

# Physiologische Grundlagen

## Von der Aufnahme zur Verarbeitung der visuellen Information

### Der Aufbau des menschlichen Sehsystems: Das Auge

Schon Leonardo da Vinci forschte am menschlichen Auge und wollte wissen, wie wir sehen. Der spanische Mediziner Santiago Ramón y Cajal beschrieb 1894 als Erster den Aufbau des Auges und erhielt dafür den Nobelpreis: Das in das Auge einfallende Licht wird durch die Pupille wie bei einer Fotoblende gebündelt und durch die sich dahinter befindende Linse gebrochen. Licht, die für uns sichtbare elektromagnetische Strahlung, kann als Lichtwellen oder Lichtteilchen (Photonen) beschrieben werden; diese fallen auf die Retina (Netzhaut), wo sie bei den Photorezeptoren (Sehzellen) einen Reiz auslösen. Diese Photorezeptoren sind auf der Retina extrem dicht angesiedelt: etwa 400 000 Sehzellen pro Quadratmillimeter. Wir besitzen zwei Typen von Photorezeptoren, sie werden nach ihrer Bauform Stäbchen und Zapfen genannt. Diese hochspezialisierten Nervenzellen absorbieren die Photonen und wandeln sie in ein elektrisches Signal (Code) um.

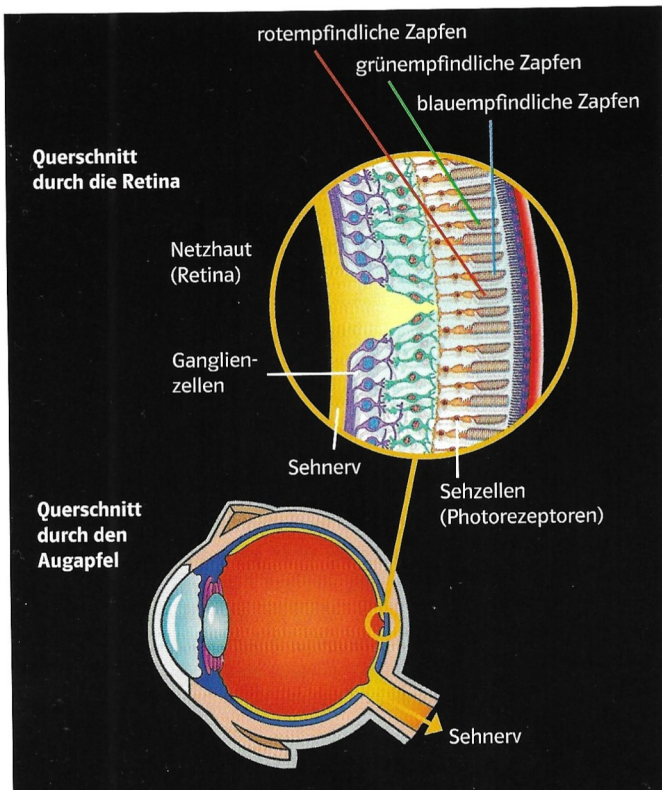
### Die Stäbchen

Die Stäbchen reagieren aktiv und hoch empfindlich auf eintreffende Photonen (Lichtteilchen), so dass wir auch bei schwachem Licht noch Gegenstände um uns herum sehen können (Dämmerungssehen). Rhodopsin heißt der lichtsensible Farbstoff (Sehpigment) in den Stäbchen, der besonders empfindlich auf Lichtreize im Wellenlängenbereich um 500 nm reagiert (Blau-Grün-Spektrum). Dennoch geben die Stäbchen nur einen Lichtimpuls weiter und keine Farbinformation. In jedem Auge befinden sich etwa 120 Millionen dieser Sehzellen.

### Die Zapfen und die Drei-Farben-Theorie

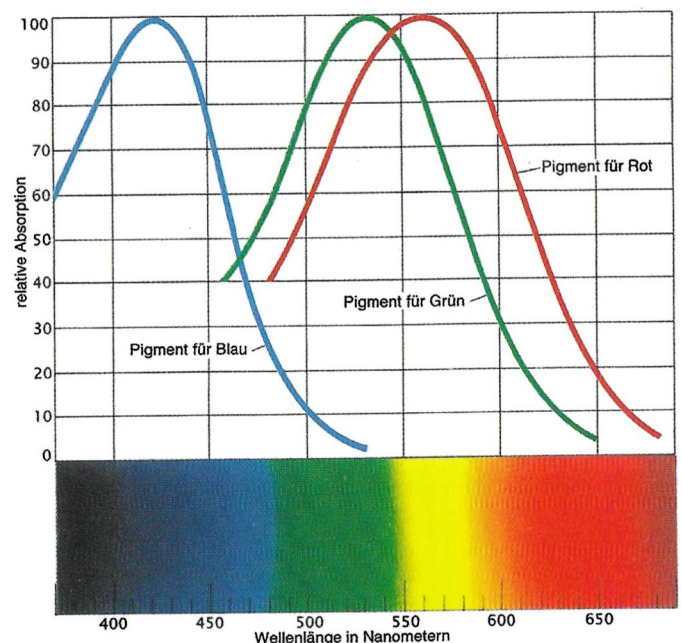
Während bei normalem Tageslicht die Stäbchen keine Informationen weitergeben, da sie „gesättigt“ und damit inaktiv sind, reagieren nun die Zapfen. Sie sind wenig lichtempfindlich, aber Licht ist ja am Tage genügend da. Sind die Lichtverhältnisse dagegen schlecht, sehen wir die Dinge und damit die Farben entsprechend undeutlich; es fehlen die Lichtreize für die Zapfen. Die Retina besitzt deutlich weniger Zapfen als Stäbchen: Etwa sechs Millionen Zapfen gegenüber 120 Millionen Stäbchen. Die Sehpigmente<sup>1</sup> (Chromoproteine) in den Zapfen sind weitgehend erforscht: Je nach Wellenlänge der Lichtreize reagieren verschiedene *Opsine*. Sie geben den Proteinanteil im Sehpigment an: *Porphyropsin* ist ein roter Farbstoff, *Iodopsin* ein grüner und *Cyanopsin* der blaue. Die unterschiedlich empfindlichen *Opsine* nehmen also je nach Wellenlängenempfindlichkeit die entsprechenden Lichtwellen auf, absorbieren sie in einem bio-chemischen Prozess und verwandeln diese Information in einen elektrischen Impuls um. Mit anderen Worten: Die drei unterschiedlichen Zapfentypen sorgen für eine Unterscheidung der verschiedenen Farbeindrücke. Sie reagieren entweder auf lange, mittlere oder kurze Wellenlängen, entsprechend werden sie L-, M- und S-Zapfen genannt (engl. für long, middle und short). Zum Glück überlappen sich die Absorptionsspektren der Zapfentypen, denn sonst würden wir ja nur die drei biologischen/physiologischen Grundfarben Rot, Grün und Blau sehen. So aber kann das menschliche Auge über mehrere Millionen Farbtönen wahrnehmen.

