

K. Physiologische Optik.

§ 445. Wir müssen noch kurz auf den Bau und die Fähigkeiten des menschlichen Auges eingehen. Wir können das Auge mit einer Camera obscura vergleichen, wie der Photograph sie benutzt. Der Augapfel, von welchem Fig. 329 einen horizontalen Schnitt zeigt, besitzt mehrere Hüllen: die äusserste ist die Sehnhaut oder Sclerotica *s*, welche undurchsichtig weiss ist; nur der mittlere vorderste Teil, der stärker gewölbt ist, die Hornhaut oder Cornea *c*, ist durchsichtig. Die Sehnhaut ist innen mit

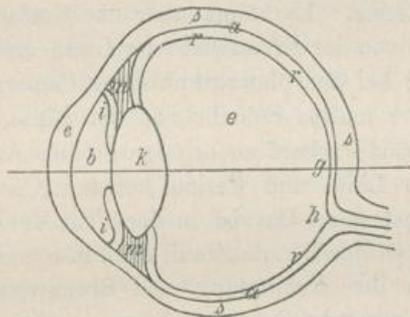


Fig. 329.

einer zweiten Hülle bekleidet, der Aderhaut oder Choroidea *a*, die aus Blutgefässen und schwarzen Pigmentzellen besteht. Sie geht vorn in die farbige Iris, *i*, über, welche in der Mitte ein Loch, die Pupille hat. Dicht hinter der Pupille liegt die Krystalllinse *k*; vor ihr, zwischen Linse und Cornea, ist der Raum *b* mit wässriger Flüssigkeit, Augenfeuchtigkeit oder Humor aqueus. hinter ihr der Raum *e* mit dem Glaskörper (Humor vitreus) ausgefüllt. Die Linse besteht aus einem elastischen bikonvexen Gallertkörper, welcher durch eine krause Haut, die Zonula Zinnii, an dem Ciliarmuskel *m* angewachsen ist.

Die innerste Hülle des Auges bildet die zwischen Glaskörper und Choroidea gelegene Netzhaut (Retina), *r*, in welcher sich die bei *h* ins Auge tretenden Sehnerven ausbreiten. Den wichtigsten Teil der Retina bildet die Schicht der Stäbchen und Zapfen, welche der die Lichtwirkung aufnehmende Apparat zu sein scheinen. Auf der Netzhaut unterscheidet man noch zwei ausgezeichnete

Stellen; der gelbe Fleck *g*, der dort liegt, wo die Augenaxe die Retina trifft; namentlich ein Teil desselben, die Netzhautgrube, besteht nur aus Zapfen, die hier kleiner sind und dichter neben einander liegen, als es sonst im Auge der Fall ist. Mit dieser Stelle sehen wir am schärfsten, sie ist aber sehr klein. Dagegen ist der blinde Fleck, *h*, wo der Sehnerv eintritt, ziemlich ausgedehnt; hier liegen gar keine Zapfen und mit diesem Teil des Auges sehen wir nichts.

§ 446. Die Cornea, Augenfeuchtigkeit und Krystalllinse wirken zusammen, wie eine Bikonvexlinse. Dieselbe entwirft also, wie das photographische Objektiv, ein Bild der vor ihr liegenden Gegenstände auf der Retina. Es hängt aber die Entfernung des Bildes von der Linse ab von der Brennweite der Linse und der Entfernung des Gegenstandes; bei der photographischen Camera verändert man die Entfernung der matten Scheibe von der Linse, um verschieden entfernte Gegenstände scharf zu erhalten; beim Auge aber ist der Abstand zwischen Linse und Retina konstant, es muss also die Brennweite variabel sein. Das ist in der That der Fall: der Ciliarmuskel kann mittelst der Zonula Zinnii die Linse mehr oder weniger spannen, dadurch ihre Krümmung und Brennweite ändern. Man nennt dies Akkommodation des Auges.

Bei einer mittleren, das Auge nicht ermüdenden Spannung sehen wir die Gegenstände deutlich, die sich etwa in 250 *mm* Entfernung befinden; diese Entfernung heisst normale mittlere Sehweite. Der nächste noch deutlich sichtbare Punkt, der Nahepunkt, liegt in etwa 120 *mm* Entfernung, während der Fernpunkt für das gesunde Auge im Unendlichen liegt.

