Allgemeine Wellenlehre.

§ 55. **Definition.** Unsere Wahrnehmungen von der Außenwelt beruhen darauf, daß die spezifischen Sinnesapparate in einer jedem eigentümlichen Weise durch Impulse der Außenwelt in Schwingungen versetzt werden und diese Schwingungen zum Gehirn fortpflanzen, wo sie dann ins Bewußtsein übertragen werden. Die Bewegungsvorgänge der Außenwelt können nun direkt oder indirekt auf uns einwirken. Ersteres ist der Fall, wenn der ursprünglich bewegte Körper selbst die Endigungen unserer Sinnesorgane erregt, wenn also z. B. jemand von einer Kugel getroffen wird, wenn die (gasförmigen) Riechstoffe unmittelbar auf die Enden des Riechnerven einwirken etc. Bei der zweiten Kategorie dagegen, zu der besonders Schall, Wärme und Licht gehören, gelangen nicht die ursprünglich in Bewegung befindlichen Körper oder Teile von ihnen zu uns, sondern ihre Bewegung wird erst durch ein Medium auf uns übertragen. Diese Übertragung geschieht nun in einer eigentümlichen Form, nämlich durch Wellenbewegung. Wellenbewegung ist die Fortpflanzung einer Gleichgewichtsstörung (eines Impulses) durch pendelartige (oszillierende) Schwingungen kleinster Teilchen, wobei immer die Bewegung der folgenden durch die der vorhergehenden hervorgerufen (induziert) wird. Die Ortsbewegung der Teilchen selbst ist hierbei nur gering, dagegen wird der Impuls oft außerordentlich schnell fortgepflanzt.

§ 56. **Intensität.** Da die Wellenbewegung sich (in homogenen Medien) gleichmäßig nach allen Seiten ausbreitet, sind die Wellenflächen Kugelschalen, verhalten sich also wie die Quadrate der Radien. Letztere, also die Verbindungslinien eines Punktes der Wellenfläche mit dem Störungszentrum heißen auch Wellenstrahlen. Da die anfängliche Gleichgewichtsstörung sich auf immer größere Flächen verteilt, muß die Bewegung entsprechend schwächer werden. Die Intensität der Wellenbewegung ist also umgekehrt proportional dem Quadrat der Entfernung vom Störungszentrum.

§ 57. **Wasserwellen.** Die Bezeichnung Wellenbewegung rührt von den Wasserwellen her, von denen auch wir zum besseren Verständnis ausgehen wollen. Fällt nämlich ein Stein ins Wasser, so entstehen bekanntlich um diesen Punkt konzentrische Kreise, die immer größer und zugleich schwächer werden. Hierbei wechseln stets Erhebungen über das allgemeine Niveau (Wellenberge) mit Senkungen (Wellentälern) ab. Durch den niederfallenden Stein wird nämlich ein Druck aufs Wasser ausgeübt; es entsteht daher an dieser Stelle ein Wellental. Das hierdurch verdrängte Wasser muß ausweichen, und da dies am leichtesten nach oben möglich ist, so entsteht rings um den Störungsmittelpunkt ein Wellenberg. Durch den Einfluß der Schwere sinken aber die gehobenen Wasserteilchen wieder zurück, sogar unter das Niveau, ebenso wie ein Pendel nach einem Ausschlag über den Ruhepunkt nach der anderen Seite hinausgeht. Dort, wo eben ein Wellenberg war, entsteht somit jetzt ein Wellental. Die dadurch verdrängten Teilchen bilden wieder, wie zuerst, um das Wellental einen kreisförmigen Wellenberg, und so setzt sich das Spiel fort, bis endlich die Welle erlischt, resp. durch ein Hindernis vernichtet wird. Schon aus dieser Beschreibung geht hervor, daß bei der Wellenbewegung nicht die Wassermasse selbst horizontal verschoben wird, wie es zuerst scheinen könnte. Ein einfacher Versuch bestätigt das: Ein Stückchen Holz nämlich, das auf dem Wasser schwimmt, bleibt ruhig auf derselben Stelle, während die Wellen unter ihm fortschreiten. Genauere Aufschlüsse gaben die Untersuchungen der Gebrüder Weber. Sie zeigten, daß die einzelnen Wasserteilchen kleine Kurven beschreiben, gewöhnlich Kreise oder Ellipsen. Fig. 41 zeigt, wie dadurch eine Wellenbewegung zustande kommt. Es stellen I—XIII benachbarte Wasserteilchen im Stadium der Ruhe vor. Wenn nun I eine Schwingung (Oszillation) ausführt, werden auch die anderen Teilchen, z. B. bis XII, dazu veranlaßt,

