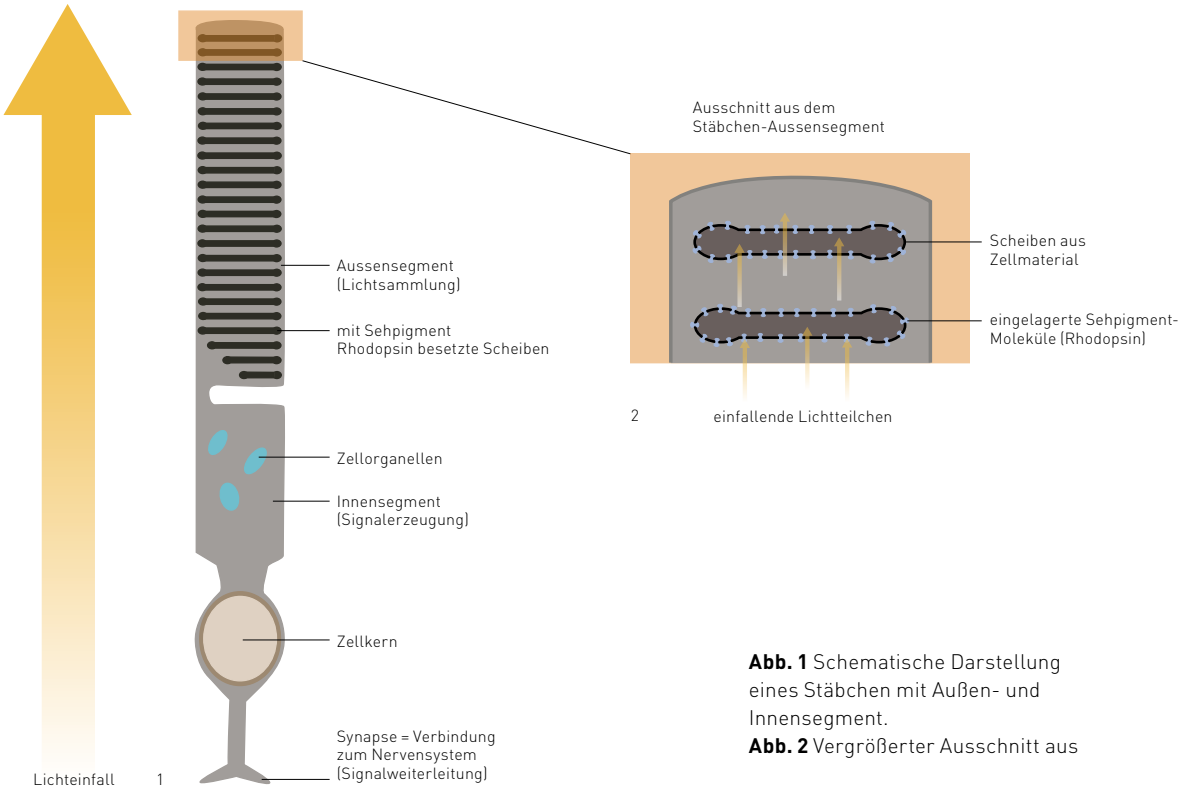


Abb. 1 Schematische Darstellung eines Stäbchen mit Außen- und Innensegment.
Abb. 2 Vergrößerter Ausschnitt aus dem Außensegment eines Stäbchens.

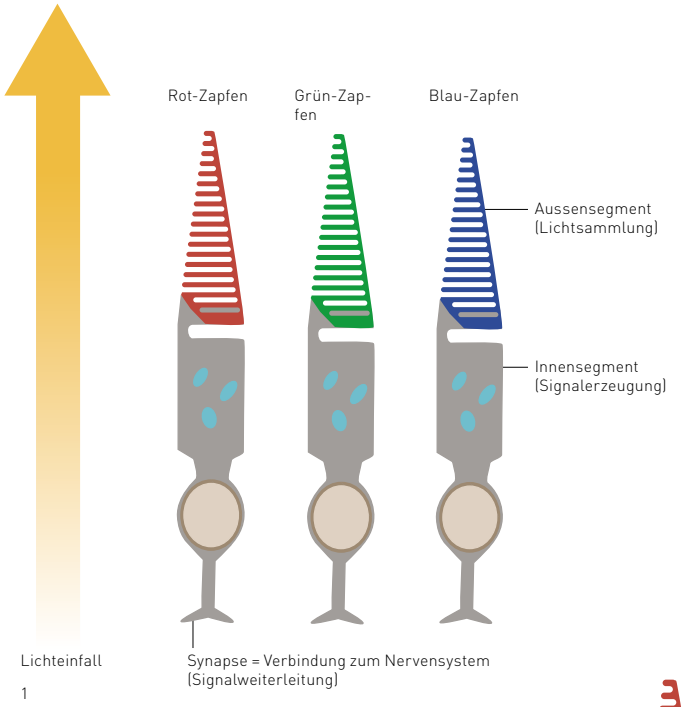
1 Vgl. N. Welsch, C. Liebmann: *Farbe*. Heidelberg 2003, S. 240.
2 Vgl. Erik R. Kandel, James H. Schwartz, Thomas M. Jessell: *Principles of Neural Science*. East NorwalK1991, S. 402 – 403.
Vgl. John G. Nicholls, A. Robert Martin, Bruce G. Wallace: *Vom Neuron zum Gehirn. Zum Verständnis der zellulären und molekularen Funktion des Nervensyste*ms. Stuttgart, Jena, New York 1995, S. 376 – 378.
3 Vgl. Frederike Woog, »*Farben der Natur. Sehen und gesehen werden*«, in: *Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde*, 56, 2004, S. 38.

K50 ZAPFEN

Zapfen sind als Lichtsinneszellen zentraler Bestandteil der Netzhaut und ermöglichen das farbige Tagessehen. Am Auftreffpunkt der Sehachse befindet sich die Sehgrube, die mit lichtempfindlichen Zapfen besetzt ist. Die Verarbeitung der dort eingehenden Lichtsignale ermöglicht die höchste Auflösung, da jeder einzelne Zapfen eine Direktverbindung ins Gehirn hat.[1] Die Sehgrube allein erlaubt scharfes Sehen.

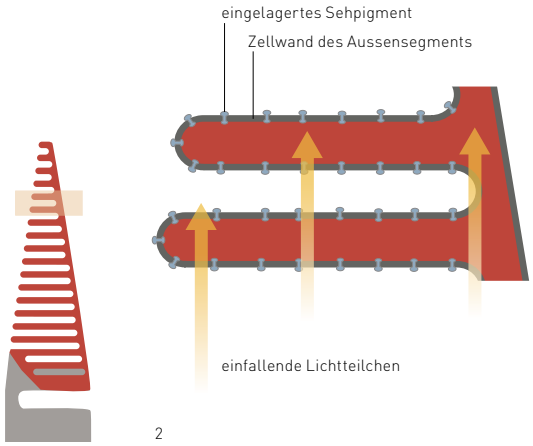
Zapfen besitzen wie Stäbchen ein Außensegment, das der Lichtsammlung dient, und ein Innensegment, das elektrische Signale bildet und weiterleitet. Licht wird von Pigmenten oder Sehfarbstoffen eingefangen, die in der Zellwand des Außensegments eingelagert sind. Es wurden drei unterschiedliche Sehpigmente in Zapfen gefunden, die im blauen Spektralbereich bei 437 Nanometer, im grünen bei 533 Nanometer und im gelbgrünen bei 564 Nanometer absorbieren.[2] Analog zu den drei Primärfarben der additiven Farbmischung spricht man von Rot-, Grün- und Blau-Zapfen. Der Rot-Zapfen hat demnach ein Sehpigment, welches im Gelbgrünen optimal Licht absorbiert. Da er aber der einzige ist, der den Rot-Bereich des Spektrums abdeckt, wird er »Rot«-Zapfen genannt. Fällt Tageslicht ins Auge, gibt es immer drei Erregungswerte, weil alle drei Zapfen-Typen gleichzeitig antworten. Dies ermöglicht über den Hell-Dunkel-Wert hinaus die Verarbeitung einer Farbinformation.

Zapfen brauchen Tageslicht, d.h. große Lichtmengen. Sie besitzen eine viel höhere Erregungsschwelle als Stäbchen, d.h. sie beginnen überhaupt erst bei großen Lichtintensitäten zu arbeiten. Der Bau des Licht sammelnden Außensegments ist, angepasst an große Lichtintensitäten, daher eher einfach.



1

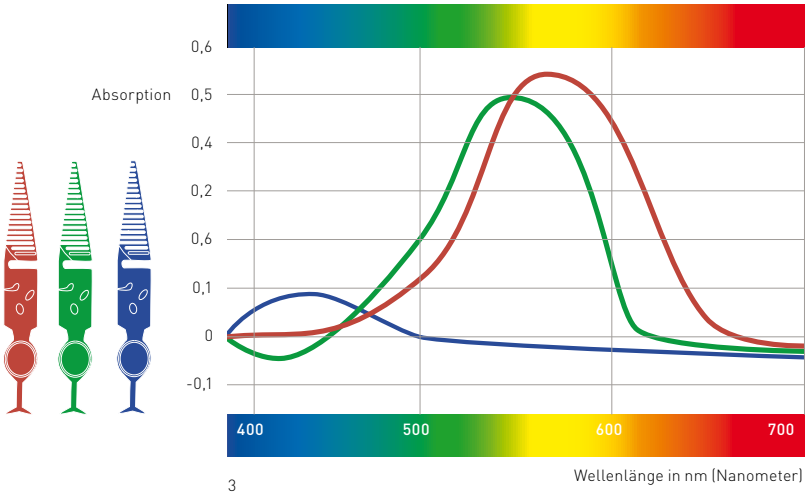
Abb. 1 Drei schematische Darstellungen der Zapfen mit der Lichteinfallsrichtung.
Abb. 2 Ein Ausschnitt aus dem Außensegment des Rot-Zapfens zeigt die Besetzung mit Sehpigmenten. Sie absorbieren im gelbgrünen und roten Bereich des Spektrums.



2

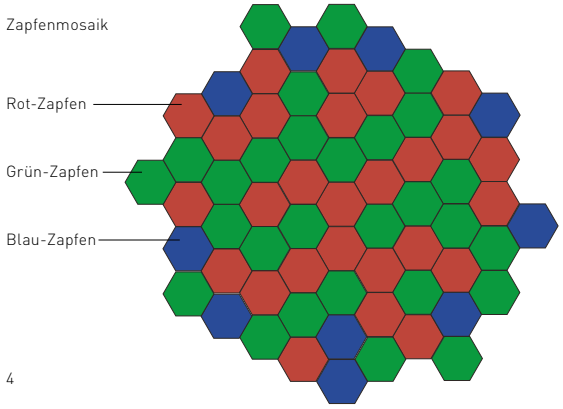
In der Mitte der Sehgrube befinden sich nur Rot- und Grün-Zapfen. Blaue Zapfen treten am Rand der Sehgrube etwas gestreut auf. Rot kann das Auge viel leichter erregen als Blau. Um die gleiche Erregung des Auges zu erhalten, muss das blaue Farbsignal viel intensiver sein. Zapfen sind wie ein Mosaik in der Sehgrube verteilt, entsprechend der unterschiedlichen Brechung von rotem, grünen und blauem Licht durch die Linse.

1 Vgl. John G. Nicholls, A. Robert Martin, Bruce G. Wallace: *Vom Neuron zum Gehirn. Zum Verständnis der zellulären und molekularen Funktion des Nervensystems*. Stuttgart, Jena, New York 1995, S. 401.
2 Vgl. A. Kelber, M. Vorobyev, D. Osorio*: »Animal colour vision – behavioral tests and physiological concepts«*, in: *Biological Reviews*, 78, 2003, S. 85.



3

Abb. 3 Absorptionsspektren roter, grüner und blauer Zapfen. Energiereiches blaues Licht wird weniger stark absorbiert als energieärmeres gelbes Licht.
Abb. 4 Das Zapfenmosaik in der Sehgrube zeigt blaue Zapfen seltener und nur einzeln am Rand. Blaues, grünes und rotes Licht wird scharf gesehen und somit ein klares farbiges Bild gewonnen.



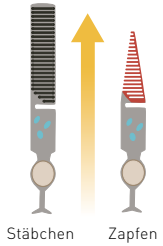
4

K51 STÄBCHEN – ZAPFEN IM VERGLEICH

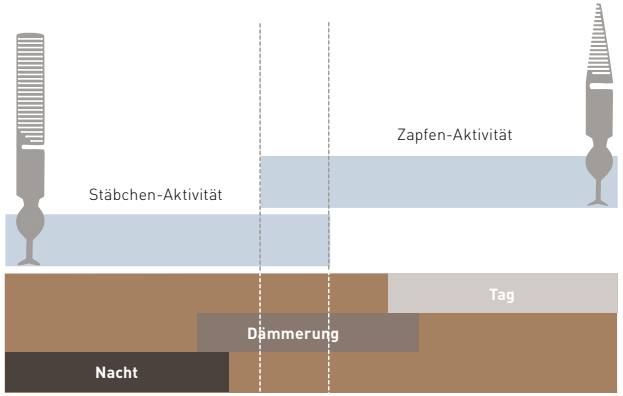
Unterschiede zwischen Stäbchen und Zapfen sowie ihrer Systeme[1]:

Stäbchen	**Zapfen**
auf das Nachtsehen spezialisiert:	auf das Tagessehen spezialisiert:
hohe *Lichtempfindlichkeit*	geringe Lichtempfindlichkeit
mehr *Photopigmente*	weniger Photopigmente
hohe Signalverstärkung	geringere Signalverstärkung
Erkennung einzelner *Photonen*	Spezialisierung auf große Lichtmengen
Lichtsättigung bei Tageslicht	Lichtsättigung nur bei sehr starkem Licht
geringere zeitliche Auflösung	hohe zeitliche Auflösung
langsame Antwort auf Licht	schnelle Antwort auf Licht
lange Verrechnungszeiten	kurze Verrechnungszeiten
empfindlicher für gestreutes Licht	am lichtempfindlichsten für den Lichteinfall entlang der optischen Achse

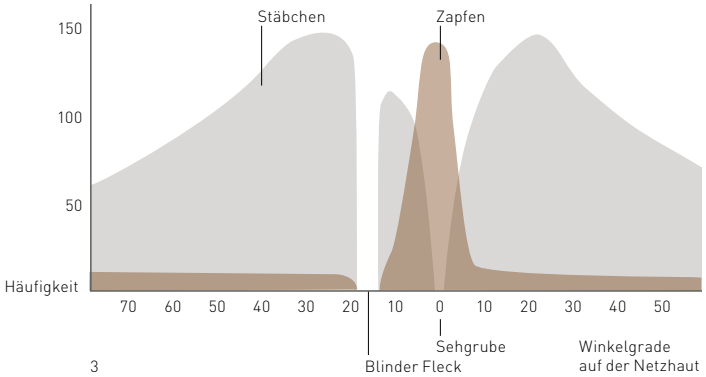
Stäbchensystem	**Zapfensystem**
unscharf: Zusammenschaltung vieler Zellen	hohe Auflösung und Sehschärfe: kaum Zusammenschaltung der Signalübertragung
nicht in der Sehgrube vorkommend	konzentriert in der Sehgrube vorkommend
keine Farbwahrnehmung, da nur ein Typ Stäbchen vorhanden ist	ermöglicht Farbwahrnehmung, da Verrechnung dreier Zapfen-Typen stattfindet



1



2



3

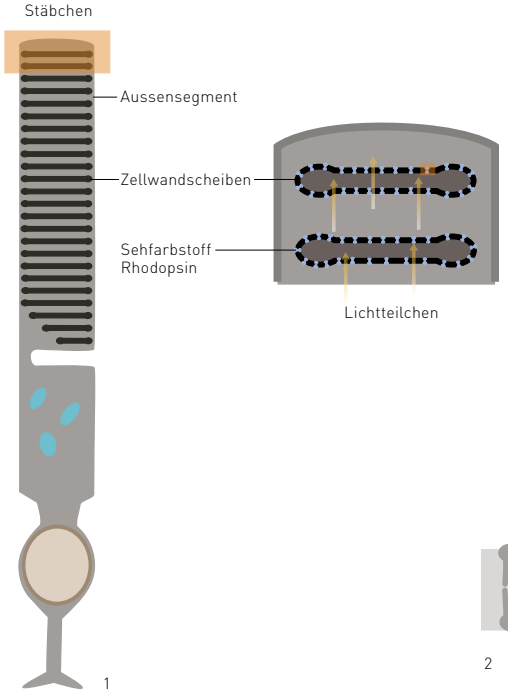
Abb. 1 Schematische Darstellungen: links des Zapfens, rechts des Stäbchens. Der Lichteinfall kommt von hinten.
Abb. 2 Die Aktivitätsbereiche von Stäbchen und Zapfen überlagern sich in der Dämmerung.
Abb. 3 Die Kugel der Netzhaut wird in Winkelgrad eingeteilt. Beim Nullgrad-Punkt liegt die Sehgrube, zwischen 10 und 20 Grad befindet sich der blinde Fleck. Dort verlässt der Sehnerv das Auge.
Darstellung der Häufigkeitsverteilung von Zapfen (dunkel) und Stäbchen (hell). Innerhalb der Sehgrube ist der Zapfenanteil maximal, außerhalb hingegen der Stäbchenanteil.