§ 447. Bei den normalsichtigen, emmetropischen Augen beträgt die deutliche Sehweite 250 *mm*. Es gibt aber auch kurzsichtige oder myopische Augen, bei welchen Bilder entfernter Gegenstände vor der Netzhaut entworfen werden, also undeutlich erscheinen. Hier hilft man durch Verlängerung der Brennweite, Vorsetzen einer Zerstreuungslinie nach. Andererseits entwerfen die fernsichtigen oder hypermetropischen Augen von nahen Gegenständen Bilder hinter der Netzhaut; hier macht man die Brennweite kleiner durch Vorsetzen von Sammellinsen. Endlich ist zu erwähnen, dass mit zunehmendem Alter die Akkommodationsfähigkeit des Auges nachlässt, die Linse nicht mehr genügend ge-

wölbt werden kann, um sehr nahe Gegenstände scharf zu sehen; man bezeichnet dies als Presbyopie; schon vom siebenten bis neunten Lebensjahre an beginnt das Nachlassen dieser Akkommodationsfähigkeit.

Das Auge weist künstlichen optischen Apparaten gegenüber Vorzüge, aber namentlich auch grosse Mängel auf. Als Vorzug wäre das grosse Gesichtsfeld zu nennen; wir verstehen darunter den Winkel zwischen den äussersten gleichzeitig gesehenen Gegenständen mit dem Auge; er beträgt für jedes Auge horizontal 160° , vertikal 120° , für beide Augen zusammen horizontal über 180° .

Die sphärische Aberration (§ 359) tritt auch im Auge auf, wir können sie durch Zusammenziehen der Pupille verkleinern, welche also wirkt wie die Blenden bei photographischen Objektiven. Die chromatische Aberration (§ 359), welche wir bei künstlichen Apparaten ganz vermeiden können, ist im Auge sehr stark vorhanden; ist das Auge für rotes Licht auf „unendlich“ gestellt, so beträgt die deutliche Sehweite für violettes nur 70 cm.

Ferner hat das Auge den Fehler des Astigmatismus; man versteht darunter die Erscheinung, dass eine horizontale Linie nicht gleichzeitig mit einer in derselben Ebene liegenden vertikalen scharf gesehen wird. Der Fehler rührt daher, dass die brechenden Flächen nicht sphärisch gekrümmt sind, sondern ein horizontaler Schnitt einen anderen Krümmungsradius besitzt, als ein vertikaler oder irgend ein anderer, und daher Strahlen, welche durch einen horizontalen Schnitt des Auges eintreten, eine andere Brennweite haben, als solche, welche durch einen vertikalen Schnitt des Auges kommen. Man hilft hier nach durch Benutzung cylindrischer Brillengläser.

Während das Gesichtsfeld sehr gross ist, sehen wir doch nur den Teil des Bildes scharf, welcher auf die Netzhautgrube fällt, und dieser Teil entspricht einem Sehwinkel von nur 1° . Dieser Uebelstand wird dadurch geringer, dass wir die Augen fortwährend bewegen, also immer andere Stellen des Bildes scharf sehen. Der Teil, mit dem wir am schärfsten sehen, ist aber nicht zugleich der, welcher für sehr schwaches Licht am empfindlichsten ist. Man kann sich leicht davon überzeugen, dass sehr schwache Sterne unsichtbar werden, wenn man sie fixiert, wieder erscheinen, wenn man daneben sieht, ein Beweis, dass die seitlich vom gelben Fleck liegenden Teile der Retina empfindlicher sind.

§ 448. Jedes Auge erzeugt für sich ein Bild, man erkennt dies, wenn man einen nahen Gegenstand fixiert; dann sieht man alle ferneren doppelt, und umgekehrt. Die Bilder, welche auf den Zapfen liegen, müssen diese, und damit den Sehnerven reizen, der Reiz wird auf das Gehirn übertragen, und hier müssen sich die Reize beider Augen zu der Wahrnehmung der Gegenstände vereinigen. Wie das geschieht, geht die Physik nichts an. Die Zusammenwirkung beider Augen hat aber noch einen wichtigen Zweck: wir sehen wenigstens nahe Gegenstände mit beiden Augen von etwas verschiedenen Seiten, und die Vereinigung dieser etwas verschiedenen Bilder bringt in uns die Wahrnehmung der Körperlichkeit der Gegenstände, der drei Dimensionen, hervor. Diese Thatsache ist zur Konstruktion des Stereoskops benutzt worden, welches zuerst von Wheatstone hergestellt wurde. Zeichnen oder photographieren wir denselben Gegenstand von zwei etwas verschiedenen Standpunkten, und sorgen dafür, dass jedes Auge nur ein Bild sieht, beide aber dieselben an der gleichen Stelle des Raumes, so vereinigen sie sich zu einem körperlichen Eindruck.