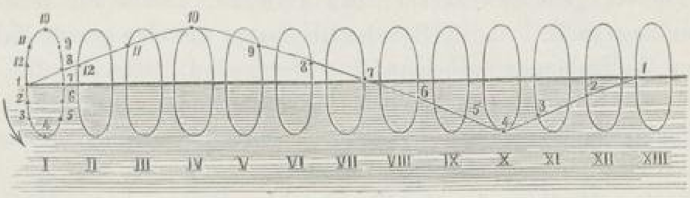

Fig. 41.

nur daß jedes folgende immer etwas später damit beginnt. In Fig. 41 ist nun der Fall dargestellt, daß I eben eine ganze Schwingung in der Richtung des Pfeils vollendet hat, also sich in Punkt 1 seiner Bahn befindet. Dann ist II noch nicht so weit, sondern erst in 12, III in 11 u. s. w. Verbindet man die Stellung der einzelnen Teilchen, so resultiert eine Wellenlinie, und zwar stellt der Teil derselben zwischen I und VII den Wellenberg, zwischen VII und XIII das Wellental vor. Selbstverständlich gilt diese graphische Darstellung der Welle nur für einen Augenblick; im nächsten Moment werden ja die Teilchen eine andere Stellung einnehmen, die Welle wird fortschreiten. Auch ist natürlich die hier gewählte Zahl der zu einer Welle gehörenden Wasserteilchen ganz willkürlich. Die Strecke I—XIII heißt nun Wellenlänge; mit anderen Worten, es ist diejenige Strecke, um die sich die Wellenbewegung fortpflanzt, während Teilchen I eine ganze Oszillation ausführt. Denn wenn I nach Punkt 2 seiner Bahn kommt, fängt II an zu schwingen, kommt z. B. I nach Punkt 5, so fängt V an zu schwingen, und wenn schließlich I am Ende seiner Oszillation ist, so beginnt XIII seine Bewegung. Während einer ganzen Schwingung von I hat sich also die Wellenbewegung bis XIII fortbewegt, und diese Strecke heißt eben Wellenlänge. Man nennt nun (wie beim Pendel) die Entfernung eines Teilchens aus der Ruhelage während einer Oszillation seine Elongation oder Amplitude. Die Zeit, welche ein Teilchen zu einer ganzen Schwingung braucht, also nach obigem auch die Zeit, in der die Wellenbewegung um eine Wellenlänge vorschreitet, heißt Schwingungszeit. Unter Phase versteht man den Bewegungszustand eines Teilchens, der charakterisiert ist durch seine Elongation und seine Bewegungsrichtung. Letztere ist deshalb wichtig, weil ja bei gleicher Elongation das Teilchen einmal im Wellenberg, das andere Mal im Wellental liegen bezw. bei geradliniger Schwingung denselben Punkt einmal in der Richtung von unten nach oben, das andere Mal von oben nach unten passieren kann. Im ersten Falle hat das Teilchen positive, im letzten negative Phase; die Phasen sind also dann entgegengesetzt. Aus Fig. 41 geht nun hervor, daß Teilchen, welche um eine ganze Wellenlänge (z. B. I und XIII) oder überhaupt um eine gerade Zahl von halben Wellenlängen voneinander entfernt sind, stets dieselbe Phase haben müssen. Teilchen dagegen, die voneinander um eine halbe oder überhaupt um eine ungerade Zahl von halben Wellenlängen abstehen, besitzen stets entgegengesetzte Phase.