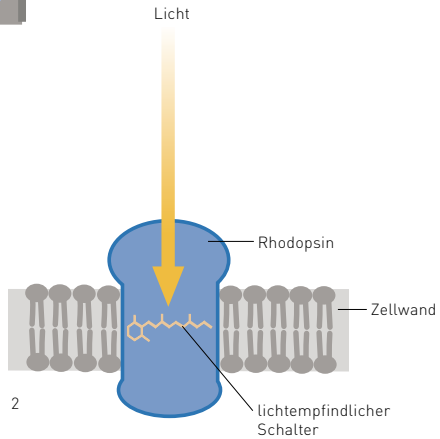
1 Vgl. Erik R. Kandel, James H. Schwartz, Thomas M. Jessell: *Princip-les of Neural Science*. East NorwalK 1991, S. 402.

K52 LICHTREAKTION

Rhodopsin, der Sehfarbstoff der menschlichen Lichtsinneszellen, ist ein großes Eiweiß-Molekül, das einen lichtempfindlichen Schalter trägt. Das Eiweiß besteht aus einer langen gefalteten Kette aus Aminosäuren. Die Art der Faltung entscheidet darüber, welche Lichtwellenlängen in welchem Maß absorbiert werden. Die Eiweiße des roten und grünen Zapfens unterscheiden sich nur durch drei einzelne Aminosäuren.[1] Der Schalter, der durch Lichteinwirkung umgelegt wird, ist in allen Sehpigmenten des Menschen gleich. Wird er von Licht getroffen, verändert er seine Form. Das ist der einzige direkt lichtabhängige Schritt des Sehens. Nur hier stößt die physikalische Lichteinwirkung eine biochemische Reaktionskette an. Ist die Kette einmal angestoßen, kommt es nach dem Schneeball-Prinzip zu einer lawinenartigen Verstärkung. Der umgelegte Schalter eines einzigen Eiweißes erregt 3000 weitere Enzyme, die wiederum jeweils 2000 andere aktivieren, was einer Verstärkung von 6 Millionen entspricht. Das macht die Lichtempfindlichkeit einer Lichtsinneszelle aus.[2]
Nach der Lichtreaktion fällt das Molekül des umgelegten Schalters vom Eiweiß ab und wird in der Pigmentschicht regeneriert, d.h. wieder in das Eiweiß des Sehfarbstoffs eingebaut. Erst nach diesem Regenerationsprozess kann die Lichtsinneszelle wieder Licht absorbieren. Dies ist der Grund für die träge Anpassungsfähigkeit des Auges an plötzlich veränderte Lichtverhältnisse sowie für das Entstehen komplementärer Nachbilder.

1 Vgl. Josef Dudel, Randolf Menzel, Robert F. Schmidt: *Neurowissenschaft. Vom Molekül zur Kognition.* Berlin, Heidelberg, New York 2001, S. 399.
2 Vgl. ebd., Abbildungslegende von Abb. 17-b, S. 393.





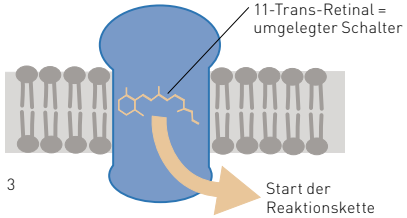


Abb. 1 In der Übersicht ist der Ort der Lichtreaktion veranschaulicht.
Abb. 2 Schematische Darstellung der Zellwand eines Außensegments einer Lichtsinneszelle. Darin eingelagert ist das Eiweiß-Molekül Rhodopsin, der Sehfarbstoff. In seinem Inneren befindet sich der lichtempfindliche Schalter (11-cis-Retinal).
Abb. 3 Nachdem Licht absorbiert wurde, befindet sich der Schalter in seiner physiologisch aktiven Form (11-trans-Retinal). Jetzt werden alle weiteren Reaktionen angestoßen, die zum visuellen Eindruck führen.

K53 LICHTSIGNAL

In der Lichtsinneszelle wird ein physiologischer Schalter als Reaktion auf einfallendes Licht umgelegt. Dadurch kommt es zum völligen Schließen ansonsten geöffneter Natrium-Ionenkanäle im Außensegment der Lichtsinneszelle. Der Dunkelstrom, ein bestehender elektrischer Strom über der Zelle, wird unterbrochen.[1] Diese Aktivitätsänderung pflanzt sich bis an die Kontaktstelle zum Nervensystem (Synapse) fort, wo sich dies chemisch bemerkbar macht. Die nachfolgende Nervenzelle erkennt die Änderung des Zustands der Sinneszelle und leitet diese Information auf elektrischem Weg weiter. Das Signal wird bis ins Gehirn übertragen. Selbst ein einziges Lichtteilchen wird auf diesem Weg registriert.[2]

1 Vgl. Robert F. Schmidt, Gerhard Thews: *Physiologie des Menschen*. Berlin, Heidelberg, New York 1995, S. 289.
Vgl. N. Welsch, C. Liebmann: *Farbe*. Heidelberg 2003, S. 243 – 249.
Vgl. Erik R. Kandel, James H. Schwartz, Thomas M. Jessell: *Principles of Neural Science*. East NorwalK1991, S. 407.
Vgl. John G. Nicholls, A. Robert Martin, Bruce G. Wallace: *Vom Neuron zum Gehirn. Zum Verständnis der zellulären und molekularen Funktion des Nervensystems*. Stuttgart, Jena, New York 1995, S. 379 – 381.
Vgl. Josef Dudel, Randolf Menzel, Robert F. Schmidt: *Neurowissenschaft. Vom Molekül zur Kognition*. Berlin, Heidelberg, New York 2001, S. 391.
2 Vgl. Nicholls, Martin, Wallace, *Vom Neuron zum Gehirn, a.a.O.*, S. 382.

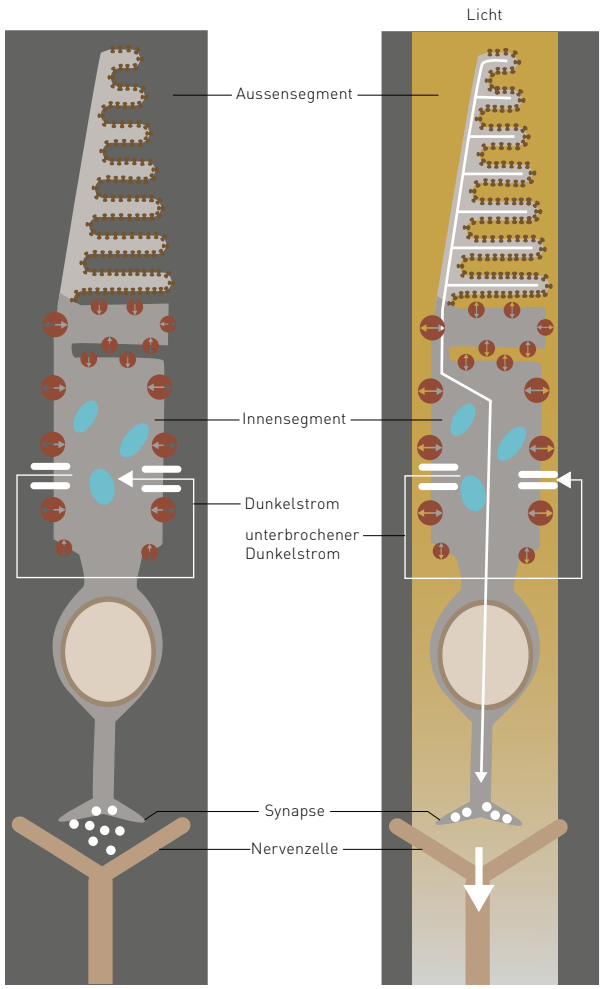


Abb. Der über der Lichtsinneszelle fließende Dunkelstrom wird bei Lichteinfall unterbrochen. Dieses Signal wird an die nachfolgende Nervenzelle und das Nervensystem übertragen.

K54 PURKINJE-PHÄNOMEN

Betrachtet man bei Tageslicht eine blaue Schale, die mit roten Kirschen gefüllt ist, leuchten die Früchte herrlich rot, die Schale dagegen wirkt dunkel. In der Dämmerung erscheint ein anderes Bild: schwarze Kirschen schimmern dunkel in einer hell leuchtenden Schale. Diese Situation beschreibt das Purkinje-Phänomen, benannt nach dem österreichischen Physiologen Johannes Evangelista Purkinje (1787-1869).[1]

Bei diesem Phänomen ist der Wechsel von der Aktivität der Zapfen zu den Stäbchen wirksam. Das Tagessehen stützt sich auf die Zapfen, die zum Arbeiten sehr viel Licht brauchen. Das Nachtsehsystem hingegen beruht auf der Aktivität der hochgradig lichtempfindlichen Stäbchen. Dieser Zelltyp vermittelt keinen Farbeindruck, sondern allein Grade von Helligkeit.[2] Die Stäbchen sind im blaugrünen Bereich des sichtbaren Lichts am empfindlichsten. Daher erscheinen blaue oder grüne Gegenstände viel heller als rote. Im Rotbereich dagegen wird kein Lichtsignal erzeugt, weil die Stäbchen diese Lichtwellen nicht absorbieren können. Wird Licht nicht absorbiert, erscheint dies in der Wahrnehmung als schwarz.

1 Vgl. Richard Gregory: *Auge und Gehirn. Psychologie des Sehens*. Hamburg 2001, S. 116 – 117.
Vgl. Margaret Livingstone: *Vision and Art. The Biology of Seeing*. New York 2002, S. 40 – 45.

2 Vgl. Ulrich Bachmann (Hg.): *Farben zwischen Licht und Dunkelheit*. Sulgen/Zürich 2006, *Licht sehen*, Gernot Böhme

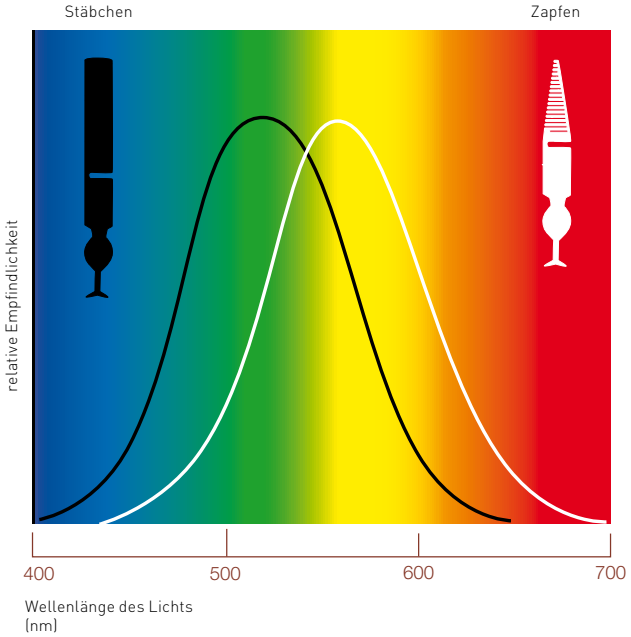


Abb. Darstellung des Wellenspektrums von Licht mit den dazugehörigen Farben. Jedem Farbwert wird die Stärke der Absorption durch die Lichtsinneszellen zugeordnet.
Die weiße Kurve stellt die Empfindlichkeit der Zapfen dar, die schwarze Kurve die der Stäbchen. Die Kurven zeigen die Verschiebung in den blaugrünen Bereich durch das Purkinje-Phänomen.

K55 DREI-FARBEN-THEORIE

Im Nachdenken über die Grundlage des menschlichen Farbensehens ging Thomas Young 1802[1] davon aus, dass es in der Netzhaut des Auges niemals so viele Typen von Sinneszellen wie Farbtöne geben könne. Durch Farbmischungsexperimente, die er nach Newtons Vorlagen durchführte, gelangte er zur Hypothese, dass es in der Netzhaut drei Typen von Lichtsinneszellen geben müsse mit der jeweils maximalen Reaktion auf blaue, grüne und rote Farbreize. 65 Jahre später verfeinerte der Physiker und Physiologe Hermann von Helmholtz Youngs Hypothese. Daher spricht man auch von Young-Helmholtz-Theorie.[2] Helmholtz vertrat die Auffassung, dass Farbe keine Eigenschaft des Lichts ist, sondern eine Leistung des Nervensystems. Eine beliebige Farbe wird durch alle drei Lichtsinneszell-Typen in einer ihr eigenen Weise erfasst. Der Farbton ergibt sich aus dem jeweiligen Anregungsverhältnis. Aber erst 100 Jahre später (1967) konnte der amerikanische Biochemiker Georg Wald die drei Lichtsinneszell-Typen, die Zapfen, nachweisen.[3]

Der Farbfernseh-Bildschirm arbeitet mit drei Typen von Leuchtphosphoren, die mit roten, grünen und blauen Lichtstrahlen durch additive Mischung jede Farbe erzeugen können. Diese drei Ausgangsfarben bilden zusammen den RGB-Farbraum. Analog arbeiten Computer-Bildschirme und Beamer, die das CIE-Farbmodell mathematisch beschreibt.

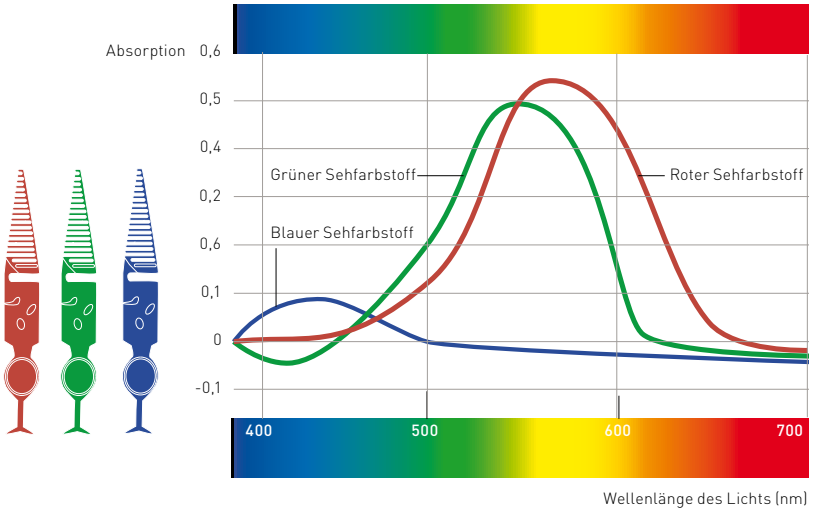


Abb. Georg Wald konnte drei Sehpigmenttypen für die Absorption im Blau-, Grün- und Rot-Bereich des Wellenlängenspektrums nachweisen. Dargestellt sind die Absorptionskurven nach W. D. Wright.

1 Thomas Young: »*On the theory of light and colors*«, in: D.L. Adam (ed.), *Sources of Color Science*. Cambridge 1970, S. 51.
Vgl. auch Werner Schmid: *Biophysik des Farbensehens. Konstanz 1999, S 25.*

2 Vgl. Werner Backhaus: *Color Vision. Perspectives From Different Disciplines*. Berlin, New York 1998. S. 189.

3 Vgl. John G. Nicholls, A. Robert Martin, Bruce G. Wallace: *Vom Neuron zum Gehirn. Zum Verständnis der zellulären und molekularen Funktion des Nervensystems*. Stuttgart, New York 1995, S. 384.

K56 VIER-FARBEN-THEORIE

Der Physiologe und Hirnforscher Ewald Hering kritisierte 1871 an der Drei-Farben-Theorie, dass die reine Farbe Gelb bei den Primärfarben fehle.[1] Er fand weder einen Übergang von der Substanzfarbe Blau zu Gelb, noch von Rot zu Grün, d.h. kein bläuliches Gelb und kein grünliches Rot. Seine Theorie besagt, dass die Gegenfarben Rot-Grün und Blau-Gelb der menschlichen Farbwahrnehmung zugrunde liegen. Sie arbeiten einander entgegengesetzt mit dem Ziel des Ausgleichs. Im Zustand des Ungleichgewichts erzeugen sie Farbwahrnehmungen. Außerdem rechnete Hering den farblosen Gegensatz von Hell/Dunkel und Schwarz/Weiß zu diesen Prozessen.