<sup>1</sup> lichtempfindlicher Farbstoff, besteht aus Protein und Chromophor (griech. = Farbräger)



**18.1** Querschnitt durch den Augapfel und Detail der Retina mit Sehnerv, Ganglienzellen und Sehzellen (Schema).

### Die drei biologischen/physiologischen Grundfarben



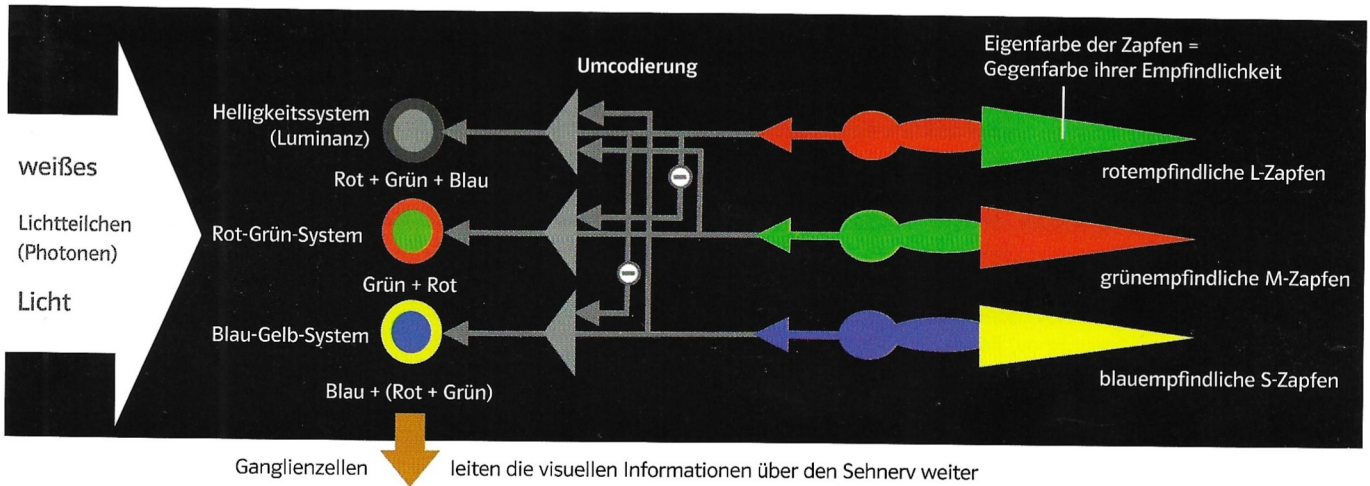
**18.2** Schema: Die Kurven zeigen die maximale Empfindlichkeit der L-, M- und S-Zapfen.

## Sehen – ein aktiver Prozess

Wegen seiner Rot-, Grün- und Blauempfindlichkeit sprechen wir beim Menschen von einem trichromatischen Farbsehen. Äußerlich zeigen die Zapfen in etwa ihre Gegenfarbe, da ihr jeweiliges *Opsin* die Wellenlängen, auf die sie am besten reagieren, absorbiert. Trotz der etablierten Bezeichnung als rot-, grün- und blauempfindliche Zapfen muss angemerkt werden, dass alle drei Zapfentypen über einen größeren Wellenlängenbereich hinweg reagieren: Das Pigment der Rotzapfen hat seine höchste Empfindlichkeit in einem Bereich, den wir eher als Gelb wahrnehmen, und das Maximum der Empfindlichkeit bei den Blauzapfen liegt eher im blau-violetten Bereich um 435 nm (Bild 18.2).

Die Verarbeitung der Lichtreize in der Retina führt dazu, dass die eingehenden Farbinformationen bei den Rot-, Grün- und Blauzapfen in die Gegenfarbkanäle Rot-Grün, Blau-Gelb und Hell-Dunkel umcodiert werden. In einer Art Schlüsselprozess sorgen die synaptischen Kontakte<sup>1</sup> zwischen weiteren Zellen für eine Datenreduktion und vor allem für eine Kontrastverstärkung. Dies erleichtert die Weitergabe dieser hochkomplexen Informationen an die nächsten Verarbeitungsstufen im Gehirn.

<sup>1</sup> Synapse (von griech. *syn* = zusammen und *haptain* = greifen, fassen, tasten): Verknüpfung zwischen zwei (Nerven)zellen (Neuron = Nervenzelle). Sie sorgt für eine Signalübertragung, kann aber auch einen steuernden Einfluss auf die Informationen haben.



19.1 Verschaltung der Zapfen in der Retina

## Farbe ist eine Empfindung: Nachbilder

Versuch (Bild 19.2): Sorgen Sie für eine sehr helle Beleuchtung. Blicken Sie nun, indem Sie den Kopf nah heranführen, für ca. 30 Sekunden genau auf den weißen Punkt in der Mitte des linken Bildfeldes. Schauen Sie dann sofort auf die rechte weiße Fläche. Welche Farbe sehen Sie? Es wird die Gegenfarbe zur Ausgangsfarbe zu sehen sein. Bleiben die Augen noch eine Weile auf die weiße Fläche fixiert, bleibt auch die Gegenfarbe noch für einige Zeit sichtbar. Was ist geschehen? Die Photonen der Wellenlänge Rot (hier Magenta) lösen bei den auf sie empfindlich reagierenden Zapfen (Porphyropsine) einen

chemischen Prozess aus. Die Photonen werden absorbiert, sie zerfallen und die Zapfen sind „gesättigt“; sie sind für eine gewisse Zeit inaktiv, sie ermüden. Schauen wir sofort danach auf eine weiße Fläche, werden nun die bis jetzt nicht gereizten Grün- und Blauzapfen aktiv. Wir sehen durch deren Erregung die Komplementärfarbe zu Rot/Magenta: (Blau)grün = Cyan.

Dieser Versuch mit dem Nachbild demonstriert die Reaktionsweise unserer Photorezeptoren: Nachbilder entstehen durch den Verbrauch von *Opsin* (s. S. 33, Sukzessiv-Kontrast, nach Ewald Hering, 1878).



