

Abschnitt VII.

Optik.

A. Wesen des Lichtes.

§ 337. Wie bei der Wärme, dem Magnetismus und der Elektrizität nahm man auch bei den optischen Erscheinungen an, sie beruhten auf einem besonderen Leuchtstoffe. Die selbstleuchtenden Körper sollten kleinste Teilchen dieses Stoffes aussenden, die mit enormer Geschwindigkeit den Raum durchfliegen, die durchsichtigen Körper durchdringen, an anderen zurückprallen, reflektiert werden. Namentlich Newton bildete diese Theorie, die sog. Emissionstheorie aus. Aber er selbst beobachtete zuerst die Erscheinungen, welche später die Theorie beseitigten, Interferenzerscheinungen, obwohl es seinem mathematischen Talent gelang, auch diese noch durch Häufung neuer Hypothesen durch die Emissionstheorie darzustellen.

Wir haben bei den akustischen Schwingungen die Thatsache kennen gelernt, dass zwei Töne sich gegenseitig vernichten können, weil ihre Schwingungen interferieren. Ebenso zeigt sich, dass Licht zu Licht gefügt unter Umständen Dunkelheit geben kann. Daraus können wir den Schluss ziehen, dass das Licht auch eine Bewegung sein müsse, nicht aber ein Stoff; denn Stoff zu Stoff gefügt kann niemals die Summe 0 geben, wohl aber Bewegung zu Bewegung gefügt, wenn nämlich beide gleich gross, aber entgegengesetzt gerichtet sind. Young (1773—1829), der sich mit Akustik viel beschäftigt hatte und daher die Interferenz kannte, stellte daher die Theorie auf, das Licht bestehe in einer Wellenbewegung, was übrigens schon in der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts Huygens, wenn auch viel unvollständiger, ausgesprochen hatte. Diese Theorie wird Undulationstheorie genannt.

Analog den Schallwellen in Luft nahm Young longitudinale Schwingungen an; es fragte sich nun aber, was führt die Schwingungen aus? Beim Schall waren es die ponderablen Molekeln, denn durch das Vakuum geht er nicht hindurch. Umgekehrt gehen Lichtstrahlen durch das Vakuum und den Weltraum, den wir nach den astronomischen Thatsachen als Vakuum betrachten müssen; also kann das Licht nicht auf Schwingung ponderabler Molekeln beruhen. Man sah sich daher gezwungen, eine neue Substanz, den Lichtäther, anzunehmen, der den ganzen Weltraum erfülle, im Vakuum allein vorhanden sei, in unseren Körpern den Zwischenraum zwischen den Molekeln ausfülle, kurz überall sei, wo nicht der Raum durch ein ponderables Molekel besetzt ist.

Die Theorie war aber noch nicht richtig; es wurden bald Erscheinungen bekannt, die man Polarisationserscheinungen nannte, welche schliesslich nötigten, die Annahme longitudinaler Schwingungen aufzugeben. Fresnel machte diesen wichtigen Schritt, das Licht als transversale Schwingungen des Aethers aufzufassen, und ihm verdanken wir die Entwicklung der mathematischen Theorie der neueren Optik. — Die Einführung transversaler Schwingungen bietet eine logische Schwierigkeit dar, worauf hier aufmerksam gemacht sei. Sie beruhen, wie wir wissen (§ 181), auf dem Widerstand gegen Formänderung, den wir nur bei festen Körpern kennen. Elastisch muss sich der Lichtäther also wie ein fester Körper verhalten. Dies scheint der Thatsache zu widersprechen, dass der Aether der Bewegung ponderabler Teile, z. B. der Molekeln, keinen erkennbaren Widerstand darbietet. Wir müssen uns aber denken, der Aether sei so beschaffen, dass er sehr kleinen Kräften gegenüber, wie sie z. B. bei seinen Schwingungen erzeugt werden, sich als elastischer Körper verhalte, etwas grösseren Kräften aber nachgebe, zerreisse, so dass er sich hier wie eine Flüssigkeit verhält. Als Beispiel für solches Verhalten können wir Leimgallert nennen, welche ganz wohl transversale Schwingungen ausführen kann, aber doch kleinen Kräften, z. B. dem Druck des Fingers leicht nachgibt.