§ 58. **Wellen durch Elastizität.** Während die Wellen an der Oberfläche des Wassers auf die Schwerkraft zurückzuführen sind, beruhen andere auf den anziehenden Kräften und der Elastizität der kleinsten Teilchen. Im übrigen sind die Verhältnisse ähnlich den oben beschriebenen. Also auch hier kommt die Wellenbewegung durch Schwingungen (Oszillationen) kleinster Teilchen zustande.

§ 59. **Transversale Wellen**, zu denen z. B. die beschriebenen Oberflächenwellen des Wassers, ferner die Licht- und Seilwellen gehören, sind solche, bei denen die kleinsten Teilchen senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung der Welle oszillieren. Hierbei beschreiben sie entweder Kreise oder Ellipsen oder schwingen geradlinig auf und ab. Letztere Form der Bewegung ist offenbar nur ein Spezialfall der ersteren, indem der Querdurchmesser der Kurve 0 wird.

§ 60. **Longitudinalwellen,** zu denen z. B. die Schallwellen gehören, entstehen durch Schwingungen der Teilchen in der Fortpflanzungsrichtung der Wellenbewegung. Sie sind also keine Wellen im gewöhnlichen Sinne; denn bei ihnen gibt es keine Wellenberge und -täler, sondern es entstehen abwechselnd Verdichtungen und Verdünnungen des Mediums. Zur Veranschaulichung stelle man sich vor, daß in einer Reihe hintereinanderstehender Knaben, von denen jeder seine Hände auf die Schultern des Vordermanns gelegt hat, der Hinterste einen Stoß nach vorn bekommt. Dann macht er natürlich eine Bewegung nach vorn, die sich der Reihe nach auf die vor ihm Stehenden überträgt. Während aber alle infolge des Widerstandes der Vordermänner sich wieder aufrichten, kann dies der Vorderste in der Reihe nicht und fällt hin. So hat sich also der Impuls durch die ganze Reihe fortgepflanzt, und der Effekt ist der gleiche, wie wenn der Vorderste den Stoß direkt erhalten hätte. Insofern kann man auch hier von einer Wellenbewegung sprechen. An Stelle der Armmuskeln in diesem Beispiel ist in der Natur die Elastizität des Mediums wirksam. In Fig. 42 stelle z. B.

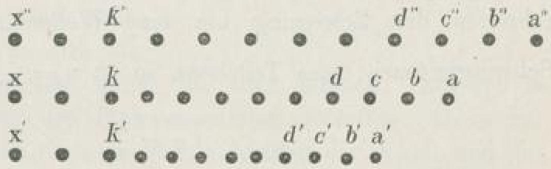

Fig. 42.

die mittelste Reihe eine Anzahl von Luftmolekülen im Ruhezustande dar. Durch einen Impuls werde a nach links verschoben, so daß es die Stellung a' (unterste Reihe) einnimmt. Durch seine Bewegung wirkt es aber auch auf b, das nach b' kommen wird, dieses wieder auf c etc. Kurz, in der Zeit, während a nach a' gelangt, wird sich die Bewegung nach links eine bestimmte Strecke fortpflanzen, z. B. bis k. Diese Strecke wird um so größer sein, je größer die Elastizität zwischen den Teilchen ist (in unserem obigen Beispiel, je straffer die Armmuskeln gespannt sind). Innerhalb der Strecke $a'k'$ muß also eine Verdichtung gegen vorher bestehen. Wird andererseits a nach rechts verschoben, etwa bis a'' (oberste Reihe), so muß auch b nach b'' gehen, da nun die elastische Kraft zwischen b und c größer als die zwischen b und a ist. Diese Bewegung nach rechts, die sich wieder entsprechend der Elastizität des Mediums eine gewisse Strecke in der Richtung $a''x''$ etwa bis k'' fortpflanzen wird, bedingt eine Verdünnung. Sowohl die Verdichtung wie die Verdünnung machen natürlich nicht Halt in k' resp. k'', sondern schreiten weiter fort. Bei jeder longitudinalen Wellenbewegung wechseln nun solche Verdichtungen und Verdünnungen beständig miteinander ab; denn jede