## Gehirn sieht Farbe

### Die Sehbahn – Vom Auge bis ins Sehzentrum

Nach dem komplexen Vorgang, der mit der Reizaufnahme durch die Photorezeptoren und der ersten Umcodierung in der Retina beginnt, setzt sich die Farbverarbeitung fort über die Reizübermittlung, geleistet durch den Sehnerv. Über ihn gelangen die elektrischen Signale eines jeden Auges in das Zwischenhirn, wo sie sich im *Chiasma opticum* überkreuzen. In dieser Sehnerv-Kreuzung werden die Sehnerven beider Augen, also das Sehen des linken und des rechten Auges, zusammengeführt. Jetzt, zu einem Sehstrang gebündelt, werden die Signale zu den beiden weiter hinten und außen liegenden, sogenannten Kniehöckern weitergegeben. Sie funktionieren wie zwei kleine Relaisstationen, die Signale aufnehmen, verbinden und verstärken. Die Kniehöcker gehören zur Struktur des Thalamus, der Informationsverarbeitungszentrale und größtem Teil des Zwischenhirns. Von hier treten die Signale, weit verstreut (Sehstrahlung), in die Großhirnrinde ein. Dort, am hinteren Ende, bilden sie schließlich das Sehzentrum, den *visuellen Cortex*.

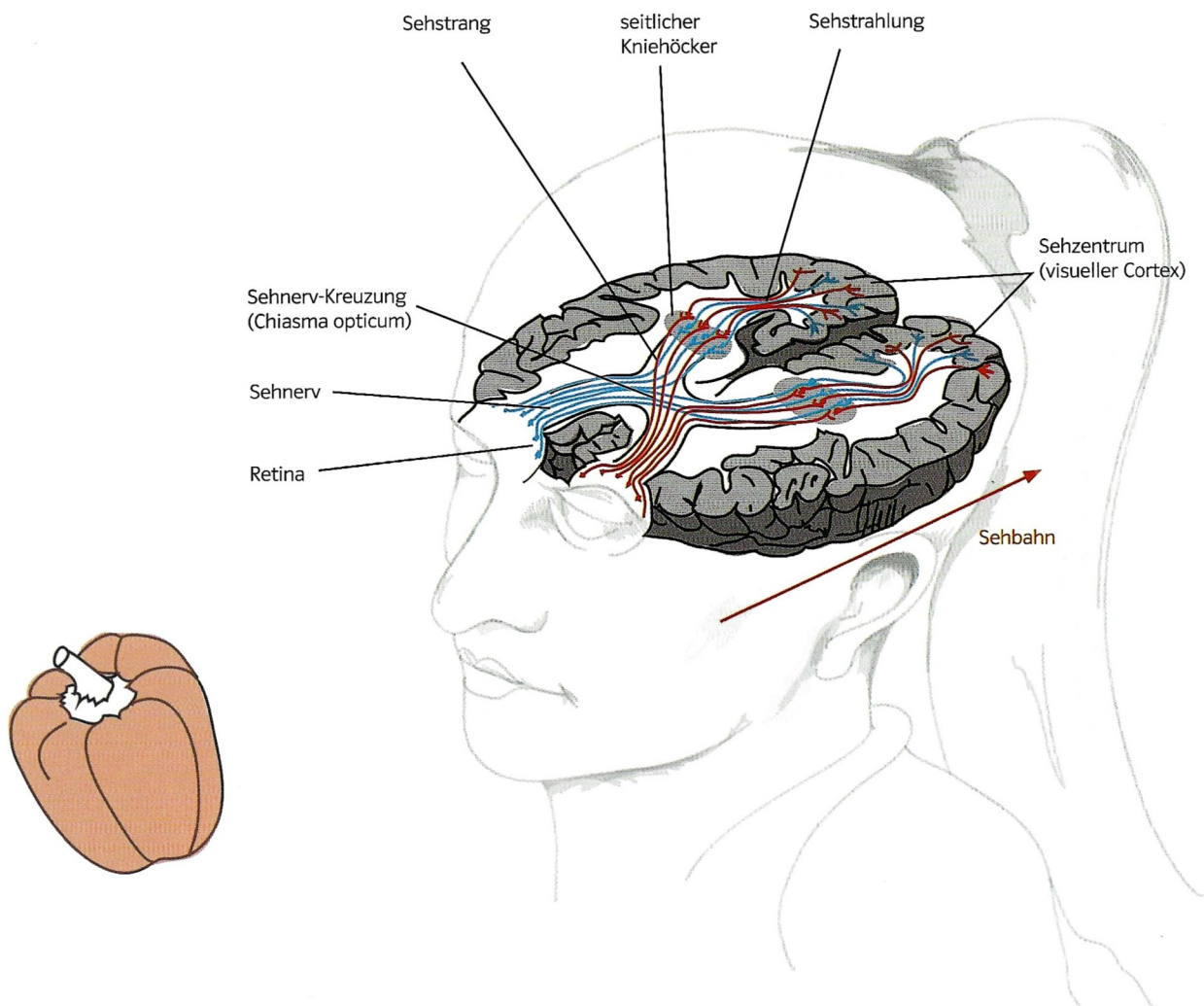
Hier werden alle eintreffenden Informationen, die der „Sehapparat Auge“ liefert, entschlüsselt. Erst im Sehzentrum können

wir uns ein farbiges Bild von der Welt machen, den Dingen eine Bedeutung geben. Farbe ist, so gesehen, ein fester integraler Bestandteil des ganzen Sehvorgangs: Wir sehen immer in Farbe – die aber erst im Gehirn interpretiert wird.

Sehen, und damit Farben sehen, ist kein mechanischer und linearer Vorgang, sondern ein aktiver und kreativer Umformungsprozess, bei dem das Wahrgenommene gedeutet wird. Der Sehvorgang beginnt zwar im Auge, aber eigentlich sehen wir mit dem Gehirn.

Neben der hier beschriebenen *Sehbahn*, der Nervenverbindung vom Auge bis in das Sehzentrum des Gehirns, gibt es noch weitere, die visuelle Wahrnehmung steuernde Verbindungen. Die Neurowissenschaft nimmt heute an, dass ungefähr die Hälfte des menschlichen Gehirns der Verarbeitung visueller Informationen dient und damit an der Bildentstehung in unserem Kopf beteiligt ist: Der Mensch ist ein „Augentier“.

Für die Evolution bedeutete dies, einen Sinn zu entwickeln, der optimal die visuellen Umgebungsreize aufnehmen und verarbeiten kann, um die Interaktion mit der Umwelt effizient zu steuern. Zum Beispiel soll die Rot-Grün-Unterscheidung, mit der die Primaten reife Früchte vor grünen Blättern schnell erkennen, in der Evolution einen entscheidenden Vorteil bedeutet haben.