Die Undulationstheorie konnte nicht die Erscheinungen der Absorption (§ 382) und der Dispersion (§ 365) erklären; Sellmeier und v. Helmholtz führten 1874 eine Wechselwirkung zwischen Aether und Molekeln in die Rechnung ein, wodurch auch dieser Mangel beseitigt wurde. — Endlich ist zu erwähnen, dass in den letzten Jahrzehnten, angeregt durch Maxwell und die sich

häufende Kenntnis von Wechselbeziehungen zwischen Elektrizität, Magnetismus und Licht, eine sog. elektromagnetische Lichttheorie sich zu entwickeln begonnen hat, welche Bewegungen des Aethers als die gemeinsame Ursache aller drei Erscheinungsklassen auffasst.

§ 338. Es ist bei der Akustik (§ 178 und 179) ausführlich besprochen, wie eine Wellenbewegung entsteht, und dass sie dargestellt wird durch $y = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$, wo y die Entfernung eines Teilchens aus der Gleichgewichtslage zur variablen Zeit t bedeutet, a die Amplitude, T die Schwingungsdauer, x den Abstand des betrachteten Punktes von einem Anfangspunkt, λ die Wellenlänge. $2\pi \frac{x}{\lambda}$ heisst die Phase der Bewegung. Ferner hatten wir $\frac{1}{T} = n$, die Schwingungszahl, und für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit: $v = n\lambda$. Auch hier gilt das Gesetz, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit unabhängig von der Amplitude oder Intensität ist, weil bei den unendlich kleinen Schwingungen die Kraft proportional der Ablenkung ist (§ 180).

In dem isotropen Lichtäther bilden die Wellenflächen (§ 183) eines leuchtenden Punktes konzentrische Kugeln; eine zu ihnen senkrechte Linie nennt man einen Strahl; derselbe ist also eine gerade Linie. In Wahrheit wird im gewöhnlichen Leben eine gerade Linie sogar meist bestimmt durch den Weg eines Strahles.

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes, wegen ihrer Grösse lange Zeit für unendlich gross gehalten, wurde zuerst durch Olaf Römer 1670—1676 auf astronomischem Wege bestimmt. Er wollte die Umlaufszeit der Jupitermonde bestimmen aus der Dauer ihrer Verfinsterung, die dadurch entsteht, dass der Jupiter sich zwischen sie und die Sonne stellt. Er fand diese Zeit verschieden, je nachdem die Erde sich dem Jupiter nähert oder sich von ihm entfernt, weil z. B. beim Annähern der Erde die Wiederbeleuchtung schneller gesehen wird, als die Verfinsterung, weil sich inzwischen die Strecke verringert hat, welche der Strahl zurücklegen muss. Aus der Differenz der Verfinsterungsdauern findet man:

$$v = 296\,800 \text{ bis } 304\,000 \frac{\text{km}}{\text{sec}}.$$

Im Jahre 1727 machte Bradley eine zweite astronomische Bestimmung; er entdeckte die Aberration des Lichtes, d. h. die

Thatsache, dass die Sterne stets parallel zur Bewegung der Erde verschoben erscheinen, also am Himmel kleine Kreise beschreiben. Das kommt daher, dass sie in einer Richtung erscheinen, welche die Resultante aus der Erd- und Lichtgeschwindigkeit ist. Man kann also letztere aus ersterer und der Aberration berechnen. Bradley fand:

$$v = 295\,000 \text{ bis } 306\,000 \frac{\text{km}}{\text{sec}}.$$

Eine Messung in irdischen Entfernungen gelang erst Fizeau 1849 und Foucault 1850. Die Fizeausche Einrichtung ist in Fig. 227 skizziert. L ist eine helle Lichtquelle; von ihr ausgehende Strahlen fallen auf eine Linse A, werden gebrochen und würden in einem Punkte vereinigt werden, wenn sie nicht vorher eine Glasplatte B trafen, die unter 45° gegen sie geneigt ist. Dadurch

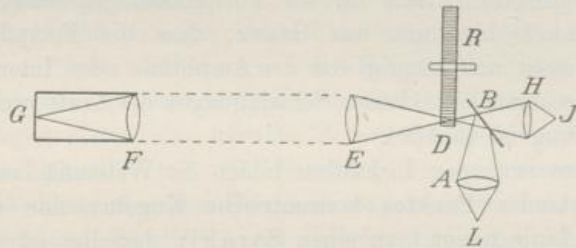


Fig. 227.