Wheatstone stellte zwei Spiegel s (Fig. 330) unter rechtem Winkel an einander, die Bilder wurden an die Stellen b gebracht; dann erblicken sie die Augen a an der Stelle c zusammenfallend.

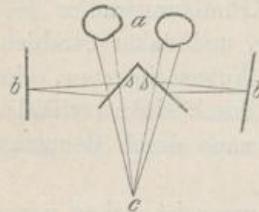


Fig. 330.

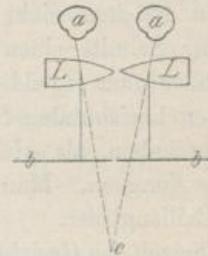


Fig. 331.

Zweckmäßiger ist das Brewstersche Stereoskop (Fig. 331), welches dasselbe durch Brechung in den Linsen L erreicht. Sind die Bilder ganz identisch, z. B. von derselben Druckplatte gedruckt, so machen sie auch zusammen einen Flächeneindruck; die kleinsten Unterschiede lassen aber wenigstens einzelne Stellen körperlich erscheinen.

Man hat auf diese Weise nachgemachtes Papiergeld erkennen können.

§ 449. Ein Lichteindruck wirkt momentan auf das Auge, denn wir sind im stande, Funken, die nur ein milliontel Sekunde dauern, zu sehen. Dagegen hört die Lichtempfindung nicht gleichzeitig mit dem Licht auf, sondern dauert noch einen merklichen Bruchteil einer Sekunde länger; wird eine glühende Kohle schnell bewegt, so sehen wir die Bahn, welche sie während längerer Zeit beschrieben hat. Wenn daher Lichteindrücke schnell auf einander folgen, so mischen sie sich: rotiert eine Scheibe mit schwarzen und weissen oder gelben und blauen Sektoren, so erscheint sie grau oder grün; sind alle Spektralfarben aufgetragen, so erscheint die Scheibe weisslich, welchen Versuch man zum Beweise der Zusammensetzung des weissen Lichtes benutzt.

Auf derselben Thatsache beruhen die stroboskopische Scheibe und das Zootrop; ihr Prinzip ist, durch eine Reihe schnell vor dem Auge passierender Spalte nur in einzelnen Momenten den Durchblick auf eine Reihe ebenso schnell wechselnder Bilder zu gestatten; stellen diese denselben bewegten Gegenstand in kurz auf einander folgenden Momenten dar, so verbinden sich die Bilder im Auge und man glaubt die Bewegung zu sehen. Sind die Bilder gar Momentphotographien (Muybridge und Anschütz), so wird der höchste Grad der Naturwahrheit erreicht.

§ 450. Ueber die Farbenempfindung können wir nur wenige Worte sagen, wenn wir nicht zu tief in das Gebiet der Physiologie hineingeraten wollen. Die Lichtempfindung ist wesentlich verschieden von der Schallempfindung; bei letzterer unterscheiden wir deutlich den einzelnen Ton vom Klang, das Ohr zerlegt den Klang in Töne (§ 189). Beim Licht macht uns ein Gemisch reiner Spektralfarben einen ebenso einfachen Eindruck, wie die einfache Farbe, dem Weiss des Sonnenlichtes sehen wir die Zusammengesetztheit nicht an. Wir können Weiss nicht nur durch Mischung aller Spektralfarben erhalten, sondern auch zweier, dreier; auch diese verschiedenen „Weiss“ können wir nicht unterscheiden. Zwei Farben, welche sich gegenseitig zu Weiss ergänzen, nennt man komplementäre Farben. Der Versuch zeigt weiter, dass wir durch Mischung dreier Farben: Rot, Grün und Violett, alle existierenden Farbenempfindungen hervorrufen können. Die von Young aufgestellte, von v. Helmholtz weiter ausgeführte sog. Young-Helmholtzsche Farbentheorie nahm daher an, im Auge seien drei Arten von Nerven vorhanden, von welchen die

einen namentlich durch Rot, die anderen durch Grün, die dritten durch Violett erregt werden. Die Farbenblindheit wurde durch Schwächung oder Fehlen einer dieser Nervenarten erklärt.