20.1 Die Sehbahn: Von der Reizaufnahme in der Netzhaut bis zum Sehzentrum (horizontaler Schnitt durch das menschliche Gehirn)

## Körperfarbe und Beleuchtungslicht

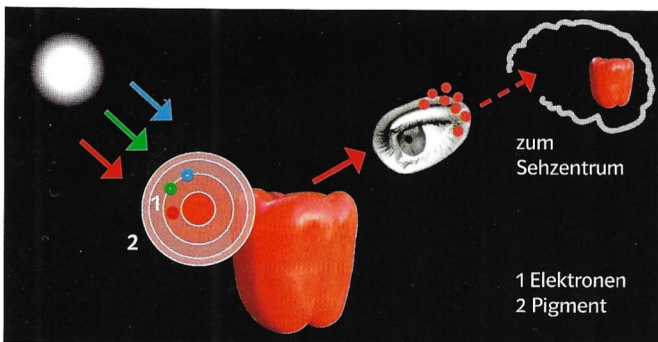
### Körperfarbe = Gegenstandsfarbe

Alle Dinge um uns herum nehmen wir in der Farbe ihrer Oberfläche wahr: das grüne Blatt, die blaue Blume und das rote Haar. Seit Jahrtausenden sind wir Menschen daran gewöhnt, dass wir alle Körper unter dem Sonnenlicht in ihrer „normalen“ Farbe sehen. Ausgehend von einem strahlend hellen Sonnenlicht sprechen wir von einem weißen Licht, gemessen mit einer Farbtemperatur von etwa 5500 Kelvin<sup>1</sup>.

Diese Pigmentierung eines jeden Körpers, die Körper- oder Gegenstandsfarbe, hat der Mensch unter dem (weißen) Sonnenlicht erlernt und vergleicht unbewusst jede Farb-Körper-Erscheinung mit dieser „gelernten Körperfarbe“. Wie in der Fotografie machen auch wir immer einen *Weißabgleich*, d.h. unser Gehirn vergleicht die Farbwahrnehmung mit der erinnerten Objektfarbe und gleicht diesen Unterschied so aus, dass wir ihn kaum bemerken und alles im Gleichgewicht ist. Ist der Unterschied zu groß und offensichtlich, empfinden wir die gerade wahrgenommene Farbe als „unnatürlich“ und „falsch“.

Einen weiteren Einfluss auf die Farbwirkung eines Gegenstandes hat auch seine Oberflächenbeschaffenheit: Ist sie glänzend, stumpf oder rau? Gibt es einen deutlichen Wechsel von Licht und Schatten?

### Licht trifft auf Pigment



21.1 Licht trifft auf Pigment.

Eine Lichtquelle, in der Regel die Sonne, sendet elektromagnetische Wellen aus. Die Körperfarbe reflektiert einen Teil der Lichtwellen, sie treffen in das menschliche Auge und lösen im Sehzentrum einen bestimmten Farbeindruck aus.

Z.B. reflektiert eine reife Paprikaschote hauptsächlich elektromagnetische Wellen im langwelligen Bereich (= Rot), wobei sie die mittel- und kurzwelligen Wellen (Grün, Blau) absorbiert (Bild 21.1). Anders gesagt: Die roten Substanzen des Paprika bestehen aus Atomen bzw. Molekülen. Treffen die kurz- und mittellangwelligen blauen und grünen Strahlen auf rote Substanzen, werden diese angeregt und absorbieren die blauen und grünen Wellen. Die langwellig roten Strahlen können mit ihrer Energie die roten Substanzen dagegen nicht anregen und werden deshalb zurückgeworfen. Wegen dieser reflektierten roten Farbstrahlen erscheint der Körper der Paprikaschote rot. Es werden nur unsere rotempfindlichen Zapfen in der Retina gereizt: Wir sehen Rot.

Wird dagegen der Paprika mit grünem Licht beleuchtet, erscheint er uns als fast schwarz. Denn jetzt werden die grünen Lichtwellen vollständig absorbiert. Andere Lichtwellen (Blau, Gelb, etc.) ergeben entsprechend jeweils eine andere Farbe, die vom Paprika reflektiert wird.

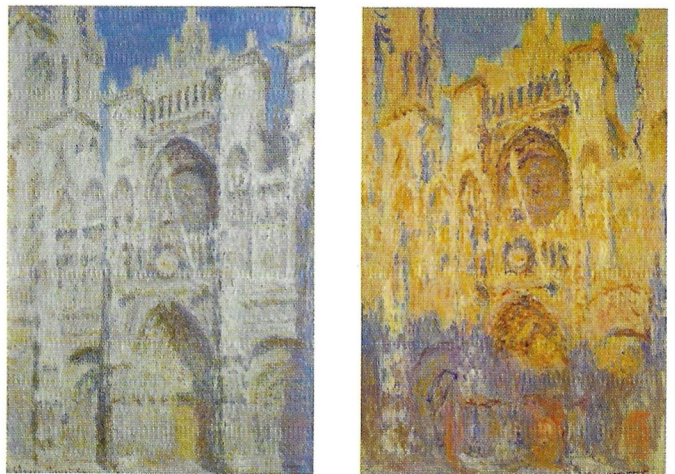
### Veränderte Körperfarbe / Gegenstandsfarbe

So scheinen sich die Körper in ihrer Substanz zu ändern, sobald die Farbe des Lichts sich ändert. Die Erklärung für dieses Phänomen? Die Farbe eines Gegenstandes (Körperfarbe) ist abhängig von dem ihn beleuchtenden Licht (Bilder 21.2–4). Er kann nur die Farbe haben, die auch im Spektrum des Beleuchtungslichts enthalten ist – Farbe ist reflektiertes Licht und somit ist die Wahrnehmung einer Gegenstandsfarbe abhängig vom Beleuchtungslicht.



21.2 In Diskotheken wird der Effekt der veränderten Körper- oder Gegenstandsfarbe gezielt eingesetzt: Farbige Licht verändert die Farbwahrnehmung von bisher gewohnten Dingen wie Haut-, Haar- und Kleiderfarbe und löst so ungewohnte Farbeindrücke aus.

Das Phänomen der veränderten Farbe eines Körpers wird auf sehr verschiedene Weise eingesetzt: An der Wursttheke wird gerne Licht mit einem hohen Rotanteil verwendet, damit die Wurst- und Fleischwaren nicht so schnell „vergrauen“, intensiver rot leuchten und damit frisch erscheinen. Räume und Gegenstände unter einer Glühbirne erscheinen „wärmer“, da das Licht mehr Anteile an langwelligen Strahlen hat. Leuchtstoffröhren haben dagegen einen höheren Blau-Grün-Anteil und lassen alle Dinge „kühl“ aussehen. Allein diese wenigen Vergleiche zeigen schon, wie relativ Farbe für unseren Farbeindruck ist, aber auch, wie die Wahrnehmung von Farbe unser subjektives Empfinden steuern kann (s. S. 14).