Heute verbinden sich Drei- und Vier-Farben-Theorie als unterschiedliche Stufen des einen Prozesses der Farbwahrnehmung. Die Input-Situation auf der Zapfen-Ebene basiert auf drei Ausgangsfarben (RGB). Die Output-Situation stellt die Verrechung der Zapfensignale dar und funktioniert gegenfarbig.[2] Die Addition roter und grüner Signale ergibt das Gelbsignal. Es kontrastiert das Blausignal. Das Gegensatzpaar rot und grün entsteht durch die Subtraktion roter und grüner Signale. Die Verarbeitung des Helligkeitswertes wird auch durch die Addition roter und grüner Zapfensignale geleistet.[3]

Die Gegenfarben-Aktivitäten der Netzhaut werden durch die komplementären Nachbilder erfahrbar.

1 Vgl. Werner Schmid: *Biophysik des Farbensehens*. Konstanz 1999, S. 27.
Vgl. Werner Backhaus: *Color Vision. Perspectives From Different Disciplines*. Berlin, New York 1998, S. 23 u. 189 – 190.

2 Vgl. Schmid, *Biophysik des Farbensehens*, a.a.O., S. 28.
Vgl. Margaret Livingstone: *Vision and Art. The Biology of Seeing*. New York 2002, S. 86.

3 Vgl. Schmid, *Biophysik des Farbensehens*, a.a.O., S. 29.
N. Welsch, C. Liebmann: *Farbe*. Heidelberg 2003, S. 252.

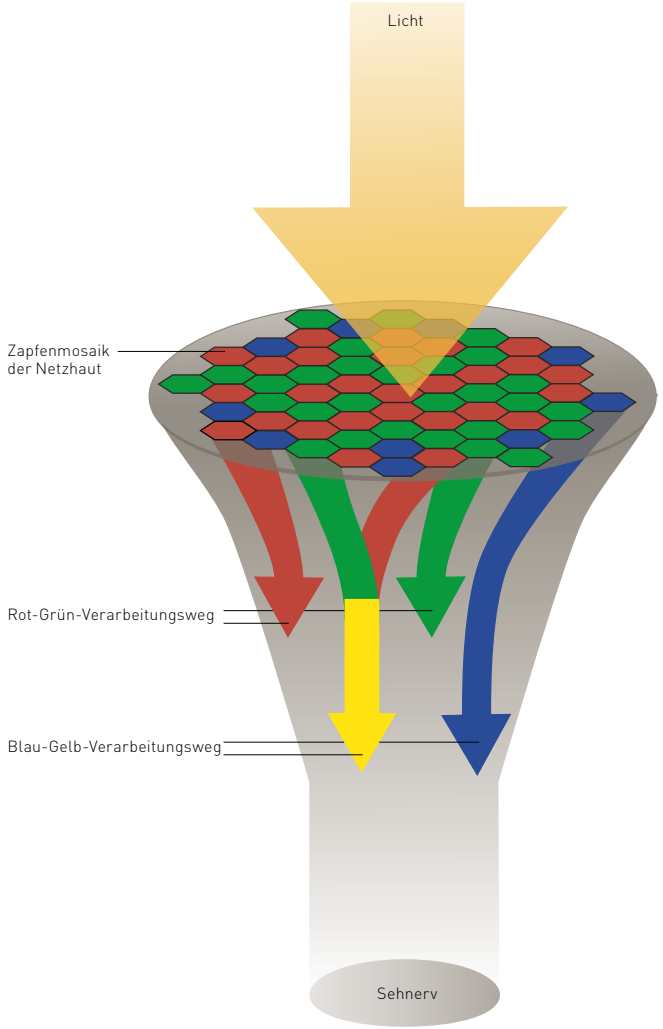


Abb. Schematische Darstellung eines von Licht beschienenen Ausschnitts der Netzhaut. Die drei Zapfen-Typen werden gereizt. Ihre Signale werden bei der Weiterleitung miteinander verrechnet. Gelb-Signale entstehen aus Rot und Grün, analog zur additiven Farbmischung.

K57 FARBENBLINDHEIT AUF NETZHAUTEBENE

Das Vorhandensein dreier unterschiedlicher Sehpigmente in den Zapfen, die das Tagessehen ermöglichen, entscheidet wesentlich über das Farbensehen.
Bei allen drei Sehpigmenten kann es zu Missbildungen kommen, die zu bestimmten Arten von Farbenblindheit führen. Farbenblindheit auf der Netzhautebene ist eine vererbbare Eigenschaft der Augen. Nahezu 5 % der europäischen Männer leiden daran oder an einem eingeschränkten Farbunterscheidungsvermögen.[1] Am häufigsten ist die Rot-Grün-Blindheit. Wenn der rote oder grüne Zapfen teilweise inaktiv oder ganz defekt ist, fällt der Rot-Grün-Verarbeitungsweg aus. Das führt zu einem allein vom blau-grünen oder blau-roten Farbgegensatz getragenen Farbensehen.[2]
Die biochemische Struktur des roten und grünen Sehfarbstoffs weicht nur an drei Stellen voneinander ab. Dementsprechend unterscheiden sich auch ihre Gene nur an drei Stellen, die zudem beide nahe beieinander auf dem weiblichen Geschlechtschromosom liegen. Das führt in einigen Fällen zu Gen-Verwechslungen und Gen-Defekten bei der Keimzellenbildung. Sie werden bei Männern nicht wie bei Frauen durch eine weitere Gen-Kopie ersetzt. Der Gen-Defekt prägt sich daher aus.
Einen Menschen ohne rotes Sehpigment, nennt man protanop, ohne grünes deuteranop, ohne blaues tritanop.
Beim protanopen Sehen werden anstelle von Rottönen nur sehr dunkle Braun- bis Schwarztöne wahrgenommen. Helligkeit und das Wahrnehmen aller anderen Farben wird von der Aktivität der grünen und blauen Zapfen gewährleistet.
Fehlt der Grün-Zapfen, werden kurz- und langwellige Strahlung verarbeitet. Deuteranope Menschen empfinden im roten Bereich Helligkeit und verwechseln Rot und Grün. Viele Säugetiere sehen ähnlich, da ihnen der Grün-Zapfen fehlt. Tritanopie, die Erblindung im Blau-Bereich, ist sehr selten. Es kommt dabei zum Ausfall des blaugelben Verarbeitungswegs. Gelb und auch Grün fehlen der Farbskala, wenn zwei Zapfentypen entfallen. Dieses Tagessehen ist genauso farblos wie das Nachtsehen. Beim Ausfall aller drei Zapfentypen kommt es zur Erblindung des Tagessehsystems.

1

2

3

4

Abb. 1 Das Photo entspricht der Farbskala eines Normalsichtigen.
Abb. 2 Es gibt spezielle Farbfilter, mit denen man Fotografien so bearbeiten kann, dass sie den Seeeindruck eines farbenblinden Mensch widerspiegeln. Das bearbeitete Bild simuliert den Ausfall des Rot-Zapfens. Das Bild zeigt an Stelle von Rot nur sehr dunkle Töne. Grün und Rot sind nicht klar unterscheidbar.
Abb. 3 So wird das gleiche Bild von einem Menschen mit defektem Grün-Zapfen gesehen. Rötliche Töne werden schlecht von grünlichen unterschieden, wobei rötliche Töne etwas heller wirken als grünliche, weil rote Zapfen aktiv sind.
Abb. 4 Beim Sehen ohne Blau-Zapfen entfallen Gelb- und Grüntöne.

1 Vgl. Werner Schmid: *Biophysik des Farbensehens*. Konstanz 1999, S. 68 – 71.
2 Vgl. Karl R. Gegenfurtner, Lindsay T. Sharpe: *Color Vision. From Genes to Perception*. Cambridge 2001, S. 24 – 51.

K58 KOMPLEMENTÄRES NACHBILD

Wird eine Farbfläche einige Zeit lang fixiert, werden ganz bestimmte Lichtsinneszellen aktiviert. Sie passen sich an den vorliegenden Farbreiz an, wobei sie unempfindlich werden. Es kommt zu einer lokalen farbigen Adaptation.[1]
Wird anschließend der Blick auf eine weiße Fläche gerichtet, sieht das Auge ein komplementär gefärbtes Nachbild der vorher betrachteten Fläche. Die Sinneszellen, welche die Komplementärfarbe vermitteln, wurden beim Betrachten der Farbfläche nicht gereizt und können sofort auf weißes Licht ansprechen. Nachdem die ausgebleichten Sehpigmente regeneriert worden sind, verflüchtigt sich das Nachbild wieder.
Die hier zu beobachtenden Komplementärfarben sind die der additiven Farbmischung.

1 Vgl. G.A. Agoston: *Color Theory and its Application in Art and Design*. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo 1987, S. 195ff.

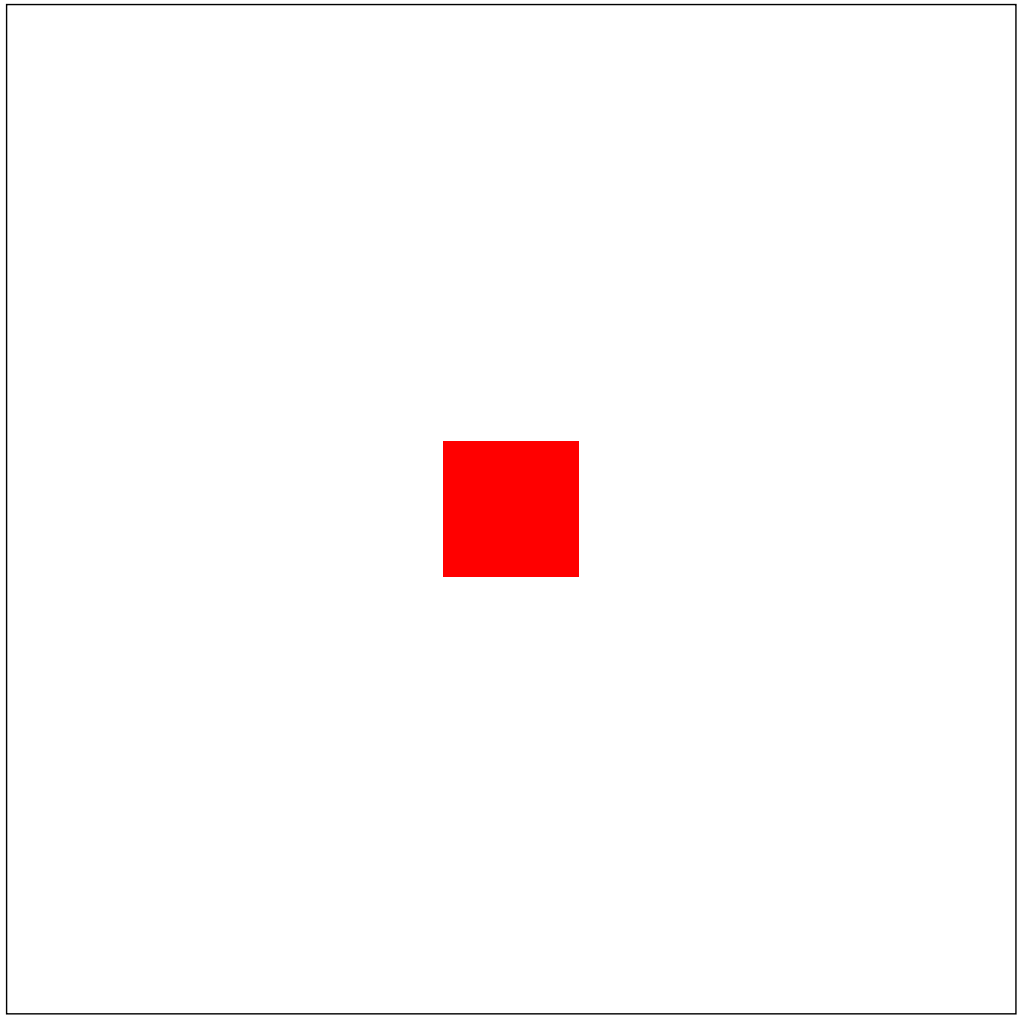


Abb. Das rote Rechteck beginnt nach einigem Fixieren an den Rändern zu flimmern. Der Blick auf die weiße Fläche daneben lässt das cyanfarbige Nachbild zum Vorschein kommen.

K59 ADAPTATION

Adaptation ist einerseits die generelle Anpassung aller Lichtsinneszellen an den Grad der Helligkeit, andererseits eine Anpassung an die Farbigkeit des vorherrschenden Beleuchtungslichts. Durch Adaptation wird die Empfindlichkeit der Zellen ständig an den Lichteinfall angeglichen. Beide Prozesse, Helligkeitsanpassung und Farbanpassung, laufen ständig ab und tragen neben anderen Prozessen wesentlich zur Konstanz der visuellen Wahrnehmung bei.[1]

Lichtsinneszellen sind über einen großen Bereich von Lichtintensitäten aktiv. Helle Lichteinstrahlung regt sie zu starker biochemischer Aktivität an. Danach sind sie jedoch unempfindlich für geringere Lichtintensitäten. Erst nach einem Moment ist das Auge in der Lage, schwächere Lichtreize zu unterscheiden. Bei schwachem Licht dagegen erhöht sich die Lichtempfindlichkeit des Auges. Das führt beim Übergang in helleres Licht zur Blendung. Nach einem längeren Aufenthalt im Dunkeln erreicht das Auge seine maximale Dunkelanpassung.

Diese Hell-Dunkeladaptation tritt beispielsweise während der Einfahrt in einen Tunnel bei strahlendem Sonnenschein auf. Nach dem anfänglichen Dunkeleindruck werden erst allmählich Einzelheiten unterscheidbar. Da sich die Lichtsinneszellen an die hohe Lichtintensität angeglichen haben, müssen sie sich nun auf ein differenziertes Arbeiten bei schwachem Licht einstellen. Bei der Ausfahrt aus dem Tunnel stellt sich der gegenläufige Prozess ein: Das auf geringe Lichteinstrahlung angepasste Auge wird zunächst stark geblendet und passt sich dann physiologisch den großen Lichtmengen an. Dies ereignet sich schneller als umgekehrt.

Die Anpassung der »Farbsinneszellen« (Zapfen) an farbiges Licht verläuft analog. Sie wird in der Sinnesphysiologie als chromatische Adaptation bezeichnet, meint aber nichts anderes als den Weißabgleich des Auges.

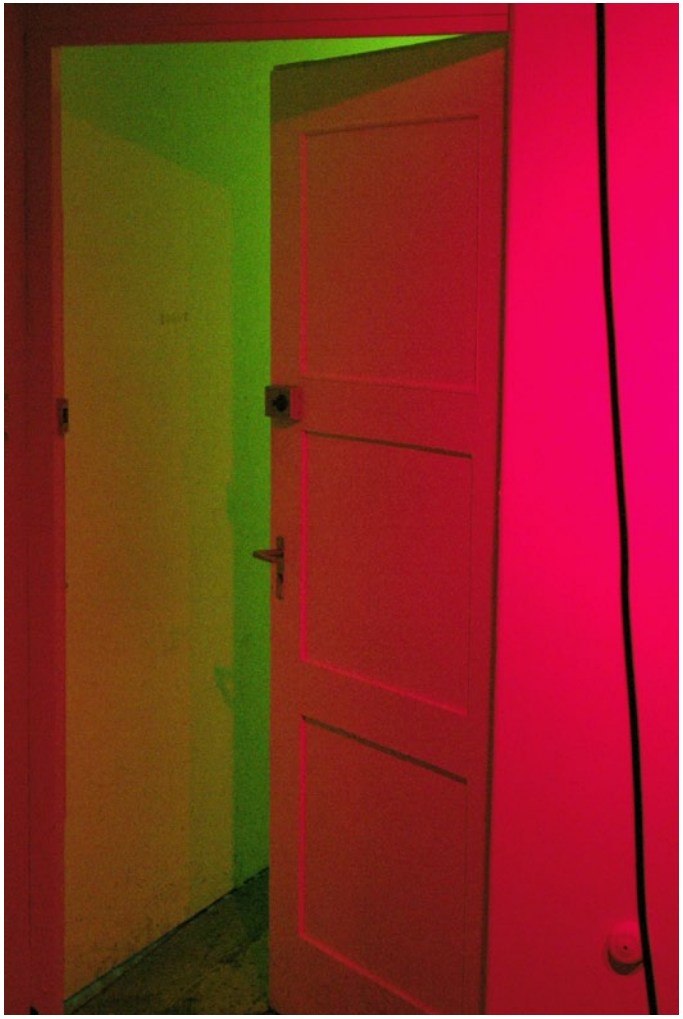


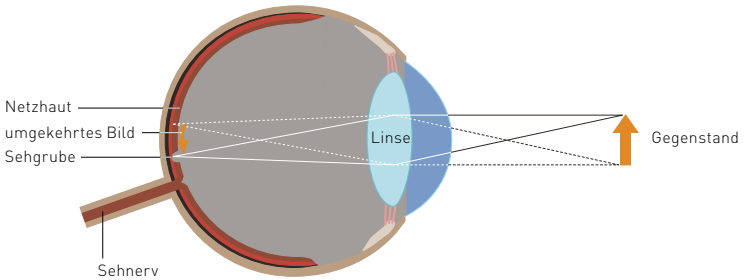
Abb. Die Aufnahme aus dem FarbLicht-Labor bei starkem farbigem Licht simuliert die farbliche Umstimmung des Auges. Beim Blick in neutrales Licht wird sofort die Komplementärfarbe gesehen. Die Rechenanweisungen der Digitalkamera, mit der diese Aufnahme erstellt wurde, sind analog zur chromatischen Adaptation des Auges programmiert.