Pendelbewegung — und das sind ja eben die Bewegungen der kleinsten Teilchen — geht nach 2 Richtungen. Die Strecke, um welche sich die (Verdichtungs- oder Verdünnungs-) Bewegung fortpflanzt, während ein Teilchen eine ganze Pendelschwingung ausführt, heißt wiederum Wellenlänge. Man kann auch sagen, daß eine Verdichtung und eine Verdünnung zusammen eine Wellenlänge ergeben. Trotz der verschiedenen Bewegung ist also das Wesen der Longitudinal- und Transversalwellen gleich; letztere werden daher aus Bequemlichkeit auch benutzt, um erstere graphisch darzustellen.

§ 61. **Fortpflanzungsgeschwindigkeit.** Für beide Arten der Wellenbewegung gelten folgende Sätze über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit (v): Bezeichnet λ die Wellenlänge, n die Schwingungszahl, d. h. die Zahl, welche angibt, wie oft ein Teilchen in 1 Sek. schwingt, so ist:

$$v = n\lambda.$$

Denn jeder ganzen Schwingung eines Teilchens entspricht das Fortschreiten der Bewegung um eine Wellenlänge. Bedeutet T die Schwingungszeit eines Teilchens, so ist $n = \frac{1}{T}$ und somit auch

$$v = \frac{\lambda}{T}.$$

Aus diesen Gleichungen folgt, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit ganz unabhängig von der Amplitude ist.

Es ist nun zweckmäßig, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit auch durch die Elastizität des Mediums auszudrücken, die, wie erwähnt, eine große Rolle spielt. Bezeichnet man dieselbe (bezw. den Elastizitätsmodul) mit e, die Dichtigkeit des Mediums mit d, so ist nach Newton

$$v = \sqrt{\frac{e}{d}}.$$

Dichte und Elastizität dürfen nicht miteinander verwechselt werden. Je dichter ein Körper ist, desto schwerer können seine Teilchen gegeneinander verschoben werden, je größer seine Elastizität ist, um so schneller wird eine Gleichgewichtsstörung fortgepflanzt [§ 60]. Der hypothetische Äther besitzt sehr große Elastizität, außerordentlich geringe Dichte; daher pflanzt sich in ihm das Licht so schnell fort.

§ 62. **Huygens'sches Prinzip. Beugung.** Bisher wurde angenommen, daß die Wellenbewegung vom Störungszentrum aus in Form einfacher konzentrischer Kugelwellen vor sich geht. Da hierdurch manche Erscheinungen nicht erklärt werden, stellte Huygens die Hypothese auf, daß jeder Punkt einer Welle ebenso als Zentrum einer neuen Wellenbewegung betrachtet werden muß, wie der ursprüngliche Störungsmittelpunkt. Anders ausgedrückt, von jedem Punkt einer Welle gehen ebenfalls (Elementar-) Kugelwellen aus. Für gewöhnlich, in homogenen Medien, heben sich allerdings diese Elementarwellen auf, so daß eine einzige große Kugelwelle resultiert (Fig. 43). Kann sich aber die Wellenbewegung nicht gleichmäßig nach allen Seiten fortpflanzen, geht sie z. B. durch einen engen Spalt, so kommt das Huygens'sche Prinzip zur Geltung. So wird verständlich, daß auch Punkt a erregt wird, zu dem die Welle nicht direkt kommen kann. Er wird nämlich, natürlich in schwächerem Maße, von den Elementarwellen getroffen. Diese Erscheinung heißt Beugung, da ja gewissermaßen der Schall und das Licht um die Ecke herum gebeugt wird.