21.3–4 Claude Monet hat zwischen 1892 und 1894 in einer Serie von 33 Gemälden gezeigt, wie das (farbige) Licht die Körperfarbe der Fassade der Kathedrale von Rouen veränderte. Je nach Tageszeit und Witterung variierte das reflektierte Licht in der Wahrnehmung des Malers. Monet studierte diese Veränderung des Lichts unter verschiedenen atmosphärischen Bedingungen: Er erkannte, dass Körperfarbe eine Folge des Lichts ist. Nicht der Gegenstand war sein Motiv, sondern das Festhalten der veränderten Körperfarbe – der *Erscheinungsfarbe* (s. S. 49).

1 Messeinheit für Farbtemperaturwerte

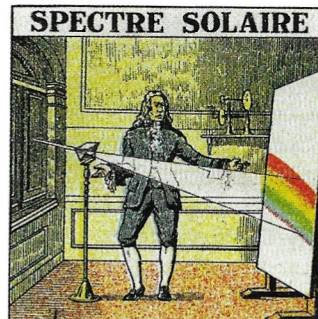
# Physikalische Grundlagen

## Newton's Theorie und die Folgen

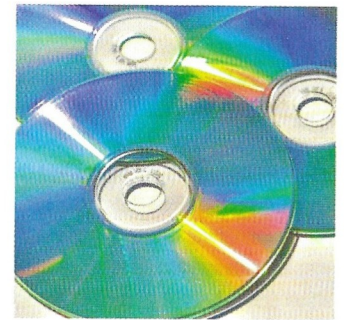
„Soviel ist allbereits klar, dass das im Licht Gesehene Farbe ist ...“  
(Aristoteles)

Woraus besteht Licht? Was ist Farbe? Schon die Griechen der Antike hatten eine Vorstellung davon, woraus das Licht bestehen könnte, und bezogen sich dabei auch auf die Farben des Regenbogens. Pythagoras, Aristoteles, Platon, alle wollten auf erkenntnistheoretischem Weg die Phänomene Licht und Farbe verstehen. Aristoteles nahm an, dass das Spektrum des Regenbogens aus drei Farben besteht (Rot, Grün, Violett). Über die Jahrhunderte wurden viele Theorien über das Entstehen der Farbe und über den Vorgang des Sehens entwickelt. Aber erst 1666 bewies der englische Naturwissenschaftler Isaac Newton mit einem ersten Versuch, dass sich das weiße Sonnenlicht in seine Spektralfarben zerlegen lässt, dass die Lichtwellen Träger aller Farben sind, verborgen in weißem Sonnenlicht: Er ließ durch eine winzige Öffnung in einem Fensterladen Sonnenlicht in einen abgedunkelten Raum hineinfallen. Diesen Lichtstrahl lenkte er durch ein dreikantiges Prisma. Dadurch erschien auf der dahinter liegenden Wand ein bunter Lichtstreifen in den Farben des Regenbogens: das Farbenspektrum des weißen Lichts. An dem einen Ende konnte er ein „Rot erregendes Licht“ und am anderen Ende ein „Violett erregendes Licht“ sehen. Newton beobachtete auch, dass die beiden Enden des Farbspektrums, Rot und Violett, über Mischfarben ineinander übergehen können, und bildete so aus dem linearen Spektrum eine kreisförmige Anordnung der Spektralfarben – den Farbkreis. Um einen Übergang zwischen den beiden Farbtönen herzustellen, konstruierte er das nicht im Spektrum enthaltene Purpur (Rotviolett/Magenta) hinzu. Newton erklärte, dass die Kreisform ihm als geometrische Methode diene: Die Radien teilen den Kreisumfang proportional wie bei „den sieben musikalischen Tönen oder den acht in einer Oktave enthaltenen Tönen“. Der Kreisumfang als solcher stelle „die ganze Farbenfolge von einem Ende des Sonnenspektrums bis zum anderen dar“. Zudem setzte er die Farbe Weiß ins Zentrum, gemäß seiner weiteren Versuche, die zeigten, dass sich die bunten Lichtstrahlen wieder zu einem weißen Licht „mischen“ lassen (additive Farbmischung, s. S.24). Auch erkannte Newton als Erster das Prinzip der Komplementärfarben: Farben, die sich im Farbkreis diametral gegenüberliegen, ergeben in ihrer pigmentären Mischung eine neutrale, „eine braune Farbe, ähnlich der einer Maus“. Seine 1704 veröffentlichte Theorie des Lichts (*Opticks*) ließ die spekulativen Theorien der Antike hinter sich und begründete so den Zugang der Physik zum Phänomen Farbe. Die Zerlegung des Lichts und die damit erzeugte farbige Erscheinung können wir immer wieder beobachten: beim Regenbogen, an Ölflecken auf nassem Untergrund, in Seifenblasen oder bei der Lichtzerlegung auf einer CD (Bild 22.2).

Die für das menschliche Auge wahrnehmbaren Strahlen des weißen Lichts (Sonne, weiß glühende Körper) bilden nur einen äußerst winzigen Ausschnitt aus dem vorhandenen Bereich der elektromagnetischen Wellen, deren Wellenlänge in Metern (m) oder in Nanometern (nm) gemessen wird. Die Lichtstrahlen haben eine unterschiedliche Wellenlänge, wobei in einem Prisma die kurzwelligen Lichtstrahlen stärker und die langwelligen weniger stark gebrochen werden. Wir nehmen die kurzwelligen Strahlen als blaues Licht und die langwelligen Strahlen als rotes Licht wahr. An den Rändern des Spektrums geht das sichtbare Licht in unsichtbare Strahlung über (Ultraviolettstrahlung, Infrarotstrahlung).



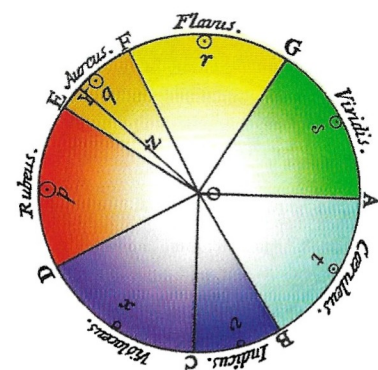
22.1 Newtons erster Versuch von 1666: die Zerlegung des weißen Lichts in seine Spektralfarben (Druckgrafik, anonym)



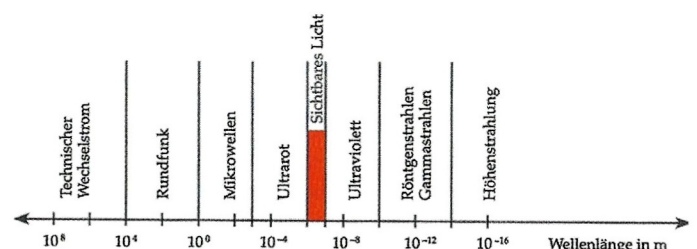
22.2 Sonnenlicht trifft auf CDs: Zerlegung des weißen Lichts



22.3 Das sichtbare Spektrum und seine Übertragung in ein Kreisschema („Newton'scher Kreisschluss“); dabei wird das im Lichtspektrum nicht enthaltene Purpur hinzugefügt.