1 Vgl. Josef Dudel, Randolf Menzel, Robert Schmidt: *Neurowissenschaft vom Molekül zur Kognition*. Berlin, Heidelberg, New York 2001, S. 395. Vgl. Ralph M. Evans: *An Introduction to Color*. New York, London 1948, S. 130 – 135 u. 173 – 185.

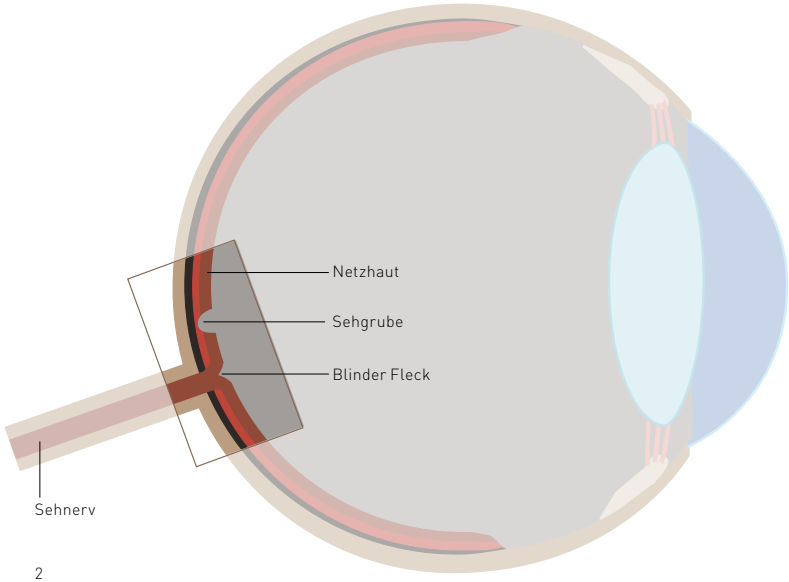
K60 NETZHAUT

Die Netzhaut oder Retina ist die lichtempfindliche Schicht des Auges. Sie ist ein komplexes Netzwerk aus Nervenzellen, die einen nach außen gelagerten Teil des Gehirns darstellen. Ihr wichtigster Bestandteil sind die Lichtsinneszellen. Sie liegen auf der dem Licht abgewandten Unterseite der Netzhaut über der Pigmentschicht.
An der Austrittsstelle, wo der Sehnerv das Auge verlässt, befindet sich der so genannte Blinde Fleck, da dort keine Lichtsinneszellen liegen. Dieses Loch in der Netzhaut wird allerdings nicht wahrgenommen.
Alle Teile der Netzhaut werden im Gehirn repräsentiert. Der Sehgrube, dem Zentrum des scharfen, farbigen Tagessehens, steht dort ein besonders großer Bereich zur Verfügung. Beim Blick auf den Augenhintergrund erkennt man die Sehgrube an ihrer gelben Färbung. Sie gilt als der Gelbe Fleck.[1]
Optische Täuschungen, die willentlich nicht ausgeschaltet werden können, gehen auf eine vorbewusste Verarbeitung innerhalb der Netzhaut zurück. Es kommt hier zu einer ersten Verarbeitung der ins Auge fallenden Lichtsignale. Dabei sind die Lichtsinneszellen horizontal vernetzt. Gerade die Kontrastverstärkung geht auf die Wechselwirkung von Gruppen von Lichtsinneszellen zurück.

1 Vgl. N. Welsch, C. Liebmann: *Farbe*. Heidelberg 2003, S. 250ff.



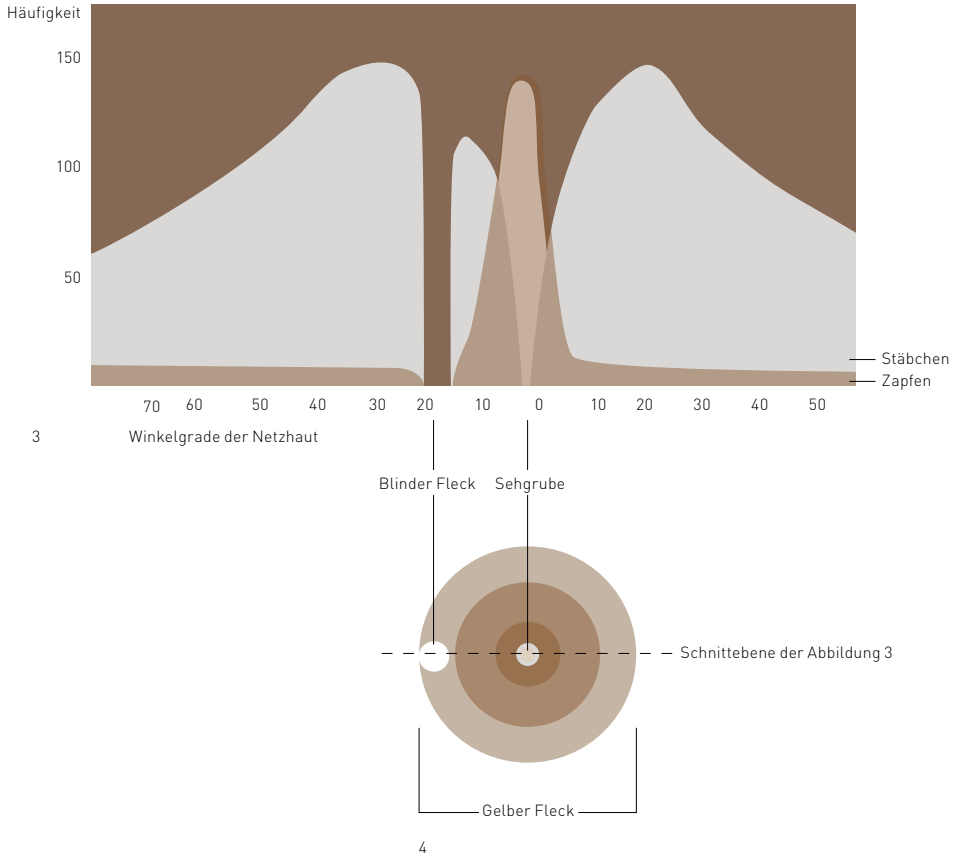
1



2

Abb. 1 Das Bild, das auf die Netzhaut fällt, steht auf dem Kopf. Im Brennpunkt des Strahlengangs befindet sich die Sehgrube. Die dünne Schicht der Netzhaut, die die Lichtsinneszellen enthält, ist rot gekennzeichnet. Die Pigmentschicht hüllt sie lichtdicht ein und ernährt sie.
Abb. 2 Aufsicht auf den zentralen Bereich der Netzhaut mit Sehgrube (Gelbem Fleck) und Blindem Fleck.

Abb. 3 – 4 Senkrechter Schnitt durch die Netzhaut entlang der gestrichelten Linie von Abb. 4. Da das Auge einer Kugel entspricht, wird die Skala in Winkel-Grad eingeteilt. Die Null liegt im zentralen Gelben Fleck. Zwischen 10 und 20 Grad links neben der Sehgrube befindet sich der Blinde Fleck. Jeder Stelle des Schnittbildes wird die Anzahl der dort auftretenden Lichtsinneszellen zugeordnet. Hellgrau sind die Stäbchen dargestellt, dunkelbraun die Zapfen. In der Sehgrube sind sie am häufigsten vertreten, Stäbchen dagegen überhaupt nicht. Diese erreichen ihr Maximum in der Netzhaut-Peripherie.



K61 NETZHAUTAUFBAU[1]

Die Netzhaut ist aus klar unterscheidbaren Schichten von Nervenzellen aufgebaut. Schichten, die Zellkörper enthalten, wechseln sich mit reinen Verschaltungsschichten ab. Die elektrischen Signale, die von den Lichtsinneszellen gebildet werden, werden in diesem komplexen Netzwerk von Schicht zu Schicht weiterverarbeitet und modifiziert.
Die horizontale Vernetzung wird von so genannten Horizontal- und Amakrin-Zellen getragen. Die vertikale Vernetzung wird von Nervenzellen mit zwei Polen gewährleistet. Sie werden daher auch Bipolare genannt. Sie sind die Direkt-Verbindung zwischen den Lichtsinneszellen und dem Sehnerv.
Licht trifft sie nicht direkt. Die Lichtsinneszellen liegen geschützt auf der Netzhautunterseite, eingebettet in die lichtdichte Pigmentschicht. Nur im Bereich der Sehgrube ist die Netzhaut sehr dünn. Die dort gelegenen Zapfen trifft das einfallende Licht direkt.
Ganz oben auf der Netzhaut liegen die Ganglienzellen, die zusammen den Sehnerv bilden. Das gesamte Netzwerk der Netzhaut mündet mit allen elektrischen Signalen auf den vergleichsweise wenigen Ganglienzellen. Das bedeutet, dass Signale stark zusammengefasst werden müssen. Alle Sinneszellen, deren Signale eine Ganglienzelle beeinflussen, bilden zusammen ein rezeptives Feld.

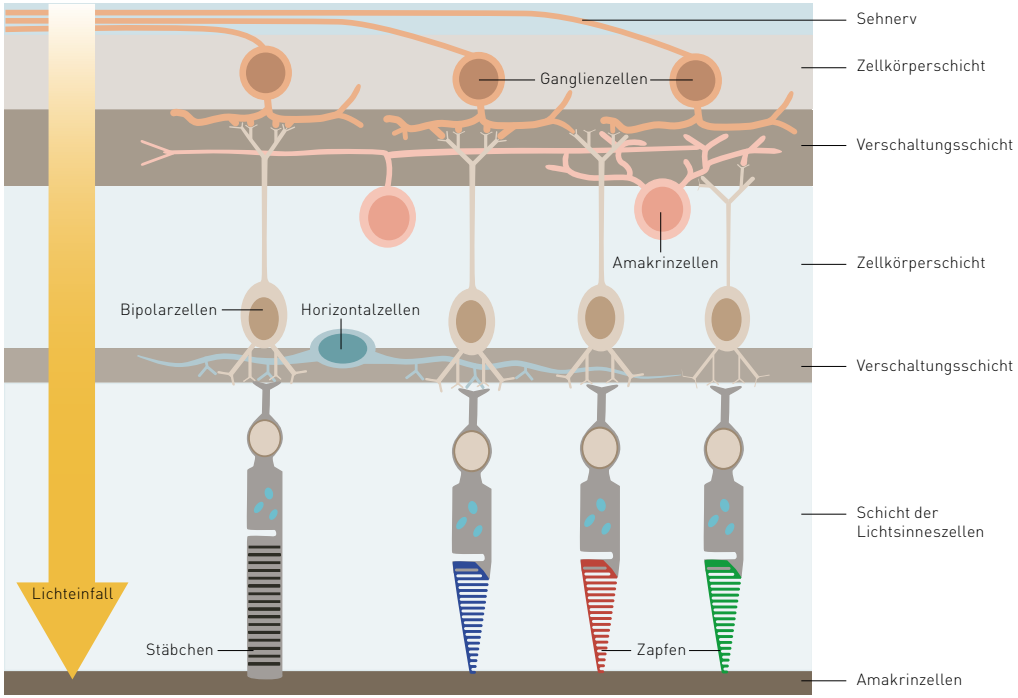


Abb. Schematische Darstellung des zellulären Aufbaus der Netzhaut. Die Lichtrichtung ist angegeben. Die lichtempfindlichen Außensegmente der Stäbchen und Zapfen weisen nach unten in Richtung der Pigmentschicht. Alle Ausgänge der Netzhaut werden im Sehnerv zusammengefasst. Alle Netzhautzellen sind gleichzeitig aktiv und kommunizieren miteinander.

1 Vgl. N. Welsch, C. Liebmann: *Farbe*. Heidelberg 2003, S. 251 – 254.
Vgl. John G. Nicholls, A. Robert Martin, Bruce G. Wallace: *Vom Neuron zum Gehirn. Zum Verständnis der zellulären und molekularen Funktion des Nervensystems.* Stuttgart, Jena, New York 1995, S. 377 u. 389.
Vgl. David S. Falk, Dieter R. Brill, David G. Stork: *Ein Blick ins Licht. Einblicke in die Natur des Lichts und des Sehens, in Farbe und Fotografie.* Basel, Boston, Berlin 1990, S. 192.
Vgl. Erik R. Kandel, James H. Schwartz, Thomas M. Jessell: *Principles of Neural Science*, East NorwalK1991, S. 409.

K62 SEHGRUBE

Im Brennpunkt der Linse, dort wo die Sehachse auf die Netzhaut trifft, befindet sich die Sehgrube oder Fovea. Dort sind die Schichten von Nervenzellen sehr dünn. Die auf die Lichtsinneszellen auftreffende Lichtmenge ist besonders hoch.[1] Die Sehgrube besitzt die höchste Auflösung des Auges und ist für scharfes Tagessehen verantwortlich.[2] Die Zapfendichte ist in der Sehgrube maximal. In ihrem Zentrum gibt es ausschließlich rote und grüne Zapfen, nur gegen den Rand hin sind auch blaue Zapfen vorhanden.[3] Dies ist eine der Anpassungen an einen Abbildungsfehler der Linse, die blaues, energiereiches Licht stärker bricht.

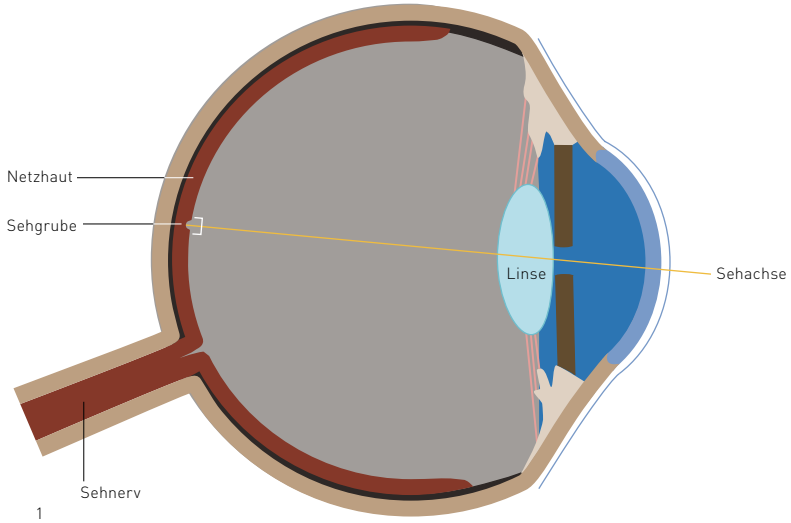
Stäbchen sind außerhalb der Sehgrube maximal vertreten. Scharfes Sehen bei Nacht ist daher immer peripher. Da die Sehgrube im Grunde genommen nachtblind ist, ist ein Stern am Nachthimmel nur mit peripherem Sehen erkennbar, d.h., wenn er nicht mit der Sehgrube fixiert wird.

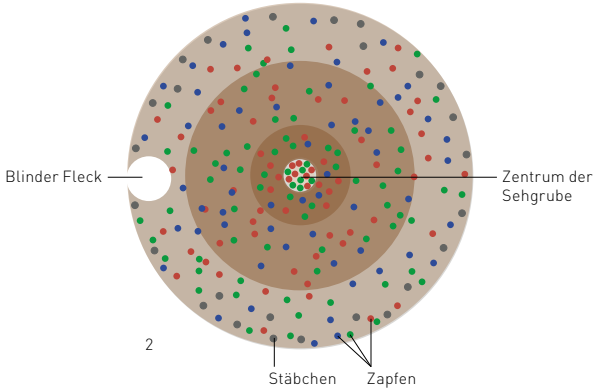
Die Sehgrube hat einen Durchmesser von 1,5 mm, ihr Zentrum einen von nur 0,33 mm. So klein dieser Bereich der Netzhaut ist, im Gehirn nimmt seine Repräsentation einen großen Teil ein. Um die Auflösung zu maximieren, ist in der Sehgrube jede Lichtsinneszelle direkt mit dem Gehirn verbunden. Zellen außerhalb der Sehgrube werden viel stärker zusammengefasst. Das periphere Nachtsehen ist dagegen viel unschärfer.