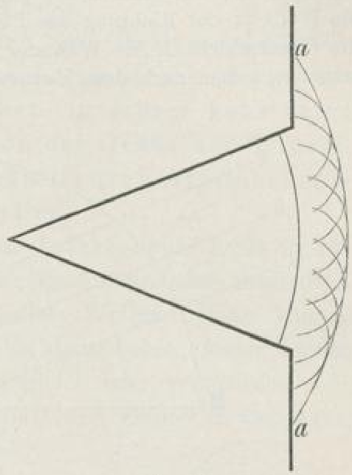

Fig. 43.

§ 63. **Reflexion und Refraktion.** Kommt eine Welle an ein Medium von anderer Dichte, so wird ein Teil von ihr ins alte Medium zurückgeworfen (reflektiert), der andere geht ins neue Medium und erfährt dabei eine Richtungsänderung (Brechung, Refraktion). Ist das neue Medium unendlich mal dichter, so ist die reflektierte Welle gegen die einfallende um eine halbe Wellenlänge verschoben, sie hat also entgegengesetzte Phase. Mit anderen Worten, wenn die Welle als Wellental ankommt, beginnt sie den Rückweg als Wellenberg (Fig. 44). Ist das neue Medium unendlich mal dünner, so findet keine Phasenveränderung statt. Zwischen diesen beiden Extremen existieren Übergänge, wo also die Phasendifferenz den Bruchteil einer halben Wellenlänge beträgt. Diese Verhältnisse sind ähnlich den Vorgängen beim Anprall einer elastischen Kugel gegen eine andere in Ruhe befindliche. Ist letztere größer (also dem dichteren Medium vergleichbar), so prallt die erste Kugel nach der entgegengesetzten Seite, ist jene aber kleiner, so behält die erste ihre Richtung bei.

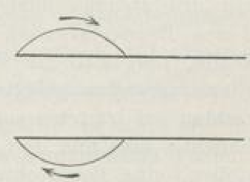
Fig. 44.

Es stelle nun (Fig. 45) df einen so kleinen Teil einer Kugelwelle dar, daß er als eben, die vom Störungszentrum dorthin gezogenen Verbindungslinien, die Wellenstrahlen, als parallel betrachtet werden können. Schreitet die Welle in der Richtung des Pfeiles vor, so stößt zuerst Strahl a in d auf die Grenzschicht MN. Während nun die Hauptwelle von f nach h vorschreitet, gehen nach dem Huygensschen Prinzip von d aus Elementarwellen

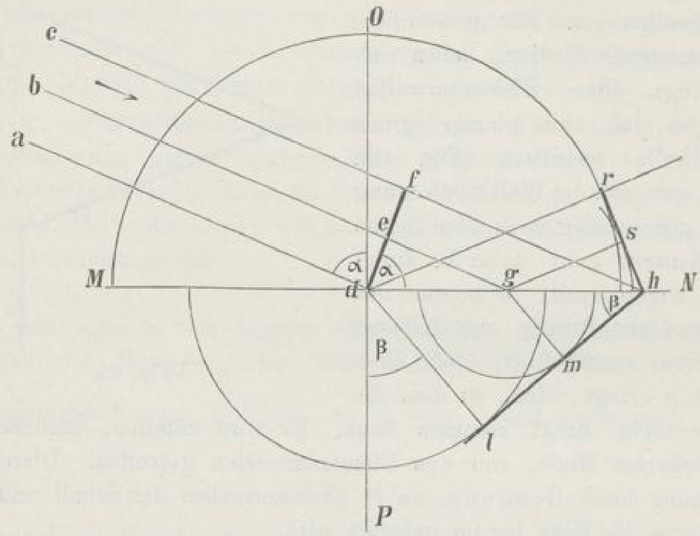

Fig. 45.