22.4 Isaac Newton: Der Farbkreis, aus „Opticks“, 1706 (erste Ausgabe 1704), Federzeichnung (nachträglich eingefärbt)



22.5 Schema: Elektromagnetisches Spektrum mit dem sichtbaren Anteil (Licht); Wellenlänge hier in Metern

**Goethes Farbenlehre:  
Die Farben zwischen Licht und Dunkelheit**

„Farben sind Taten des Lichts, Taten und Leiden.“  
(Johann Wolfgang Goethe)

Jahrtausende lang erlebte der Mensch den Regenbogen als ein beeindruckendes Naturschauspiel, das ihm ein Rätsel war. Deshalb inspirierte dieses atmosphärisch-optische Phänomen die Menschen in allen Kulturen zu mythischen und mystischen Deutungen über seine Erscheinung. Als farbiges Naturereignis und als Symbol für das erhabene Naturschauspiel oder für das Göttliche war er bei den Künstlern ein beliebtes Motiv, das bis heute etwa für die Naturfotografen nichts von seiner Faszination eingebüßt hat. Im frühen 17. Jahrhundert wurden die ersten physikalisch-mathematischen Erklärungsversuche über sein Zustandekommen entwickelt, aber erst Newton konnte das Phänomen des Regenbogens physikalisch analysieren.

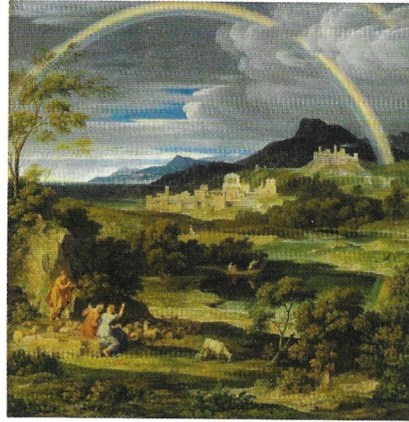
Ohne Licht kein Sehen – ohne ausreichendes Licht keine Farbwahrnehmung. Für Aristoteles entstand Farbe aus der Mischung von Schwarz und Weiß, aus der „Helligkeit der Luft“ und der „Dunkelheit des Körpers“. Wenn das innere Licht auf das sich außerhalb des Körpers befindende Licht trifft, erhält der Mensch eine Wahrnehmung von Farbe. Ganz von dieser idealistischen Vorstellung geprägt, verstand auch Goethe das Phänomen Farbe: Aus der Dualität der extremen Gegensätze bildet sich etwas Neues, sittlich Höheres. Die einzelne Farbe hat nach Goethe einen spezifischen Charakter, der auf den Menschen wirkt. Dies beschreibt er mit der „Sympathie“ und „Antipathie“ der Farben. „Dieser Betrachtungsstandpunkt kommt einer Psychologie der Farben sehr nahe, denn Farben sind für Goethe letztlich Bewusstseinsinhalte von sinnlichen Qualitäten, ein Gedanke, der auch in den modernen Künstlerfarbenlehren von großer Bedeutung ist.“

(Welsch/Liebmann, 2002)

Dieser phänomenologische Ansatz Goethes unterschied sich grundsätzlich von der physikalischen Optik Newtons. Goethe erschien das Erklärungsmodell der Physik zur Entstehung der Farbe zu eindimensional. Damit war ein Konflikt vorgegeben; er ließ sich zu einer heftigen Polemik über Newton hinreißen. Goethe hatte zwar keinen Beweis für seine These, aber für ihn entstand die Farbe „im Auge“ des Betrachters (s.S.18-20). Als Goethe 1810 seine Schrift „Zur Farbenlehre“ herausbrachte, war diese mit ihren über 2000 Seiten nicht nur das umfangreichste seiner gesamten Werke, sondern auch die umfassendste und tiefgründigste Abhandlung zum Thema „Farbe“ bis heute. Es überrascht nicht, dass der große Dichter seiner Farbenlehre eine größere Bedeutung beimaß als seinem gesamten literarischen Schaffen, galt sie für ihn doch als die Summe seines lebenslangen Nachdenkens: ein Weltverstehen über die Grenzen von Metaphysik, Poesie und Naturwissenschaften hinweg.

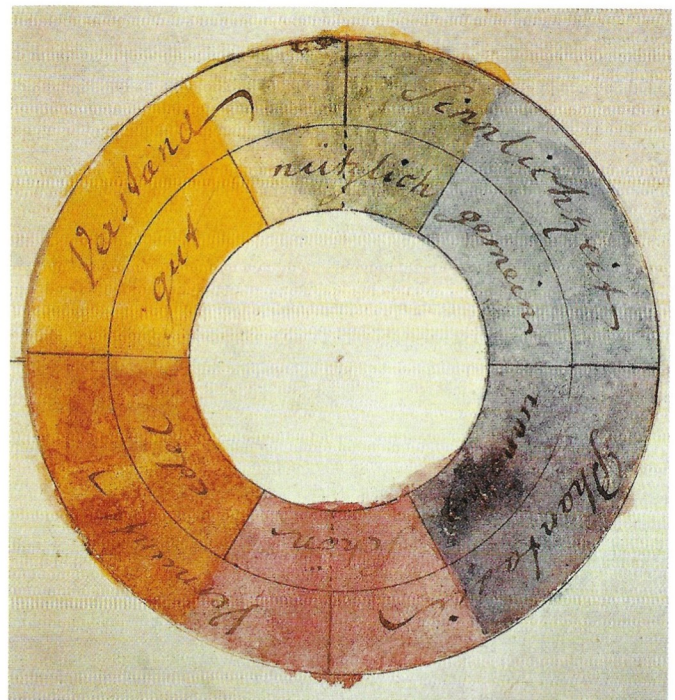
„Für Goethe waren die Farben nicht beliebig teilbare Quantitäten, sondern nahmen als ‚Urphänomene‘ am Wirken der Natur teil. (...) Für Goethe entstehen die Farben aus dem Kampf zwischen ‚Licht und Finsternis‘, aus der Polarität von Hell und Dunkel, die durch das Mittel der Trübe (Atmosphäre, von der Durchsichtigkeit bis zum Weiß) die Gesamtheit der Farben hervorbringt. Der Vorgang der Farberzeugung geschieht nicht durch Brechung oder Mischung, sondern durch Verdichtung und Steigerung.“