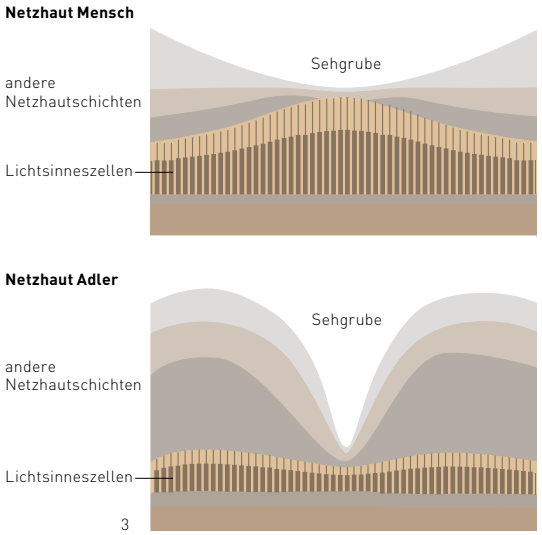
Mit sakkadischen Augenbewegungen richtet das Auge die Sehgrube immer auf die kontrastreichsten Stellen des Blickfeldes und erneuert ständig das wahrgenommene Bild.

1 Vgl. N. Welsch, C. Liebmann: *Farbe*. Heidelberg 2003, S. 251.
Vgl. Margaret Livingstone: *Vision and Art. The Biology of Seeing*. New York 2002, S. 70.
2 Vgl. Moritz Zwimpfer: *Farbe – Licht, Sehen, Empfinden. Eine elementare Farbenlehre in Bildern von Moritz Zwimpfer*. Bern, Stuttgart 1985, Abschnitt 241 u. 259.
3 Vgl. Welsch, Liebmann, *Farbe*, a.a.O., S. 250.
4 Vgl. Livingstone, *Vision and Art*, a.a.O., S. 70.

Abb. 1 Das Querschnittschema des Auges zeigt die Lage der Sehgrube im Auge.
Abb. 2 Schematische Sicht auf die Sehgrube von oben. Innerhalb des zentralen Bereichs finden sich allein rote und grüne Zapfen. Zum Rand hin erhöht sich die Anzahl der Stäbchen bis auf einen Maximalwert. Ebenfalls eingezeichnet ist die Lage des blinden Flecks.
Abb. 3 Die Sehkraft des Adlers übertrifft die des Menschen um ein Vielfaches. Beim Vergleich einer menschlichen Sehgrube mit derjenigen eines Adlers fällt auf, dass der Adler eine noch stärker vertiefte Sehgrube besitzt.



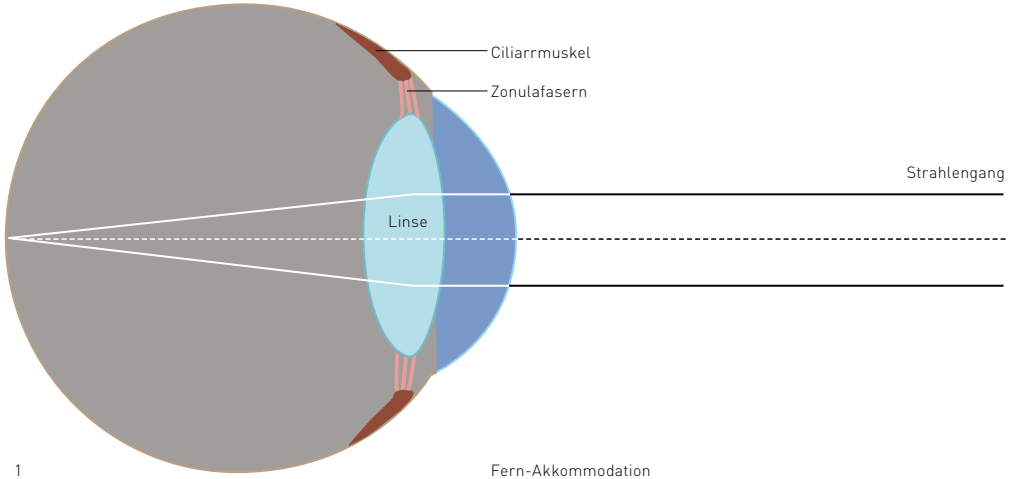




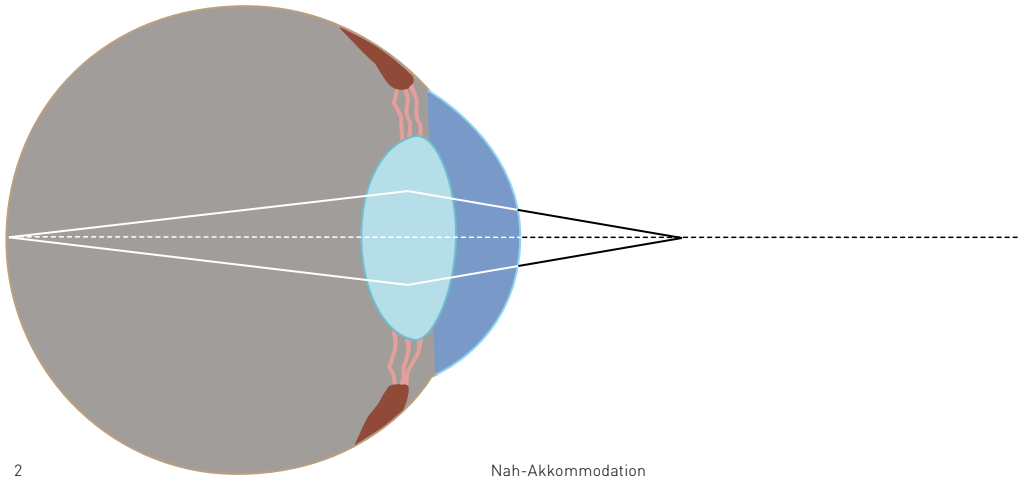
K63 AKKOMMODATION

Durch einen Augensprung können sowohl Objekte in weiter Ferne als auch in nächster Nähe sofort scharf gesehen werden. Dies erreicht das Auge durch Akkommodation. Dabei muss der Brennpunkt der Lichtstrahlen im Auge genau auf den Punkt schärfsten Sehens (Sehgrube) fallen. Dafür sorgt die elastische, sich flexibel wölbende Linse als Kernstück der Optik des Auges.
Die Linse ist an Zonulafasern aufgehängt, die mit Ciliarrmuskeln in Verbindung stehen. Sind die Muskeln entspannt, gibt es einen Zug auf die Fasern und die Linse wird abgeflacht. Das Auge sieht in die Ferne scharf. Umgekehrt bewirken angespannte Ciliarrmuskeln eine Lockerung der Zonulafasern. Die Linse wölbt sich durch ihre Eigenelastizität. Dabei gewinnt sie an Brechkraft und nahe gelegene Punkte werden auf der Netzhaut scharf abgebildet.[1]

1 Vgl. Moritz Zwimpfer: *Farbe – Licht, Sehen, Empfinden. Eine elementare Farbenlehre in Bildern*. Bern, Stuttgart 1985, Artikel 226 – 229.
Vgl. David Falk, Dieter Brill, David Stork: *Ein Blick ins Licht. Einblicke in die Natur des Lichts und des Sehens, in Farbe und Fotografie*. Basel, Boston, Berlin 1990, S. 155.



1 Fern-Akkommodation



2 Nah-Akkommodation

Abb. 1 Abgebildet ist ein idealisiertes Auge und der Strahlengang des in der Linse gebündelten Lichts bei Fern-Akkommodation. Bei straffen Zonulafasern bekommt die Linse eine flache Form.
Abb. 2 Das Auge hat bei Nah-Akkommodation eine rundlich gewölbte Linse, weil kein Zug auf den Zonulafasern ist.

K64 SAKKADISCHE AUGENBEWEGUNGEN

Übersetzt bedeutet »sakkadisch« ruckartig. Damit sind ständige, unbewusste, kleine Augenbewegungen gemeint, mit denen das Auge die Sehgrube, d.h. den Punkt schärfsten Sehens am Tage, über das Gesichtsfeld wandern lässt.[1] Gesteuert von der Gesamtwahrnehmung einer Szene, erfasst das Auge dabei ständig die Felder mit den größten Kontrasten (Farbkontraste und Hell-Dunkel-Kontraste).[2] Für die visuelle Wahrnehmung sind sakkadische Augenbewegungen sehr wichtig. Wird das Auge an der Bewegung gehindert, so verschwindet das wahrgenommene Bild. Der Sehfarbstoff bleicht aus und die Sinneszellen können sich nicht erholen. Um überhaupt zu sehen, bedarf es ständiger Augenbewegungen, die immer neue unterschiedliche Bilder an das visuelle Zentrum des Gehirns liefern, wo sie zu einem Gesamteindruck verarbeitet werden. Das gesehene Bild wird also ständig erneuert, um die Wahrnehmung aufrecht zu erhalten.[3]

1 Vgl. Richard L. Gregory: *Auge und Gehirn. Physiologie des Sehens*. Hamburg 2001, S. 63 – 67.
2 Vgl. Margaret Livingstone: *Vision and Art. The Biology of Seeing*. New York 2002, S. 78–83.
3 Vgl. A. Terry Bahill, Lawrence Stark: »*Sakkadische Augenbewegungen*«, in: *Spektrum der Wissenschaft: Verständliche Forschung. Wahrnehmung und visuelles System*. Heidelberg 1986, S. 68 – 77.

Abb. Wird ein Gesicht betrachtet, wandern die Augen zwischen verschiedenen Punkten hin und her. Dieser Weg ist über dem Gesicht eingezeichnet.

K65 REZEPTIVE FELDER

Ein rezeptives Feld ist der Bereich der Netzhaut, über den die Aktivität einer Nervenzelle der Sehbahn beeinflusst wird.[1] Die Tatsache, dass Millionen Lichtsinneszellen auf vergleichsweise wenige Sehnervenzellen geschaltet werden, bedingt zwangsläufig die Entstehung von rezeptiven Feldern. Einer Zelle der Sehbahn sind immer Eingänge von mehreren bis sehr vielen Lichtsinneszellen zugeordnet. Die Größe der rezeptiven Felder nimmt von der Sehgrube zur Netzhautperipherie zu. Phänomene der Kontrastwahrnehmung und Kontrastverstärkung, optische Täuschungen, die sich auf Hell-Dunkel- und Farbkontraste stützen, sowie die optische Farbmischung, die Assimilation und der Simultankontrast lassen sich mit Hilfe der rezeptiven Felder leichter verstehen.

Das einfachste rezeptive Feld einer Zelle des Sehnervs ist nahezu kreisförmig. Es entsteht durch alle Querverbindungen der Netzhaut.[2] Das Feld hat immer ein Zentrum und ein Umfeld, die einander entgegengesetzt wirken. Fällt Licht beispielsweise ins das Zentrum des Feldes, kommt es zu einer Anregung der Nervenzellaktivität. Entsprechend viele Signale gelangen über die Sehbahn ins Gehirn. Fällt dagegen Licht in das Umfeld, so kommt es zu einer Hemmung der Signalleitung. Eine ringförmige Beleuchtung des Umfeldes führt sogar zur vollständigen Hemmung. Es gibt aber auch den umgekehrten Fall, dass zentrales Licht die Signalleitung stark hemmt und Umfeldlicht aktivierend wirkt. Auf eine eindeutige Beleuchtung von Zentrum oder Umfeld gibt die Signalleitung eine eindeutige Antwort, auf diffuse Beleuchtung erfolgt keine Reaktion. Das System der rezeptiven Felder der Netzhaut reagiert höchst empfindlich auf kleinste Kontraste. Kanten und Farbübergänge bewirken eine rechnerische Leistung in den Nervenzellen, welche die Kontrastempfindung zusätzlich verstärkt.[3] Gleichbleibende Flächen werden nicht zusätzlich von den

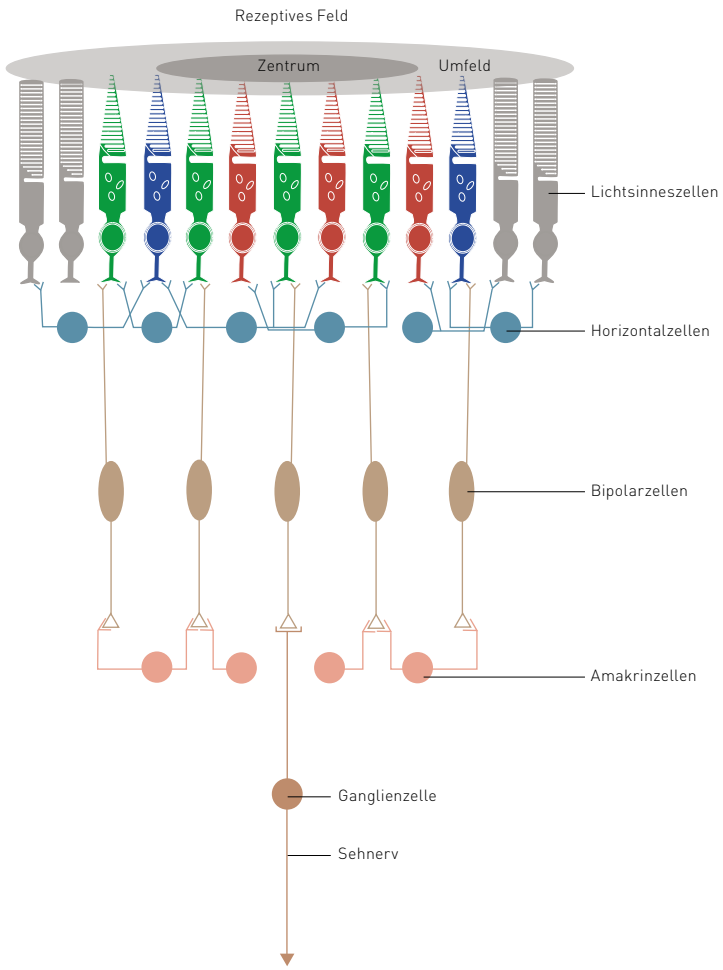


Abb. 1 Einfaches rezeptives Feld einer Zelle des Sehnervs. Die seitliche Hemmung aus nachgeschalteten Nervenzellen ist verantwortlich für den Gegensatz von Zentrum und Umfeld.

Nervenzellen berechnet, was den Arbeitsaufwand verringert, analog dem Errechnen von JPEG-Bildern durch einen Computer.
Auf höheren Verarbeitungsstufen der Sehbahn bis ins Gehirn werden die rezeptiven Felder und Reizmuster immer komplexer.[4] Gerichtete Bewegungen, Linienmuster, Formen und selbst Gesichtszüge sind notwendig, um diese Nervenzellen zu erregen.
Bei der Verarbeitung von Farbreizen auf der Stufe des Sehnervs bestätigt die Arbeitsweise der Netzhaut, d.h. der Bau einfacher rezeptiver Felder, die Vier-Farben-Theorie von Hering: es gibt rot-grün, gelb-blau und hell-dunkel geprägte rezeptive Felder.[5]

1 Vgl. David Hubel, Torsten Wiesel: *Brain and Visual Perception.The Story of a 25-Year Collaboration*. Oxford 2005, S. 93.
2 Vgl. John G. Nicholls, A. Robert Martin, Bruce G. Wallace: *Vom Neuron zum Gehirn. Zum Verständnis der zellulären und molekularen Funktion des Nervensystems.*Stuttgart, Jena, New York 1995, S. 388.
Vgl. N. Welsch, C. Liebmann: *Farbe*. Heidelberg 2003, S. 253.
Vgl. Margaret Livingstone: Vision and Art. The Biology of Seeing. New York 2002, S. 53 – 55.
Vgl. Roger Eckert: *Tierphysiologie*. Stuttgart, New York 1993, S. 254 – 271.
Vgl. Nicholls, Martin, Wallace, *Vom Neuron zum Gehirn, a.a.O.,* S. 392 – 393.
Vgl. Ernst Peter Fischer*: Die Wege der Farben*. Konstanz 1994, S. 95.
3 Vgl. Stephen E. Palmer*: Vision Science. Photons to Phenomenology*. Cambridge 1999, S. 115 – 118.
4 Vgl. Livingstone, Vision and Art, *a.a.O.,* S. 60.
Vgl. Nicholls, Martin, Wallace, *Vom Neuron zum Gehirn, a.a.O.*, S. 416.
5 Vgl. Livingstone, *Vision and Art, a.a.O.,* S. 60.