werden sie zum Teil abgelenkt und bilden in D einen hellen Punkt, welcher den Brennpunkt einer Linse E bildet. Wie wir sehen werden (§ 355), werden die Strahlen durch E parallel gemacht. Sie durchlaufen nun eine Strecke von einigen Kilometern, treffen eine Linse F, die sie wieder vereinigt; durch einen Spiegel G werden sie nun reflektiert und gezwungen, genau denselben Weg zurückzulaufen.

Sie gehen dabei durch die Glasplatte B zum Teil hindurch und werden durch eine Linse H vereinigt, so dass in J ein heller Punkt entsteht, welchen man sieht. — An dem Punkt D befindet sich aber der Rand eines Zahnrades R; fällt D in die Lücke zwischen zwei Zähnen, so kann das Licht den beschriebenen Weg durchlaufen, fällt es auf einen Zahn, so wird es abgeschnitten. Nun wurde das Zahnrad gedreht: im Augenblick, wo eine Lücke vorbeigeht, kann das Licht seinen Weg beginnen; ist aber bei seiner Rückkehr der

nächste Zahn an der Stelle von D, so kann es nicht nach J gelangen, man sieht nichts. Dreht man aber doppelt so rasch, so ist bei der Rückkehr die nächste Lücke da, man sieht das Licht; bei dreimal so schneller Drehung herrscht wieder Dunkelheit, da der zweite Zahn in D steht u. s. w. Aus der Geschwindigkeit der Umdrehung in den einzelnen Fällen kann man v ermitteln. Fizeau fand $313\,300 \frac{km}{sec}$.

Foucaults Methode gestattete sogar die Messung in einem kleinen Raum (Fig. 228). A ist ein helles Licht; die von ihm ausgehenden Strahlen gehen durch eine um 45° geneigte Glasplatte zum Teil hindurch, fallen auf eine Linse C, welche sie vereinigt;

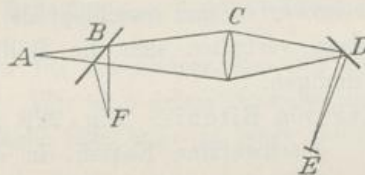


Fig. 228.

aber bevor das geschehen, gelangen sie zu einem rasch rotierenden Spiegel D, der sie ablenkt. Dabei gelangen sie unter anderem auch zu dem festen Hohlspiegel E, der sie zurückwirft, worauf sie wieder an D gespiegelt C passieren, an B zum Teil reflektiert werden und einen hellen Punkt in F bilden. Rotiert nun der Spiegel D so schnell, dass seine Stellung schon etwas verändert ist, während das Licht von D nach E und zurück nach D geht, so werden die zurückgehenden Strahlen von D an eine etwas andere Richtung haben, der Punkt F wird etwas verschoben. Foucault erreichte 1000 Umdrehungen in der Sekunde und es genügte ein Abstand DE von wenigen Metern. Er fand $v = 298\,000 \frac{km}{sec}$.

Nach denselben Methoden sind von Cornu (1873) und Michelson (1879) noch genauere Bestimmungen ausgeführt; sie fanden $300\,330$ und $299\,740 \frac{km}{sec}$, so dass wir als Mittel $v = 300\,000 \frac{km}{sec}$ annehmen können.

Die Geschwindigkeit v ist für Schwingungen von verschiedener Wellenlänge, welche, wie wir sehen werden, die Farbe des

Lichts bedingt, im reinen Lichtäther, im Weltraum, die gleiche, in ponderabler Substanz aber verschieden.

§ 339. Die Lichtwellen wirken schliesslich auf unsere Augennerven durch ihre lebendige Kraft. Die Intensität des Lichts ist also proportional dem Quadrat der Amplitude; sie nimmt umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung ab (vgl. die analogen Verhältnisse beim Schall, § 188). Darauf beruhen die photometrischen Methoden zur Vergleichung und Messung von Helligkeiten. Die Vergleichung zweier Flammen geschieht gewöhnlich nach folgenden Methoden:

1. Methode von Lambert und von Rumford; man lässt die beiden Flammen den Schatten eines Stabes auf einer weissen Wand dicht neben einander entwerfen, und verschiebt sie, bis beide Schatten gleich hell sind; dann verhalten sich die Helligkeiten, wie die Quadrate der Entfernungen.