nach beiden Medien, deren Radien sich verhalten wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in diesen Medien. dr muß natürlich $= fh$ sein, da ja in demselben Medium die Fortpflanzungsgeschwindigkeit gleich ist. In derselben Zeit schreitet die Bewegung im mittleren Strahl b von e nach g und von hier in die beiden Medien bis nach s und m vor. Entsprechend verhält es sich mit den anderen unendlich vielen Strahlen zwischen a und c. Aus allen diesen Elementarwellen entsteht nun die reflektierte und die gebrochene Welle, dargestellt in der Figur durch die von h aus an die verschiedenen Elementarwellen gelegten gemeinsamen Tangenten hr und hl. Die Senkrechten auf letzteren sind dann die reflektierten bezw. gebrochenen Strahlen. Errichtet man nun dort, wo die „Einfallsstrahlen" an das neue Medium stoßen, eine Senkrechte, das „Einfallslot" OP, so ergibt sich direkt aus der Figur, daß $\angle adO$, der „Einfallswinkel", $= \angle Odr$, dem „Reflexionswinkel" ist. $\angle Pdl$ heißt Brechungswinkel (β). Es ist nun $\angle fdh = \alpha$, $\angle dhl = \beta$. Also $\sin \alpha = \frac{fh}{dh}$, $\sin \beta = \frac{dl}{dh}$. Folglich $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{fh}{dl}$. Da letzteres Verhältnis nur von der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellenbewegung, nicht aber von der Größe der Winkel abhängt, so ist es für zwei bestimmte Medien stets unveränderlich. Man schreibt daher auch $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$. [Vergl. § 115.]

Die so gewonnenen Gesetze heißen also:

1) Einfallsstrahl, Einfallslot, reflektierter und gebrochener Strahl liegen in einer Ebene.

2) Der Einfallswinkel ist gleich dem Reflexionswinkel.

3) Der Sinus des Einfallswinkels steht zum Sinus des Brechungswinkels für je 2 Medien in einem konstanten Verhältnis, das unabhängig ist von der Größe der Winkel, dagegen identisch ist mit dem Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeit in den beiden Medien.

§ 64. **Interferenz. Superposition.** Interferenz[1] heißt die Erscheinung, daß 2 oder mehrere Wellenzüge miteinander zusammentreffen. Wir betrachten hier nur parallele Wellen. Diese können entweder gleiche oder entgegengesetzte Richtung haben, ferner können die Wellenlängen, Amplituden, Phasen gleich oder verschieden sein. Immer gilt das Gesetz von der Superposition[2] kleiner Bewegungen, d. h. die definitive Oszillation eines Punktes ist gleich der algebraischen Summe der ursprünglich vorhandenen. Gleiche Phasen addieren sich also, entgegengesetzt gerichtete schwächen sich. Man erkennt dies leicht aus Fig. 46, wo die gestrichelten Linien die ursprünglichen Wellen, die ausgezogenen die resultierenden vorstellen. III zeigt die interessante Tatsache, daß 2 Wellenbewegungen einander nicht nur schwächen, sondern sogar ganz aufheben können. Dies ist stets der Fall, wenn 2 Wellen von gleicher Wellenlänge und Amplitude um eine halbe Wellenlänge differieren, d. h. also genau entgegengesetzte Phase haben. Ebenso wie sich einfache Schwingungen zusammensetzen, lassen sich auch komplizierte Wellen in einfache zerlegen.

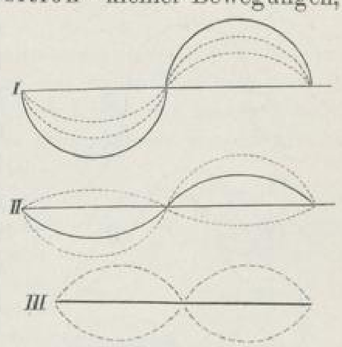

Fig. 46.