(Welsch/Liebmann, 2002)



**23.1** Josef Anton Koch:  
Heroische Landschaft  
mit dem Regenbogen,  
1805, Öl auf Leinwand,  
118 x 114 cm,  
Staatliche Kunsthalle,  
Karlsruhe

„Ob man nicht indem von den Farben gesprochenen werden soll, vor allen Dingen des Lichtes zu erwähnen habe, ist eine ganz natürliche Frage (...). Die Farben sind Taten des Lichts, Taten und Leiden. In diesem Sinne können wir von denselben Aufschlüsse über das Licht erwarten. Farben und Licht stehen zwar untereinander in dem genauesten Verhältnis, aber wir müssen uns beide als der ganzen Natur angehörig denken, denn sie ist es ganz, die sich dadurch dem Sinne des Auges besonders offenbaren will.“  
(Goethe, 1810)



**23.2** Johann Wolfgang Goethe: Farbenkreis – Allegorischer, symbolischer, mystischer Gebrauch der Farbe, 1809, Zeichenfeder, Wasserfarben auf Büttenkarton, 12 x 8 cm, Goethe Museum, Frankfurt am Main

## Additive, subtraktive und optische Farbmischung

### Die additive Farbmischung – mit Lichtfarben

Fällt weißes Licht (Sonnenlicht) auf die Netzhaut, werden alle drei Zapfentypen gleichermaßen gereizt und wir sehen die Farbe Weiß. Dieser Vorgang lässt sich im Experiment gut zeigen (Bilder 24.1–2): Drei gleich helle, getrennt farbige Lichtquellen unterschiedlicher Wellenlänge werden auf eine weiße Fläche projiziert. Die neuen Lichtfarben entstehen durch die Addition der projizierten Lichtfarben und sind deutlich heller, von geringer Sättigung. Aus den Spektralfarben Rotorange, Grün und Blauviolett entstehen so in der Addition Gelb, ein helles Blaugrün (Cyan) und ein helles Rotviolett (Magenta/Purpur). In der Mitte der Projektion, dort, wo sich die elektromagnetischen Wellen weiter addieren, sehen wir weißes Licht (s. S.22, sog. 3. Newton'scher Versuch), d. h. hier ist die Erregbarkeit der Zapfen am höchsten.

Das Prinzip der *additiven* Farbmischung (Nachweis von Clerk Maxwell, 1861, s. S.66) wird auf der Basis von Rot, Grün und Blau (RGB) bei der Videotechnik, beim Fernsehen und bei der digitalen Bilderzeugung (Kamera, Monitor, Beamer...) angewandt (s. S.25).

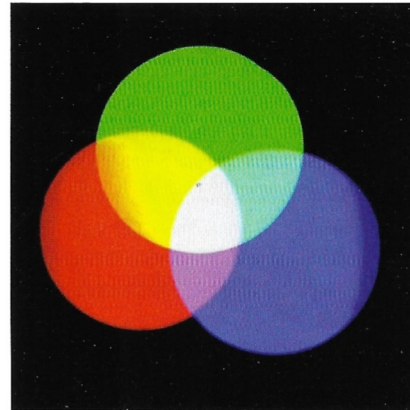
### Die subtraktive Farbmischung – mit Pigmentfarben

Werden vor eine weiße Lichtquelle farbige Folien geschoben (Gelb, Cyan, Magenta), dann entstehen in ihrem Schnittbereich die Lichtfarben Rot, Grün und Violett. Das Ausfiltern reduziert (subtrahiert) die Strahlungsenergie, die Mischfarben erscheinen dunkler (Bild 24.3). In der Mitte der Projektion sehen wir durch die fast völlige Absorption der Strahlungsenergie kein Licht, also Schwarz.

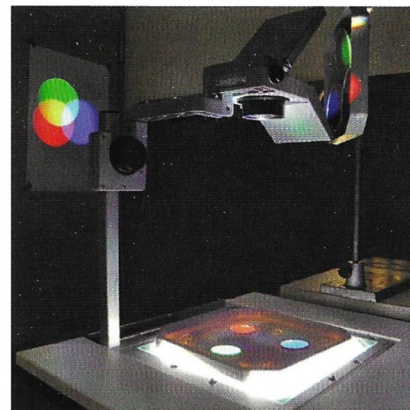
Ähnlich verhält es sich mit den Pigmentfarben, wenn die einzelnen Pigmente der Körperfarbe (s. S.21) dem weißen Licht einzelne Farbanteile entziehen (absorbieren), um gleichzeitig die Farbe zu reflektieren, die wir „sehen“. Die besten Mischergebnisse mit der Malfarbe erzielen wir mit Gelb, Magenta und Cyan, da sie aus dem weißen Licht jeweils einen der Hauptbereiche des Spektrums absorbieren. Durch eine geschickte Mischung dieser drei Pigmente wird so viel Licht absorbiert, dass wir einen dunklen Farbton zu sehen glauben, der als trübes Braun bezeichnet werden kann. Eine völlige Absorption (hin zu Schwarz) erreichen wir mit der Mischung von Buntfarben nicht, da immer noch einige Pigmente etwas an Lichtstrahlen zurückwerfen.

### Die optische Farbmischung – entsteht im Gehirn

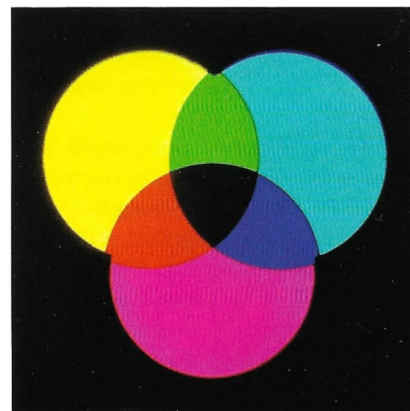
Wenn kleinste Farbteilchen unterschiedlicher Farbtöne eng beieinanderliegen, unterschreiten sie die Reizschwelle für die Zapfen und können in ihren einzelnen Wellenlängen nicht mehr wahrgenommen werden: Wir sehen eine Mischung der sich überlagernden Wellenlängen. Die Mischfarbe entsteht in der Wahrnehmung („im Auge“) des Betrachters wie bei der *additiven* Farbmischung. Dieses Phänomen macht sich der Vierfarbendruck zunutze, indem hier z. B. vier Farben als Rasterpunkte eng nebeneinandergesetzt werden: Cyan, Magenta, Gelb (Yellow) und Schwarz (Key) = CMYK. Da die drei Buntfarben kein reines Schwarz ergeben (s. o.), dient Schwarz der Kontrastverstärkung. Indem die Farbpunkte stellenweise aber auch übereinanderliegen, haben wir es dort dann mit einer *subtraktiven* und sonst mit einer *optischen* Mischung zu tun (Bild 24.4). So wurde für den Farbendruck eine äußerst ökonomische Lösung gefunden: Tausende Farbtöne können mit nur vier Farben erzeugt werden.