2. Photometer von Ritchie. Fig. 229 zeigt einen innen geschwärzten Kasten, in dessen Mitte zwei Spiegel *a* und *b* unter 45° geneigt angebracht sind. Darüber hat der Kasten eine Oeffnung *c*, durch die man hineinsieht. Jeder Spiegel erhält Licht von einer Flamme, welche verschoben werden, bis *a* und *b* gleich hell erscheinen.

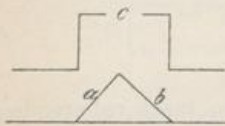


Fig. 229.

3. Photometer von Bunsen. Die beleuchtete Fläche besteht aus einem Papierschirm, der an einzelnen Stellen eingefettet, also durchsichtig gemacht ist. Beleuchtet man ihn von vorn, so erscheinen die fettigen Stellen dunkler, da sie weniger Licht reflektieren; beleuchtet man ihn von hinten, so scheinen sie heller. Wird er von vorn und hinten gleich hell beleuchtet, so verschwinden die Flecke; danach ist also die Entfernung der Flammen zu regulieren.

Man vergleicht dabei mit einer Normalflamme, deren Helligkeit = 1 gesetzt wird. In England gilt die Spermaceti-(Wallrath-)Kerze, welche stündlich 7,78 *g* bei 45 *mm* Flammhöhe verbraucht, als Einheit; in Frankreich der bec carcel, eine Rüb-öllampe; in Deutschland eine Paraffin-Normalkerze, die bei 50 *mm* Flammhöhe 7,7 *g* stündlich verbraucht. In neuester Zeit wird eine sehr konstant brennende Amylacetat-Lampe von Hefner angewandt, während als theoretische Einheit der Helligkeit die Licht-

menge genommen wird, welche von einer Platinfläche von 1 qcm bei deren Schmelztemperatur ausgesandt wird. Eine Idee von den üblichen Helligkeiten gibt folgende Tabelle:

Talglicht	(10 = 1 kg)	0,740
Wachlicht	(10 = 1 kg)	0,945
Stearinlicht	(10 = 1 kg)	0,993
Spermacetikerze	(13 = 1 kg)	1,000
Gasflamme (130 l pro Stunde)		8,819
Glühlampe (gebräuchlichste)		16,000
Bogenlampe 500 bis 5000 und mehr.		

Platineinheit = 20,8 Carrel = 19,5 Amylacetat.

B. Reflexion des Lichtes (Katoptrik).

§ 340. Auch für die Lichtwellen gilt das Huygenssche Prinzip (§ 183). Wir sind durch dasselbe im stande, aus einer Lage der Wellenfläche ihre Lage zu einer beliebigen späteren Zeit



Fig. 230.

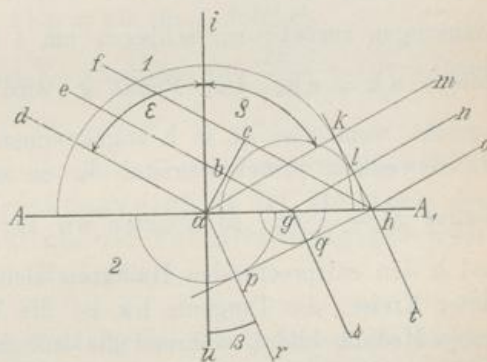


Fig. 231.

zu ermitteln. Sei AB die Lage zu einer Zeit 0, wir wollen die Wellenfläche zur Zeit t finden: wir betrachten jeden Punkt von AB als neues Wellencentrum; von ihm pflanzt sich die Bewegung in der Zeit t nach allen Seiten um vt fort. Wir konstruieren also lauter Kreise mit dem Radius vt, die Einhüllende CD dieser Kreise ist die neue Lage der Wellenfläche.

Befindet sich die Lichtquelle in grosser Entfernung, so werden die Strahlen parallel, die Wellenfläche wird eine Wellenebene senkrecht zu den Strahlen.