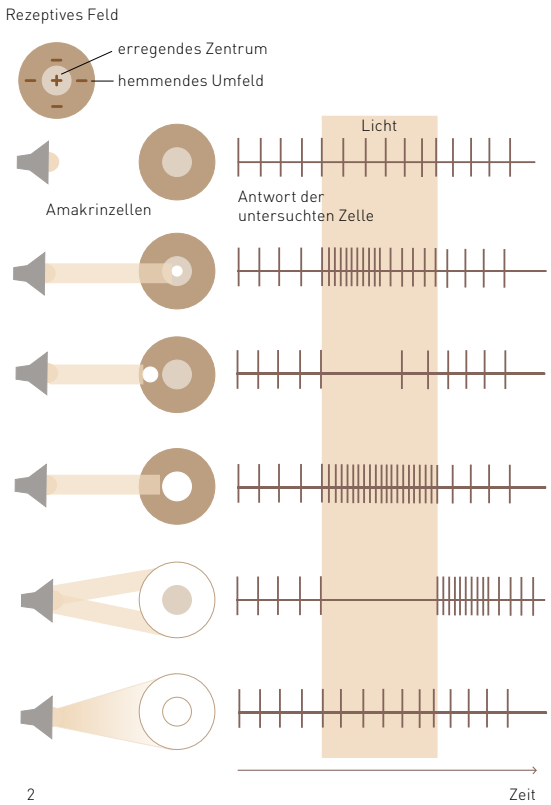


Abb. 2 Eine Reihe von Experimenten, die an einer Sehnervenzelle gemacht wurden. Sie antwortet auf bestimmte Beleuchtungsmuster mit elektrischen Impulsen, die sie ans Gehirn weiterleitet. Die elektrischen Signale wurden innerhalb einer bestimmten Zeit gemessen. Das rezeptive Feld dieser Sehnervenzelle hat ein erregbares Zentrum und ein hemmendes Umfeld.

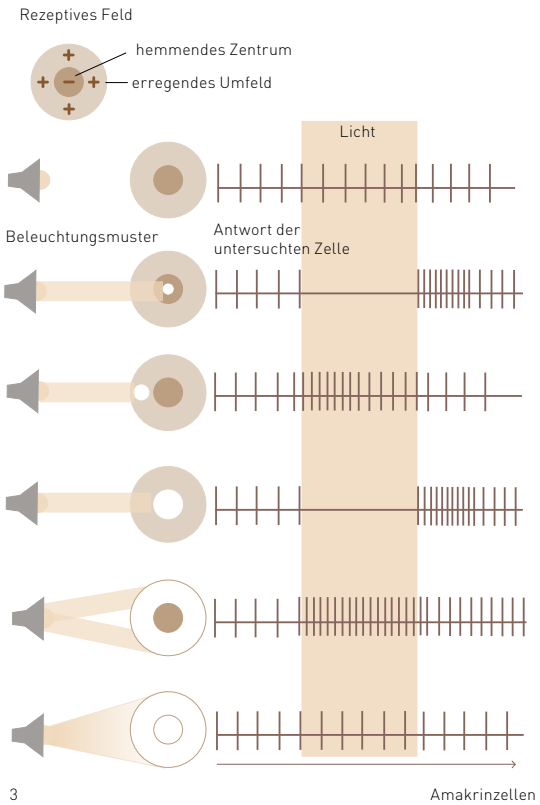


Abb. 3 Das gleiche Experiment mit einer Zelle, die genau umgekehrt reagiert. Ihr rezeptives Feld wird bei Beleuchtung des Zentrums gehemmt und durch Lichteinfall auf das Umfeld stark angeregt.

K66 OPTISCH PARTITIVE FARBMISCHUNG

Beim Betrachten von Plakaten im Vierfarbendruck aus der Nähe erscheinen unzählige kleine Farbpunkte. An manchen Stellen stehen sie klar nebeneinander gedruckt, an anderen übereinander. Aus der Distanz betrachtet wird das Punktemuster zu einem einheitlichen Farbeindruck.

Abhängig von der Größe der betrachteten Punkte und der Entfernung des Betrachters vom Bild wird reflektiertes farbiges Licht zu einem Gesamteindruck verarbeitet. Da keine substantielle Mischung der Farben der Punkte stattgefunden hat, erfolgt sie im Auge und wird optisch partitive Farbmischung genannt. Die Farben erscheinen zum Teil leuchtender, weil sich reflektiertes Licht additiv mischt. Da die Farbpunkte aber auf einem Träger aufgebracht sind (Leinwand, Papier), verlieren sie gegenüber der additiven Farbmischung reinen Lichts an Strahlkraft.

Sind die Punktmuster größer als die rezeptiven Felder der Netzhaut, lassen sich einzelne Punkte unterscheiden. Am Übergang von einem Farbpunkt zum nächsten steigern sich die Farbkontraste gegenseitig und beginnen leuchtend zu flimmern. Dies war das Anliegen der Maler des Pointillismus. Durch das Nebeneinandersetzen von Punkten reiner Farbe wollten sie einen strahlenden Farbeindruck erzeugen.[1] Die höchste Farbintensität ist erreicht, wenn Punkte gerade die Zentren der rezeptiven Felder, mit ihrem erregenden Licht ausfüllen. Jetzt mischen sich die Farben additiv im Auge. Füllen die Punkte jedoch das gesamte rezeptive Feld aus, kommt es zu einer Auslöschung der brillanten Farbigkeit, weil die verantwortlichen Sinneszellen nicht auf diesen diffusen Eindruck reagieren. Daher ist der richtige Bildabstand beim Betrachten pointillistischer Bilder so wichtig. Ist der Abstand zum Bild zu groß, weicht das brillante Leuchten der Farben einem Vergrauen der Farbigkeit.

Abb. Je weiter das Punktemuster vom Auge entfernt ist, desto geschlossener sieht der Farbverlauf aus. Aus nächste Nähe lassen sich einzelne Punkte unterscheiden.

1 Vgl. Margaret Livingstone: *Vision and Art. The Biology of Seeing.* New York 2002, S. 176-187.
Vgl. Werner Backhaus, Reinhold Kliegel, John Werner: *Color Vision. Perspectives From Different Disciplines.* Berlin, New York 1998, S. 27 – 30.

K67 KONTRAST-VERSTÄRKUNG

Einfache optische Täuschungen wie die Cornsweet-, die Hermann-Gitter- und die Elke Lingelbach-Täuschung zeigen die grundlegenden Strukturen unserer visuellen Wahrnehmung im Bereich von Hell und Dunkel. Gleichzeitig demonstrieren sie die Wirkungsweise der rezeptiven Felder.

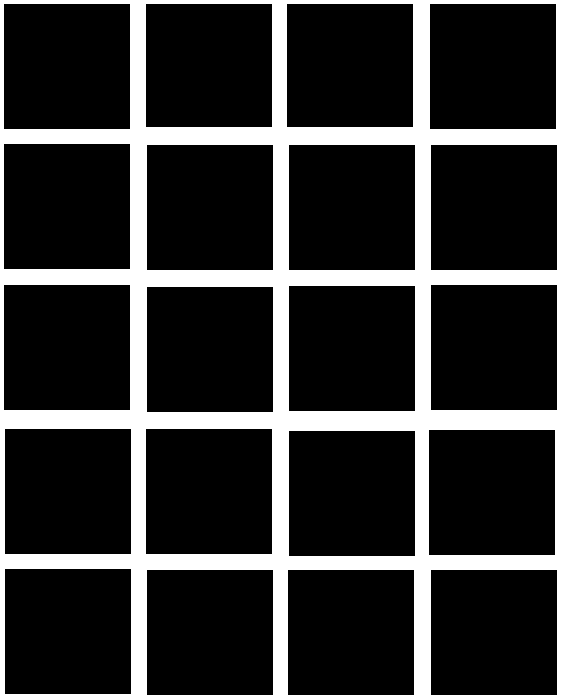
Das Bild der Umwelt wird zuerst auf der Netzhaut verarbeitet und gefiltert an das Gehirn weitergeleitet. Kleinste Kontraste werden überzeichnet und gleich bleibende Reize von Flächen gedämpft.

Die Cornsweet-Illusion zeigt, dass das visuelle System empfindlicher auf abrupte Änderungen reagiert als auf graduelle.[1] Der Grauton der beiden Flächen unterscheidet sich an den beiden Seiten nicht, nur zur Mitte hin gibt es eine kleine Veränderung des Grautons. Interessanterweise wird der Hell-Dunkel-Eindruck aber auf die gesamte Fläche übertragen, so dass wir meinen, ein helleres linkes und ein dunkleres rechtes Feld zu sehen.

Die beiden anderen Täuschungen beruhen auf einer Eigenschaft der Netzhautzellen, der so genannten seitlichen Hemmung. Diese werden erregt und hemmen gleichzeitig benachbarte Zellen auf der nächsten Verarbeitungsstufe. Am Übergang vom Zentrum zum Umfeld der rezeptiven Felder tritt die Hemmung besonders deutlich auf:

Das Hermannsche Gitter zeigt dunkel scheinende Flächen in den weißen Kreuzungspunkten, wenn man sie mit dem peripheren Gesichtsfeld betrachtet. Die wahrgenommene weiße Fläche der Kreuzungspunkte wird vierfach durch angrenzende dunkle Ecken gehemmt und als Ganzes abgedunkelt. Die Gitterstege dagegen erscheinen heller. Sie werden nur zweifach von angrenzenden dunklen Flächen gehemmt.[2]

1

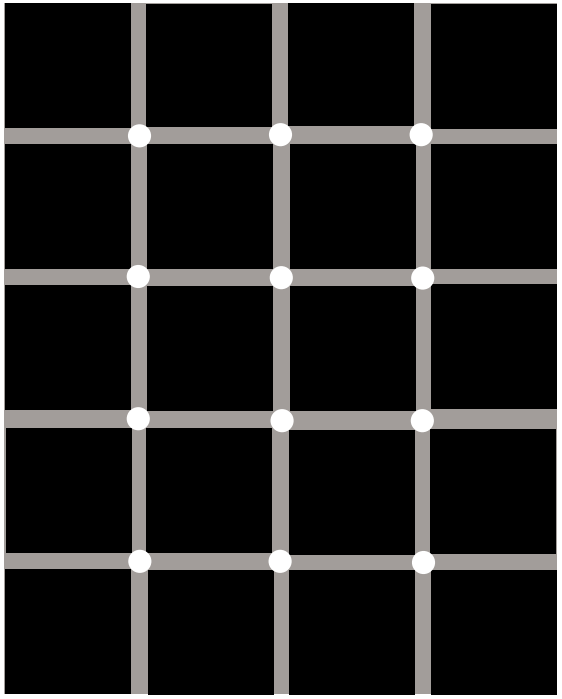


2

Abb. 1 Cornsweet-Täuschung
Abb. 2 Hermann-Gitter-Täuschung

Die Elke Lingelbach-Täuschung verfeinert das Hermann-Gitter mit leicht abgedunkelten Stegen und weißen Kreisflächen in den Kreuzungspunkten. Die Täuschung erzeugt immer schwarz gefüllte Kreisflächen. Der Hell-Dunkel-Kontrast der weißen Kreisflächen zum insgesamt viel dunkleren Umfeld überlagert den Eindruck der Gitter-Täuschung und verstärkt ihre Wirkung zusätzlich.[3]

1 Vgl. Margaret Livingstone: *Vision and Art. The Biology of Seeing*. New York 2002, S. 58.
2 Vgl. ebd., S. 56 – 57.
Vgl. Stephen Palmer: *Vision Science. Photons to Phenomenology*. Cambridge 1999, S. 116 – 117.
3 Vgl. Livingstone, *Vision and Art, a.a.O.*, Innenseite vorderer Bucheinband.



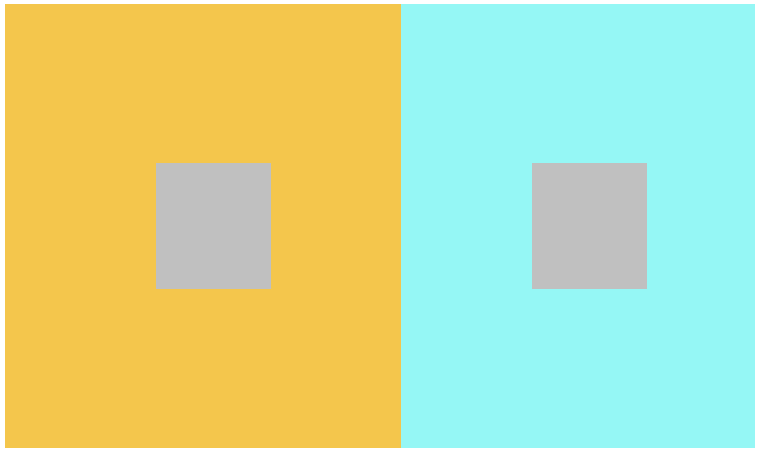
3

Abb. 3 Elke Lingelbach-Täuschung

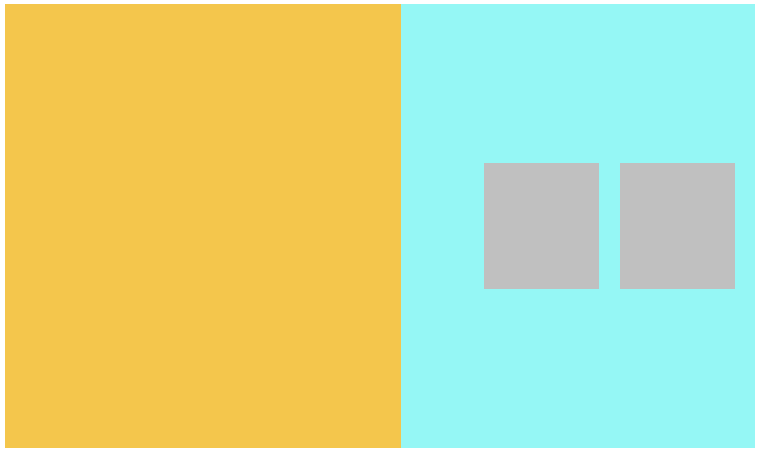
K68 SIMULTANKONTRAST

Die wahrgenommene Helligkeit und Farbe eines Objekts oder einer Fläche wird nicht allein durch die spektrale Zusammensetzung des von der Oberfläche reflektierten Lichts bestimmt, sondern ganz wesentlich von der Umgebung.
Umschließt beispielsweise eine kräftig gefärbte große Fläche eine kleinere neutrale, graue Fläche, so wirkt diese in der Komplementärfarbe der großen Fläche. Dieses Phänomen der Farbinduktion wird als Simultankontrast bezeichnet.[1] Hierbei wird eine neutrale Farbfläche in Richtung der Komplementärfarbe der umschließenden Fläche gesehen. Die Stärke des Eindrucks wird durch die Sättigung der Umfeldfarbe bestimmt. Dabei spielen, wie bei der optisch partitiven Farbmischung, auch die Größen der Flächen und die Entfernung zum Auge eine wesentliche Rolle.

1 Vgl. Anatol Julian Kallmann: *Farbkonstanz und Farbkontrast. Eine Untersuchung mit Hilfe der farbigen Schatten*. Mainz 2003, S. 3.
Vgl. G. A. Agoston: *Color Theory and its Application in Art and Design*. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo 1987, S. 199 – 203.



1



2

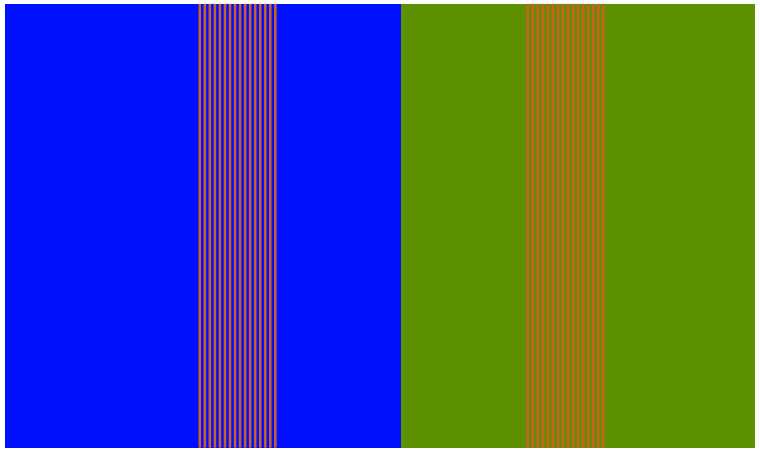
Abb. 1 Screenshot vom Tool Simultankontrast (siehe DVD-ROM). Das neutrale Grau des kleinen Quadrats wirkt auf einem kalten, cyanfarbenen Grund wärmer und rötlicher. Auf gelblichem Grund wirkt es dagegen kälter und bläulicher.
Abb. 2 Der Simultankontrast verliert sich sofort, wenn sich die beiden Quadrate im gleichen Farbfeld befinden.