24.1 additive Farbmischung mit Lichtfarben; im abgedunkelten Raum auf weißer Wandfläche



24.2 Versuchsanordnung zu oben: Projektion dreier Lichtfarben (additive Farbmischung)



24.3 subtraktive Farbmischung, erzeugt durch Farbfilter



24.4 vierfarbiger Rasterdruck in vielfacher Vergrößerung (Detail aus Bild 35.1); subtraktive und optische Farbmischung

## Farbe als Licht

Farbe bestimmt unsere visuelle Kultur wie in keiner Generation vor uns. Vor allem durch die digitale Technik treffen wir im privaten oder öffentlichen Bereich überall auf virtuelle Bilder; real ist nur das farbige Licht (Lichtfarbe). In den Computern, Tablet-PCs, Smartphones und allem, was danach noch entwickelt werden mag, zeigen Licht und Farbe ihre medialen Qualitäten.

### Neonröhre und Leuchtreklame (Bild 25.1)

Neonröhren sind mit Neongas gefüllte Glasröhren, in deren Inneren es zwischen zwei Kathoden zu einer lichterzeugenden Gasentladung kommt. Traditionell werden sie für die Leuchtreklame eingesetzt, dienen heute aber auch als Hintergrundbeleuchtung bei den TFT- und LC-Displays (von engl. *Liquid Crystal Display* = Flüssigkristall-Bildschirm).

### Videotechnik und Röhrenbildschirm (Bild 25.2)

Bei der analogen Bildaufzeichnung mit der Videokamera wird das aufgenommene Bild (= farbiges Licht) mittels einer Elektronenröhre in elektrische Signale umgewandelt. Für die Bildwiedergabe sorgt der Röhrenbildschirm: Elektronenstrahlen werden auf eine Leuchtschicht projiziert, wo rote, grüne und blaue Bildpunkte angeregt werden und eine Rastergrafik aus Lichtpunkten (Pixel) erzeugen (vgl. *optische* Farbmischung S.24 und den RGB-Farbraum, S.31).

### Mikrochip und Fotorezeptoren (Bild 25.3)

Hochempfindliche CCD-Sensoren haben das alte Röhrenkonzept ersetzt und arbeiten als Mikrochip in digitalen Aufnahmegeräten (Videokameras, Fotoapparate, Tablet-PCs ...). Die sich auf einem Chip befindenden mikrokleinen Licht-Dioden sind in ihrer Funktion vergleichbar mit den farbeempfindlichen Zapfen unserer Netzhaut (s.S.18). Sie zerlegen das reale Bild, das die Linse übermittelt, in eine Vielzahl von Bildpunkten (Pixel). Der in der Wirklichkeit vorhandene, unendlich feine (lineare) Farbverlauf wird dabei auf viele Farbstufen reduziert.

### Das digital erzeugte Bild (Bilder 25.4-5)

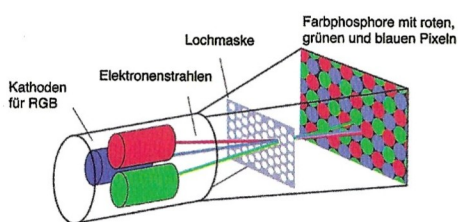
Das Abtasten des Kathodenstrahls in der Bildröhre des analogen Fernsehers wurde abgelöst von den LC-Bildschirmen. Ob das Display der digitalen Kamera, des Handys oder am Navigationsgerät im Auto, ob Flachbildschirm oder Videoprojektor – kein digitales Medium kommt noch ohne diese Bildschirmtechnik aus. Beim LC-Display beeinflussen Flüssigkristalle unter elektrischer Spannung die Polarisationsrichtung von Licht.

### Tasten und Farben sehen

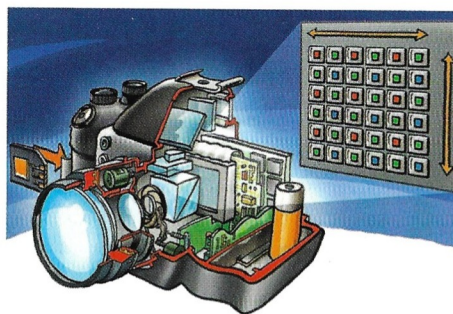
Digital gesteuerte Fotosensoren reagieren auf reflektiertes, einfaches Licht, so dass z. B. bei den Touch-Displays (Bild 10.4) schon mit der Abschattung durch den Finger der Kontakt zum Bild sinnlich direkt geschieht. Keine Tastatur befindet sich mehr zwischen der taktilen Bilderzeugung und dem Auge. Der Computer und die Spielkonsole sind die bildhervorbringenden Medien, mit denen heute jeder umgeht. Die Welt der Farbe wird digital geformt und virtuell sichtbar gemacht. Schalten wir das Gerät ab, bleibt das farbenerzeugende Licht aus – das Display ist schwarz.



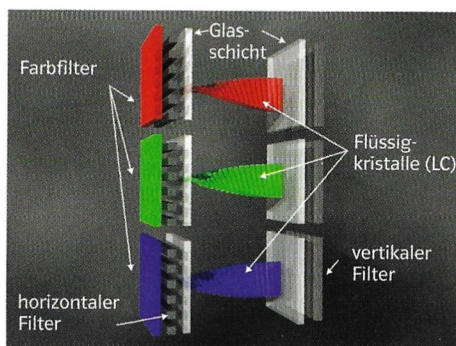
**25.1** Neonröhren: Je nach Gasfüllung oder innerer Beschichtung wird eine bestimmte Lichtfarbe erzeugt (Fotografie).



**25.2** Röhrenbildschirm: Rote, grüne und blaue Elektronenstrahlen werden auf eine Schicht mit rot, grün und blau leuchtenden Pixeln projiziert (Schema).



**25.3** digitale Kamera mit CCD-Farbsensoren und Pixelanordnung (Grafik)



**25.4** LC-Display mit Pixeldarstellung (Grafik)



**25.5** digitales Display als monumentale Werbefläche (Fotografie)