§ 65. **Stehende Schwingungen.** Die Figuren 41—46 geben alle die betreffende Wellenform nur während eines Augenblicks wieder. Im nächsten schon muß sie sich verschieben, weil 2 benachbarte Teilchen stets verschiedene Phase haben. Mit einem Worte, bisher war nur die Rede von fortschreitenden Wellen. Wenn dagegen ein an einem Ende befestigter Stab schwingt, so vollführen seine Teilchen stets stehende Schwingungen, d. h. sie bewegen sich gleichmäßig und isochron nach derselben Richtung. Ferner können stehende

[1] *interfero* dazwischentragen.
[2] *superpono* darüberstellen.

Schwingungen dadurch entstehen, daß 2 Wellenzüge gegeneinander laufen. Zum besseren Verständnis betrachten wir zunächst Seilwellen. Ist das Seil an einem Ende befestigt, und wird das freie Ende geschüttelt, so entstehen transversale Wellen, die bis zum befestigten Ende laufen; dort werden sie so reflektiert [cf. § 63], daß sie den Rückweg mit entgegengesetzter Phase beginnen. Wenn nun diese reflektierten Wellen mit den ankommenden interferieren, so finden an gewissen Stellen, den Knotenpunkten, gar keine Schwingungen statt, die dazwischen liegenden Strecken, die Schwingungsbäuche, bewegen sich dafür um so mehr. Die Schwingungsrichtung der Teilchen zwischen 2 Knoten ist immer gleich; es handelt sich hier also um stehende Schwingungen. Es stelle z. B. Fig. 47 ein Stück dieses Seiles vor, dessen Enden nicht gezeichnet sind. Die punktierten Linien bedeuten die ankommenden, die gestrichelten die reflektierten, die ausgezogenen die resultierenden Wellen. I zeigt den Fall, daß die Phasen genau entgegengesetzt sind. Die Folge ist, daß eine gerade Linie resultiert, d. h. die Wellenbewegungen heben sich auf. In II ist die ankommende Welle um $^1/_8$ Wellenlänge nach rechts vorgeschritten, die reflektierte um ebensoviel nach links. Es resultiert die ausgezogene Wellenform. Man sieht, daß die Knotenpunkte C und D in Ruhe geblieben sind, daß dagegen E eine erhebliche Exkursion gemacht hat. In III ist die Verschiebung nach rechts bezw. links wieder um $^1/_8$ Wellenlänge weitergegangen. Die Knotenpunkte sind wiederum unverändert; die Exkursion des Bauches hat ihr Maximum erreicht. In IV geht sie wieder zurück, und in V ist der Zustand von I erreicht, aber in entgegengesetzter Richtung. Denn nun würde, was nicht mehr gezeichnet ist, die Bewegung des Wellenbauches nach unten vor sich gehen. Immer also schwingen nur die Bäuche, die Knoten bleiben in Ruhe. Was für Seilwellen gilt, ist bei allen anderen Wellen auch der Fall. Diese Verhältnisse lassen auch eine Umkehrung zu: wenn irgend welche Stellen oszillierender Körper am Schwingen gehindert werden, so bilden sich daselbst Knotenpunkte.

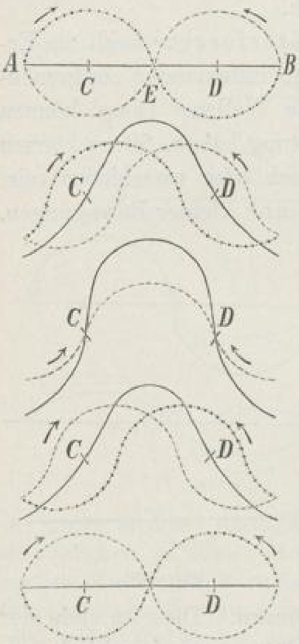

Fig. 47.