K69 ASSIMILATION

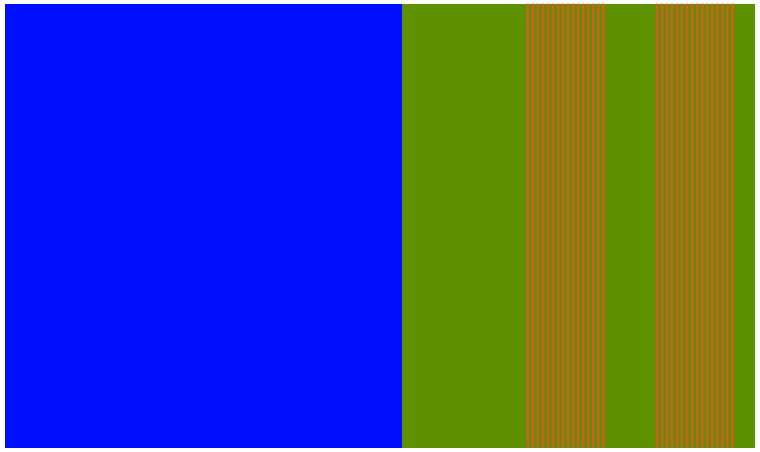
Schon im 19. Jahrhundert war die Wirkung der Assimilation gut bekannt. Michel Eugene Chevreul war als Leiter der Pariser Königlichen Gobelin-Manufaktur vor das Problem gestellt, dass auch die aus den bestens gefärbten Fäden gewobenen Wandteppiche im Ergebnis trübe Farben besaßen.[1] Selbst das Schwarz in blauen und violetten Entwürfen war sehr kraftlos. Chevreul erkannte, dass dies an der Wahrnehmung der einzelnen Farben und deren Kontrasten lag. Diese untersuchte er wissenschaftlich und fand den Simultan-, Sukzessiv- und »gemischten« Kontrast. Auch Wilhelm von Bezold, Professor für Physik, beschrieb 1874 in seiner Farbenlehre die Wirkung der hellen oder dunklen Kontur als wichtigen Teil verschiedenster Ornamente. Wo eine Farbe von ihrer Nachbarfarbe »überstrahlt« und in Farbton und Helligkeit stark verändert wird, kann eine goldene, silberne oder schwarze Kontur die Wechselwirkungen der beiden vollkommen aufheben.[2]

Die räumliche Mischung und Überlagerung von Farbton und Helligkeit benachbarter Flächen sind Effekte, die der Kontrastwirkung entgegengesetzt sind, da sie den Unterschied zwischen benachbarten Farben vermindern anstatt ihn zu vergrößern. Dies wird als Assimilation bezeichnet und nach Bezold »Bezold spreading effect«.[3]

Für die Unterscheidung von Figur und Grund spielt die Assimilation eine wichtige Rolle. Sie schließt eine Form und hebt sie vom Hintergrund ab. Eine Binnenfläche wird dabei viel heller interpretiert als sie wirklich ist, wenn sie Teil einer hellen Gesamtform ist, die vor einem dunkleren Hintergrund steht. Oder eine Binnenfläche erscheint dunkler, weil man sie zu einer dunklen Figur vor hellerem Hintergrund zählt. Auch dünne Streifen über farbigen Hintergründen werden nicht in der Gegenfarbe des Simultankontrastes wahrgenommen, sondern integrieren sich in die Farbigkeit des Hintergrunds. Allerdings spielen



1

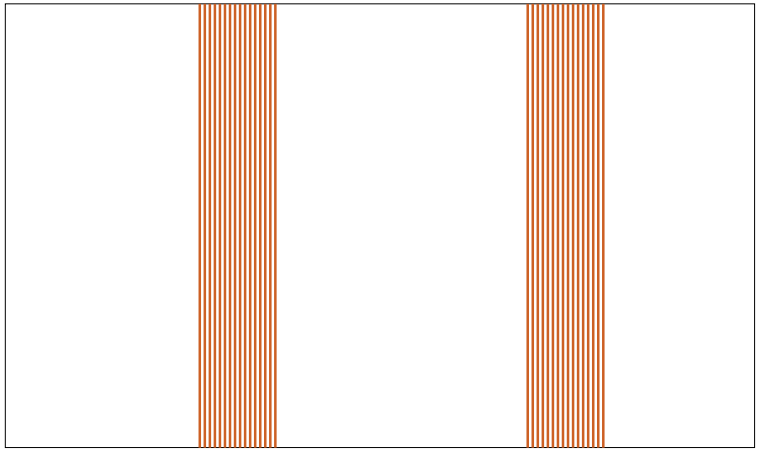


2

Abb. 1 Screenshot vom Tool Bezold Spreading effect (siehe DVD-ROM). Die Farbigkeit der schmalen Streifen wird in die Farbigkeit des Grundes einbezogen und damit der Kontrast verringert. Es handelt sich um identisch gefärbte Streifen, die aber sehr unterschiedlich erscheinen.

Abb. 2 - 3 Auf gleichem Grund wirken alle farbigen Streifen identisch. Die Wirkung wechselt, wenn die Streifen auf unterschiedlichen Farbflächen zu liegen kommen.

die Breite und die Entfernung der einzelnen Streifen eine wesentliche Rolle. Auch die Entfernung der betrachteten Fläche vom Auge ist ein wichtiger Faktor. Die Wahrnehmung von Assimilation, ihre Verarbeitung auf der Netzhautebene und die folgenden Verarbeitungsstufen im Gehirn sind weiterhin Gegenstand der Forschung.[4]



3

1 Vgl. Albert B. Costa, *Michel Eugene Chevreul: Pioneer of Organic Chemistry,* Department of History, University of Wisconsin, Madison. Wisconsin 1962, S. 6 – 11.
2 Vgl. Dr. Wilh. v. Bezold: *Die Farbenlehre im Hinblick auf Kunst und Kunstgewerbe*, 2. Auflage, Braunschweig 1921, S. 118 – 119, 132 – 133, 162, 163 – 165.
3 Vgl. Dorothea Jameson, Leo M. Hurvich: »Essay concerning color constancy«, in: *Ann. Rev. Psychol.,* 1898, 40: 1 – 22, S. 11 – 14.
Vgl. Robert W. Burnham: »Bezold's Color-Mixture Effect«, in: *American Journal Psychology*, 66 1953, S. 377–385.
4 Vgl. Harry Helson, Frederick H. Rohles: »A Quantitative Study of Reversal of Classi cal Lightness-Contrast«, in: *American Journal Psychology* 72, 1959, S. 530 – 538.
Vgl. Charles M. M. De Weert, Lothar Spillmann: »Assimilation: Asymmetry between Brightness and Darkness?«, in: *Vision Res.*, Vol. 35, No. 10, 1995, S. 1413 – 1419.
Vgl. Charles M. M. de Weert: »Assimilation versus Contrast«, in: *From Pigment to Perception. Advances in Understanding Visual Processes*, ed. Arne Valberg, Barry B. Lee. New York, London 1990, S. 305 – 311.
Vgl. Werner G. K. Backhaus, Reinhold Kliegl, John S. Werner: *Color Vision. Perspectives From Different Disciplines*. Berlin, New York 1998, S. 19 – 21, 28.

K70 FARBIGE SCHATTEN – GEFÄRBTE SCHATTEN

Wird ein Gegenstand vor weißem Hintergrund von einer farbigen und einer weißen Lichtquelle beleuchtet, kommt es zu einer optischen Täuschung, die sehr intensiv wirkt. Es entstehen dabei zwei Schatten. Der vom weißen Licht geworfene Schatten wird von der farbigen Lichtquelle eingefärbt. Er wird als gefärbter Schatten bezeichnet. Der von der farbigen Lichtquelle geworfene Schatten wird vom weißen Licht beleuchtet und ist in physikalischer Hinsicht farblos. In der Wahrnehmung des Betrachters entsteht jedoch ein starker Farbeindruck: der Schatten leuchtet in der Komplementärfarbe des farbigen Lichts. Dieses Phänomen wird farbiger Schatten genannt.[1]

Der farbige Schatten bezieht das ganze Gesichtsfeld mit ein. Er bleibt nicht wie beim Simultankontrast auf eine kleine Fläche begrenzt.[2] Wie eine digitale Kamera macht das menschliche Auge ständig einen Weißabgleich. Die im Umfeld vorherrschende Lichtfarbe wird im Rahmen der Farbkonstanz als »Weiß« definiert. Die Folge davon ist eine Verschiebung der Farbempfindung der gesamten Netzhaut. Dieser Vorgang vertauscht Weiß, d.h. den Weißpunkt, mit der Farbe der vorherrschenden Beleuchtung (chromatische Adaptation).

Trifft ein derart umgestimmtes Sehsystem auf eine weiße Fläche – denn im Schatten des farbigen Lichts wird effektiv weißes Licht reflektiert – erzwingt die Farbverschiebung des Auges im Feld des »farbigen Schattens« die Komplementärfarbe.

Da das CIE-Diagramm die Eigenschaften der Wahrnehmung von farbigem Licht gut wiedergibt, kann man diese Verschiebung mit ihm erklären:

Alle hoch gesättigten Farben sind über eine Gerade durch den Weißpunkt mit ihren Komplementärfarben verbunden. Die Umstimmung des Auges verschiebt den Weißpunkt auf den Spektralfarbenzug oder die Purpurgerade. Dabei fällt die Komplementärfarbe in den ehema-

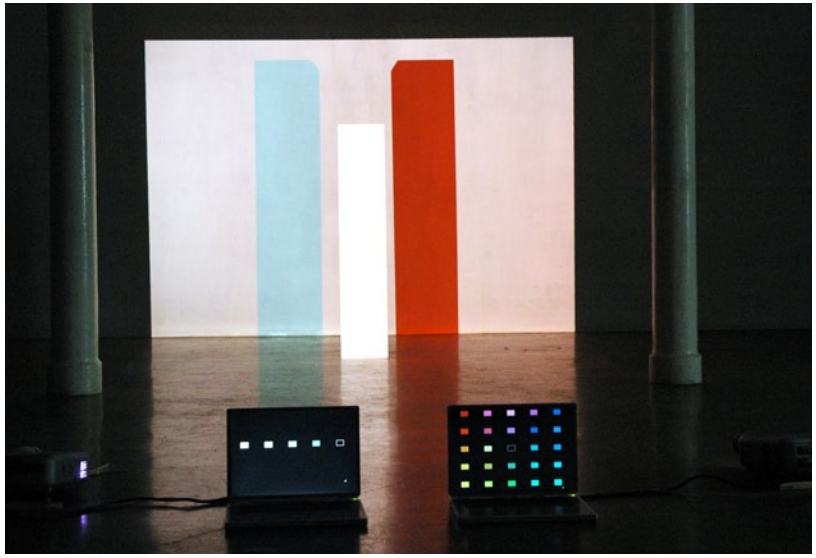


Abb. Mit der Installation »Schattenfarben«, bestehend aus 2 Lichtquellen (Beamern) und einer Holzstele, können intensiv gefärbte und blassere farbige Schatten erzeugt werden. So wird z.B. der Schatten der Holzstele, der durch weißes Licht (linker Beamer) erzeugt wird, durch das rote Licht (rechter Beamer) in der gleichen Farbe gefärbt. Der Schatten, der vom roten Licht erzeugt wird, erscheint cyanfarben.

ligen Weißpunkt. So wird in dieser Situation Weiß in der Komplementärfarbe gesehen. Wenn z. B. das Auge Weiß als Rot interpretiert, dann erscheint eine weiße Fläche in der Komplementärfarbe Cyan.
Die Erscheinung des farbigen Schattens tritt aber nur bei weniger starken Lichtintensitäten auf. Wird die weiße Beleuchtung zu intensiv, so macht das Auge die Farbverschiebung rückgängig und der farbige Schatten verschwindet wieder. Physikalisch ist der farbige Schatten nicht messbar. Aber man kann ihn mit einer digitalen Kamera, die den Weißabgleich unseres Auges imitiert, fotografieren.

1 Vgl. Anatol Julian Kallmann: *Farbkonstanz und Farbkontrast. Eine Untersuchung mit Hilfe der farbigen Schatten.* Mainz 2003, S. 1 – 3.
Vgl. G. A. Agoston: *Color Theory and its Application in Art and Design.* Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo 1987, S. 203.
Vgl. Eckhart Seiffert: *Das Phänomen Farbiger Schatten nach Otto von Guericke.* Köthen 2002, S. 12.
2 Vgl. Kallmann, *Farbkonstanz und Farbkontrast*, a.a.O., S. 175.

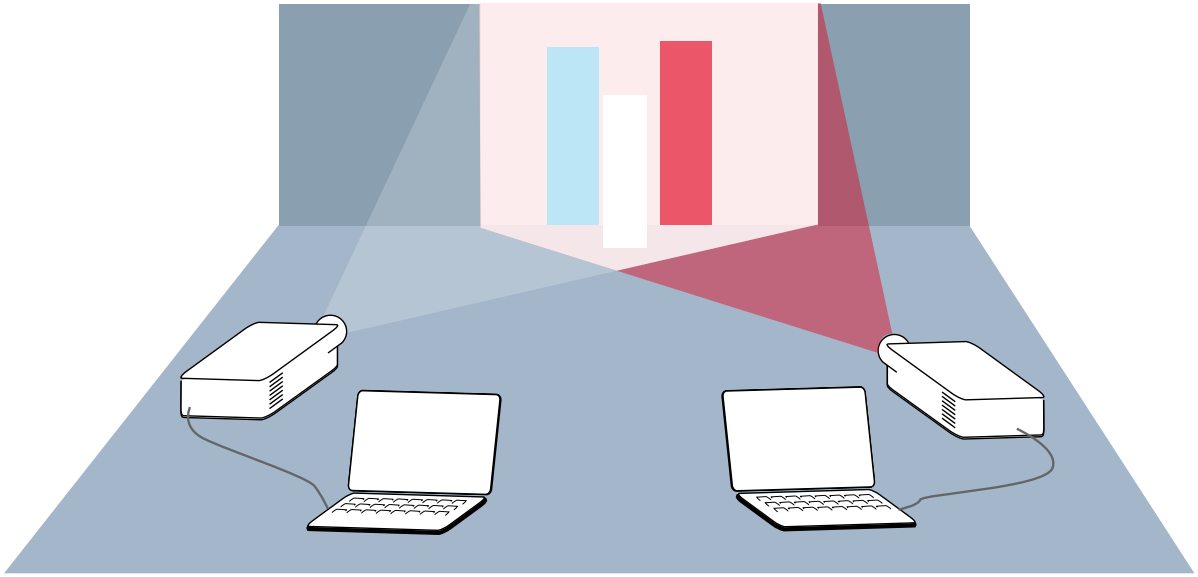


Abb. Aufbau der Installation Schattenfarben.
– Beamer links: Weisses Licht
– Beamer rechts: Rotes Licht
– Farbiger Schatten links: Cyanfarben
– Gefärbter Schatten rechts: Rot