In neuerer Zeit hat indessen die Untersuchung Farbenblinder zu Widersprüchen mit dieser Theorie geführt, während eine andere, die Heringsche Theorie bestätigt wurde. Nach Hering beruht das Sehen auf einem chemischen Prozesse in der Sehsubstanz. Es sollen drei Arten solcher Substanzen im Auge vorhanden sein, deren Menge beim Sehakt ab- und zunimmt. Die erste Substanz soll beim Abnehmen den Eindruck des Weiss, beim Zunehmen den des Schwarz hervorbringen, ebenso die zweite Gelb und Blau, die dritte Grün und Rot. Daraus würde folgen, dass nie ein Gemisch von Gelb und Blau, von Grün und Rot gleichzeitig zur Empfindung kommen kann, wie es in der That der Fall ist, wohl aber z. B. Gelb mit Weiss, Schwarz, Grün, Rot; Grün mit Weiss, Schwarz, Gelb und Blau u. s. w. Die Heringsche Theorie scheint sich in der That den Erscheinungen am besten anzupassen.

§ 451. Wenn auf das Auge längere Zeit dieselbe Farbe wirkt, man z. B. auf ein kreisförmiges rotes Stück Papier blickt, so wird das Auge für die Farbe müde, die Empfindung der Farbe wird schwächer und schwächer. Sieht man darauf auf eine weisse Fläche, so wirkt auf die Stelle, wo das runde rote Bild im Auge lag, das im weissen Licht befindliche Rot viel schwächer, als das dazu komplementäre Grün, wir glauben daher eine grüne runde Scheibe zu sehen. Man bezeichnet diese Erscheinung als Nachbild mit subjektiver Farbe. Dem verwandt sind die Kontrasterscheinungen, durch welche wir neben einer grellen Farbe ihre komplementäre Farbe zu sehen glauben; so erscheint ein schmaler grauer Papierstreifen auf grasgrünem Grunde rot.

Es seien endlich noch folgende Punkte erwähnt: ein weisser Streifen auf dunklem Grund scheint breiter, als ein gleich breiter schwarzer auf weissem Grund; eine helle Mondsichel scheint einem grösseren Kreise anzugehören, als der übrige nur schwach sichtbare Mond. Man nennt dies Irradiation und erklärt es entweder (v. Helmholtz) dadurch, dass die Strahlenbündel nicht in wirklichen Punkten, sondern in kleinen Zerstreungskreisen vereinigt werden, wodurch jede helle Fläche grösser erscheinen muss; oder (Plateau) durch ein wirkliches Umsichgreifen der Lichtwirkung, wie man es auf photographischen Platten leicht beobachten kann.

Das Auge ist mannigfachen Täuschungen ausgesetzt in Bezug auf Schätzung von Dimensionen und Richtungen. In Fig. 332 sind zwei Quadrate $abcd$ und $a_1b_1c_1d_1$ gezeichnet; trotzdem erscheint das erste höher, das zweite breiter, weil wir eine Länge desto grösser schätzen, je mehr sie angefüllt oder in Unterabteilungen geteilt ist.

In Fig. 333 sind zwei genau gleich grosse Sektoren a und b gezeichnet, aber man muss sich durch Messung überzeugen, dass a nicht wesentlich grösser ist.

Endlich sind in Fig. 334 vier parallele Linien gezeichnet, welche von verschiedenen geneigten schrägen Linien durchschnitten



Fig. 332.

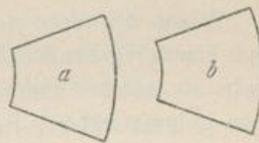


Fig. 333.

sind, und dadurch durchaus nicht mehr parallel erscheinen. Es gibt eine grosse Menge solcher optischen Täuschungen; man muss



Fig. 334.

auf sie bei Bauwerken mitunter Rücksicht nehmen, wenn nicht ein sehr störender Eindruck entstehen soll.

L. Beziehungen zwischen Licht, Elektrizität, Magnetismus.

§ 452. Wir haben in der Physik zwei grosse Klassen von Erscheinungen, die Gravitation und die elektrischen und magnetischen Wirkungen, welche nach der üblichen Auffassung Fern-