INDEX

Abbildungsfehler K45 K62
Abbildungsmaßstab K25
Aberration, chromatische K45
Aberration, sphärische K25
Absorption K01 K05 K09 K13 K22
K43 K46 K47 K52
Absorptionsspektrum **K46** K47
Acrylfarbe K13 K14
Adaptation **K59**
Adaptation, chromatische K59 K70
Adaptation, lokale farbige K58
Akkommodation **K63**
Amakrin-Zellen K61
Aquarell-Farbe K14
Assimilation K65 **K69**
Auflösung K45 K50 K62
Auflösungsvermögen K44
Auge K01 K05 K09 K41 **K43**
K44 K55 K59 K60 K62
K63 K66 K68
Auge, menschliches K31 K34 **K45**
Augenbewegungen, sakkadische K45 K62 **K64**
Augentypen K21 **K44**
Ausgangsfarben K02 K03 K04 K06 K12
K36
Ausgangsfarben, virtuelle K03
Beamer **K32** K55
Beleuchtung K03 K08
Beleuchtungslicht K08 K09 K59
Beleuchtungsstärke K35
Belichtung K35
Berliner Blau K13
Beugung K17
Bezold spreading effect K69
Bezold, Wilhelm von K69
Bezugslichtquelle K35
Bild, virtuelles K24 K25
Bildpunkt K25
Bildraum K25
Bildschirm K02 K03 K04 K10 **K31**
K33 K55
Bildverarbeitung K38
Bindemittel K13 **K14**
Biolumineszenz K10
Bipolare K61
Blasenauge K44
Blinder Fleck K60
Braunsche Röhre K31
Brechung **K19** K21 K50
Brechungsindex K19 K23
Brennpunkt K25 K45 K62 K63
Buntart K01 K07
Buntgrad K07
Buntton K06
Candela K35
Carotinoide K13
Chevreul, Michel Eugene K69
Chlorophyll K13
Chrominanz K31
CIE K03 K55
CIE (x, y, Y) CIEILLD$_{65}$ K03
CIE-Diagramm K03 K70
CIE-Farbraum K03
CIE-Farbtafel **K03**
Ciliarmuskeln K63
CMY K06
Cyan K06
Cyan, Magenta, (Zitronen-)Gelb K06 K12
CMYK /
Cyan, Magenta, Gelb, Schwarz K05 K12 **K30**
Deuteranop K57
Dichroidfilter K20 K21 **K23**
Diode K33
Dispersion **K26**
DLP-Beamer K32
Drei-Farben-Theorie K02 **K55** K56
Dunkelstrom K53
Eigenfarbe K22
Eigenhelle K07
Eigenschatten K28
Einstein, Albert K16
Emission K09
Erdfarbenpigmente K13
Erscheinungsfarben **K08** K40
Euklid K24
Farbanpassung K59
Farbbahn K39
Farbdruck **K30**
Farbe(n) **K01** K03 K04 K07 **K09**
K12 K20 K23 K26 K36
K55 K68 K69
– bunte K06
– gebrochene K07
– getrübte K07
– kalte K06
– prismatische K26
– reinbunte K06 K07
– unbunte K06 K07
– warme K06

Farbeindruck K36 K54 K66
Farbempfindung K01
Farbenart K03 K07
Farbenblindheit K37 **K57**
Farbensehen **K36** K47 K55 K57
Farbfilter K05 K22
Farbinduktion K68
Farbinformation K50
Farbkonstanz K08 K28 **K40** K70
Farbkontraste K64 K65 K66
Farbkörper K03
Farbmetrik **K02** K04
Farbmischung, additive K02 K03 **K04** K10 K12
K22 K26 K31 K36 K50
K55 K58 K66
Farbmischung, eigentliche additive K04
Farbmischung, optische K65
Farbmischung, optisch partitive **K66** K68
Farbmischung, subtraktive K04 **K05** K12 K22
Farbmisch., uneigentliche additive K04
Farbmittel K13
Farbort K03
Farbreiz K01 K02 K39 K55 K58
Farbsättigung K03
Farbstärke K13
Farbstoffe **K15**
Farbtemperatur K03 **K11** K34 K40
Farbton/Farbtöne K01 K03 K04 **K07** K08
K40 K55
Farbunterscheidungsmerkmale **K06** **K07**
Farbvalenz K01 K02 K03
Farbverarbeitung **K39**
Farbwahrnehmung K36 K51 K56
Farbwert K02
Farbwiedergabe K35
Farbwirkung K01
Feld(er), rezeptive(s) K37 K39 K61 **K65** K66
K67
Filter K21 **K22** K34 K45
Fluoreszenz K10
Fluoreszenz-Farbstoff K31
Flüssigkristall-Bildschirm K31
Fotografie/Fotografieren K22 K34 K35 K40
Fotografie, digitale K31 K40
Fovea K62
Ganglienzellen K37 K61
Gegenfarbe K06
Gegenstandspunkt K25
Gegenstandsraum K25
Gelber Fleck K60
Glühlampenlicht K11
Goethe K01
Grau K06 K12
Grubenauge K44
Halbschatten K28
Hell-Dunkel-Adaptation K59
Hell-Dunkel-Eindruck K47
Hell-Dunkel-Kontraste K64 K65
Helligkeit K01 K03 K07
Helligkeitsanpassung K59
Helligkeitskonstanz K28
Helmholtz, Hermann von K55
Hemmung, seitliche (laterale) K67
Hering, Ewald K56 K65
Horizontal-Zellen K61
Hornhaut K45
Indigo K15
Infrarot K26
Infrarote Strahlung/
Infrarotstrahlung K17 K41
Interferenz K17 K20 K23
Interferenzfarben **K20**
Kältepol K06
Kantenspektren **K27**
Kaseinfarbe K14
Kelvin K03 K11
Kernschatten K28
Kerzenflamme K11
Keycolor K05 K12
Kniehöcker, seitlicher K38 K39
Komplementärfarbe K03 K06 K07 K22 K23
K58 K68 K70
Komplexauge K44
Kontrastverstärkung K60 K65 **K67**
Kontrastwahrnehmung K65
Konvexlinse K25
Körperfarben K12
Körperschatten K28
Kunstlicht K40
Kunstlichtfilm K11 K34
Land, Edwin K40
LCD-Beamer K32
LCD-Bildschirm K31
Le Blon, Jakob Christoph K30
LED **K33**
Leuchtdichte K35
Leuchten, «kaltes» K33
Leuchtphosphor K10 K31 K55
Licht K01 K04 K05 K09 K10
K12 K13 **K16** K17 K18
K21 K22 K23 K24 K28
K32 K41 K43 K47 K48
K55 K66
– farbiges K02 K03 K04 K12 K66
– sichtbares K41 K54

– ultraviolettes K10 K18 K41 K45
– weißes K03 K04 K05 K12 K26
K46 K58
Lichtabsorption K36
Lichtausbeute K35
Lichtelektrischer Effekt K16 K18
Lichtempfindlichkeit K44 K51 K52
Lichtgeschwindigkeit K16 K19 K23
Lichtmenge K35 K48
Lichtmischung K06
Lichtquanten K16
Lichtquantenhypothese K18
Lichtquelle K01 K26 K28 K34 K35
K40 K70
Lichtreaktion **K52**
Lichtreiz K47
Lichtsignal **K53**
Lichtsinn **K42**
Lichtsinnenzellen, menschliche **K48** K52 K65
Lichtsinneszelle(n) K01 K03 K36 K38 K40
K43 K44 **K47** K50 K52
K53 K55 K58 K59 K60
K61 K65
Lichtsinneszelltypen K36 K55
Lichtstärke K35
Lichtstrahl(en) K23 K24 K26 K29 K32
K45 K63
Lichtstrahlung K11
Lichtstreuung **K29**
Lichtstrom K35
Lichtteilchen K09 K16 K18 K24 K33
K41 K43 K47 K49 K53
Lichtwelle(n) K02 K03 K04 K20 K21
K22
Lichtwellenlänge K13 K46 K47 K52
Linse K26 K32 K45 K50 K62
K63
Linsenauge K44 K45
Livingstone, Margaret K37 K39
Lumen K35
Luminanz K31
Lumineszenz **K10**
Lux K35
Magenta K06 K26 K27
Malfarbe K13 K14
Malus, E. L. K21
Mattscheibe K29
Mineralpigmente K13
Nachbilder, komplementäre K52 K56 **K58**
Nachtsehen K36 K48 K49 K57
Nanometer K41
Netzhaut K36 K38 K39 K41 K45
K47 K48 K50 K55 K56
K60 K61 K62 K63 K65
K66 K67 K69 K70
Netzhautaufbau **K61**
Netzhautbild K37 K45
Newton K01 K26 K55
Normlichtquelle K03
Oberfläche K01 K09 K12 K49
Ocker K13
Offset-Druck K30
Ölfarbe K13 K14
Optik K16 K19 K21 K32 K45
K63
Optik, geometrische **K24**
Pflanzenfarbstoffe K13
Photonen K16 K41 K51
Photopigmente K36 K51
Photorezeptoren K47
Phototaxis K42
Phototropismus K42
Physikalische Werte und Einheiten **K35**
Pigment(e) K05 **K13** K14 K15 K22
K47 K48 K50
künstliche K13
natürliche K13
synthetische K13
Pigmentschicht K60 K61
Planck, Max K16
Pointillismuns K66
Polarisation **K21** K22 K23
Polarisationsfilter K22
Polarisations-Sehen K44
Primärfarben K06 K56
Prisma K01 K04 K21 K24 K25
K26 K27 K32 K46
Protanop K57
Purkinje, Johannes Evangelista K54
Purkinje-Phänomen K49 **K54**
Purpurfarben K03
Purpur-Farbtöne K26
Purpurgerade K03
Pyrometrie K11
Quantentheorie K18
Reflexion K01 K09 K13 K66
Regenbogen K26
Regenbogen-Farben K01
RGB K06 **K31** K56
RGB-Farbraum K02 K36 K55
Rhodopsin/Sehfarbstoff K49 K50 K52 K64
Röhrenbildschirm K31
Röntgenstrahlung K17
Rot, Grün, Blau K02 K03 K04 K06 K32
K36

Rot-, Grün-, Blau-Zapfen K50
Rot-Grün-Blindheit K57
Sammellinse K24 **K25**
Sättigung K01 K03 K07 K68
Schärfentiefe K25
Schatten **K28**
Schatten, farbige **K70**
Schatten, gefärbte **K70**
Schlagschatten K28
Schwarz K05 K06 K12 K49 K54
K69
Schwarzpunkt K03
Sehachse K45 K50 K62
Sehbahn K37 **K38** K65
Sehen, scharfes K50
Sehgrube K03 K38 K45 K49 K50
K51 K60 K61 **K62** K63
K64 K65
Sehnerv K01 K37 K38 K39 K48
K60 K61
Sehnerven-Kreuzung K38
Sehnervenzellen K65
Sehpigmente K57 K58
Seifenblasen K20
Sekundärfarben K06
Simultankontrast K65 **K68** K69 K70
Skylight-Filter K22
Sonnenlicht K01 K11 K20 K25 K26
K29 K45
Sonnenspektrum K22
Spektralfarben K03 K04 K20 K22 K26
K46
Spektralfarbenzug K03
Spektral-Photometrie K46
Spektrum K02 K04 K09 K12 K17
K20 K22 K26 K41
Spektrum, diskontinuierliches K26
Spektrum, kontinuierliches K26
Spiegel K23 K32
Spiegel, dichroitische K32
Spiegelbild K24
Spiegelung K22
Stäbchen K48 **K49** K51 K54 K62
Stäbchen-Pigmente K48
Stäbchensystem K51
Streuung K21
Substanzfarbe(n) K08 **K12** K35
Substanzmischungen K06
subtraktive Farbmischung K04 **K05** K12 K22
Sukzessiv-Kontrast K69
System Farbdimensionen K07
Tageslicht K03
Tageslichtfilm K11 K34
Tagessehen K36 K48 K50 K51 K54
K57 K60 K62
Täuschung, optische K60 K65 K67 K70
Teilchen-Modell **K18**
Terra di Siena K13
Tonwerte K07
Topographie der Netzhaut K38
Transmissionsspektrum K46
Tritanop K57
Trübung K07
Ultraviolett K26
Ultraviolett-Strahlung K17 K22
Umbra K13
Unbuntpunkt K03
UV-Sehen K44
Vierfarbdrucker K03
Vierfarbendruck K05 K12 K66
Vierfarbendruckverfahren K30
Vier-Farben-Theorie **K56** K65
Wahrnehmung, visuelle **K37** K64 K67
Wald, Georg K55
Wärmepol K06
Weiß K06
Weißabgleich **K34** K40 K59 K70
Weißpunkt K40 K70
Welle(n), elektromagnetische K16 **K17** K41
Wellenlänge K09
Wellenlängenbereich K42
Wellen-Modell K16 **K17** K18 K19
Wellenspektrum,
elektromagnetisches K16 K41
What-System K37 K39
Where-System K37
White-balance K34
X, Y, Z K03
Young, Thomas K55
Young-Helmholtz-Theorie K55
Zapfen K36 K39 K45 K48 **K50**
K51 K54 K56 K57 K62
Zapfen-Pigmente K48
Zapfensystem K51
Zellen, lichtempfindliche K43 K44
Zinnober K06
Zonulafasern K63

BILDQUELLEN

K03 Abb. 1 bis **Abb. 7**
Vgl. *http://www.daicolor.co.jp/english/color_e/color_e01.html*

K16 Abb. 3
Vgl. Jost J. Marchesi: *Handbuch der Fotografie*. Band 1: *Geschichte, Chemisch-physikalische und optische Grundlagen*. Schaffhausen 1993, S. 126

K17 Abb. 1
Vgl. *www.vs-c.de*

K18 Abb. 1
Vgl. Joachim Grehn (Hg.): *Metzler Physik,* 2. Auflage. Stuttgart 1989, S. 359, Abb. 9 – 1

K19 Abb. 2
Vgl. Ekbert Hering, Rolf Martin, Martin Stohrer: *Physik für Ingenieure,* 6. Auflage. Berlin, Heidelberg 1997, S. 410, Bild 6-15.

K24 Abb. 1
Vgl. Ekbert Hering, Rolf Martin, Martin Stohrer: *Physik für Ingenieure,* 6. Auflage. Berlin, Heidelberg 1997, S. 410, Bild 6.

K24 Abb. 3a und **Abb. 3b**
Vgl. Ekbert Hering, Rolf Martin, Martin Stohrer: *Physik für Ingenieure,* 6. Auflage. Berlin, Heidelberg 1997, S. 410, Bild 6 – 3.

K25 Abb 1
Vgl. Jost J. Marchesi: *Handbuch der Fotografie*. Band 1: *Geschichte, Chemisch-physikalische und optische Grundlagen*. Schaffhausen 1993, S. 156

K25 Abb 2
Vgl. Jost J. Marchesi: *Handbuch der Fotografie*. Band 1: *Geschichte, Chemisch-physikalische und optische Grundlagen*. Schaffhausen 1993, S. 158

K28 Abb 4
Vgl. Mario Bollin: *Zeichnen: Grundlagen im Vorkurs an der Schule für Gestaltung Basel*. Basel 1995, Der Schlagschatten, Darstellungen

K32 Abb 2
Vgl. http//www.chip.de

K32 Abb 3
Vgl. http//www.chip.de

K33 Abb. 3a
Vgl. Friedrich Dorn, Franz Bader: *Physik Mittelstufe,* Hannover 1980. S. 358, 358.2 und 358.3

K33 Abb. 3b
Vgl. Friedrich Dorn, Franz Bader: *Physik Mittelstufe,* Hannover 1980. S. 358, 358.1

K37 Abb 2
Vgl. Margaret Livingstone: *Vision and Art. The Biology of Seeing*. New York 2002, S. 51

K39 Abb 1
Vgl. Margaret Livingstone: *Vision and Art. The Biology of Seeing*. New York 2002, S. 51

K41 Abb 1
Siehe K16 Abb. 3

K46 Abb 1
Vgl. Werner Schmidt: *Biophysik des Farbensehens*. Konstanz 1999,
S. 37, Abb. 12

K50 Abb. 3
Vgl. Richard Gregory*: Auge und Gehirn. Psychologie des Sehens*. Hamburg 2001, Tafel IX

K51 Abb. 3
Vgl. N. Welsch, C. Liebmann: *Farbe*. Heidelberg 2003, S. 251, 3 – 31

K53 Abb. 1
Vgl. N. Welsch, C. Liebmann: *Farbe*. Heidelberg 2003, S. 245, 3 – 25 und 3 – 26

K54 Abb. 1
Vgl. Richard Gregory*: Auge und Gehirn. Psychologie des Sehens*. Hamburg 2001, Tafel VI

K55 Abb. 1
Siehe K50 Abb. 3

K60 Abb. 3
Vgl. N. Welsch, C. Liebmann: *Farbe*. Heidelberg 2003, S. 251, 3-31 und 3 – 32

K62 Abb. 3
Vgl. Margaret Livingstone: *Vision and Art. The Biology of Seeing*. New York 2002, S. 70

K64 Abb. 1
Vgl. Richard Gregory*: Auge und Gehirn. Psychologie des Sehens*. Hamburg 2001, S. 66, 3.15

K67 Abb. 1
Vgl. Margaret Livingstone: *Vision and Art. The Biology of Seeing*. New York 2002, S. 58

K67 Abb. 2
Vgl. Margaret Livingstone: *Vision and Art. The Biology of Seeing*. New York 2002, S. 57

K67 Abb. 3
Vgl. Margaret Livingstone: *Vision and Art. The Biology of Seeing*. New York 2002, Buchdeckel Innenseite