



UNIVERSITÄTS-
BIBLIOTHEK
PADERBORN

Lehrbuch der Experimentalphysik

Lommel, Eugen von

Leipzig, 1908

284. Wellenbewegung

[urn:nbn:de:hbz:466:1-83789](#)

IX. Wellen und Schall.

A. Wellenbewegung.

284. **Wellenbewegung.** Eine Wellenbewegung entsteht, wenn sich längs einer Reihe von Punkten oder in irgend einem Mittel eine schwingende Bewegung mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortpflanzt, wobei jedes in der Fortpflanzungsrichtung folgende Teilchen, entsprechend seinem Abstand von dem zuerst in Bewegung gesetzten Teilchen, seine Schwingung etwas später beginnt als das vorhergehende. Ein anschauliches Bild von den Vorgängen bei der Wellenbewegung bietet ein wogendes Ährenfeld. Jede Ähre wird von dem Wind hinabgebogen, richtet sich aber vermöge der Elastizität des Halmes wieder empor, biegt sich wieder hinab usw. und vollführt in dieser Weise regelmäßig sich wiederholende Schwingungen. Die folgenden Ähren werden durch den Windstoß, der die erste zu schwingen zwang, um so später in Schwingungen versetzt, je weiter sie in der Reihe der Ähren von der ersten entfernt sind. Vermöge der regelmäßigen Aufeinanderfolge von niedergbogenen und wieder auf-

gerichteten Ährenreihen zeigt die Oberfläche des Feldes in jedem Augenblick die Formen von abwechselnden Vertiefungen und Erhöhungen; diese Wellenform sehen wir mit der Geschwindigkeit des Windes das Feld entlang eilen, während jede Ähre, an ihrem Ort festgewurzelt, nur in beschränktem Bereiche hin und her schwingt.

Durch Wellenmaschinen kann man die Wellenbewegung in anschaulicher Weise nachahmen. Bei der Machschen Wellenmaschine sind eine Reihe von Pendelkugeln längs einem Gestelle an je zwei Fäden so aufgehängt, daß jede nur senkrecht zu dieser Längsrichtung schwingen kann. Schiebt man alle Kugeln mittels einer Holzleiste gleichweit aus der Vertikalebene seitwärts heraus, und zieht die Leiste in der Längsrichtung (*AB* Fig. 263) mit gleichförmiger Geschwindigkeit weg, so wird eine Kugel nach der anderen losgelassen, und indem jede senkrecht zu *AB* hin- und herschwingt, bietet ihre Gesamtheit von oben gesehen in irgend einem Moment den Anblick der Fig. 263, mit Ausbiegungen nach der einen und der



Fig. 263.
Wellenstrahl.

anderen Seite, welche längs der Reihe der Kugeln gleichmäßig fortschreiten.

Bei dem wogenden Ährenfeld und bei der Pendelreihe ist es ein äußerer Anlaß, welcher die Bewegung von jedem Teilchen auf das folgende überträgt. In einem Mittel, dessen Teilchen durch zwischen ihnen tätige Kraft in Wechselwirkung stehen, wird die Übertragung durch diese Kräfte selbst vermittelt. Ein Beispiel hierfür bieten die durch die Schwerkraft fortgepflanzten Flüssigkeitswellen.

Wirft man einen Stein in ein ruhig stehendes Gewässer, so wird das an dieser Stelle hinabgedrückte Wasser durch den Druck des umgebenden Wassers wieder emporzusteigen genötigt, kommt aber, nachdem es den ursprünglichen Wasserspiegel erreicht hat, hier nicht plötzlich zur Ruhe, sondern setzt seine Bewegung nach aufwärts fort, bis die entgegenwirkende Schwerkraft es wieder zum Herabsinken zwingt; so vollführt das durch den Stein zuerst aus seiner Ruhelage gebrachte Wasserteilchen eine Reihe auf- und abwärtsgehender Schwingungen. Es kann aber das Gleichgewicht des Wasserspiegels nicht an einer Stelle gestört werden, ohne daß sich die Störung wegen der allseitigen Fortpflanzung des Wasserdrucks auch auf die ringsum benachbarten Wasserteilchen überträgt und diese veranlaßt, in gleichem Takt wie das zuerst gestörte Teilchen auf und ab zu schwingen, wobei jedes weiter entfernte Teilchen seine schwingende Bewegung etwas später beginnt als das ihm unmittelbar vorhergehende. Jede Hebung des zuerst gestörten Teilchens gibt zu einer Senkung der rings benachbarten Teilchen Anlaß, welche, indem sie nach allen Richtungen fortschreitet, eine ringförmige Vertiefung um den Erregungsmittelpunkt erzeugt; die darauf folgende Senkung veranlaßt ebenso ringsum eine wallartige Erhebung, welche als Wellenberg dem vorausgegangenen Wellental auf dem Fuße folgt. Während also das zuerst erregte Teilchen eine ganze aus Hebung und Senkung bestehende Schwingung vollendet, erzeugt es eine vollständige aus Wellenberg und Wellental gebildete Welle, und indem es fortfährt zu schwingen, scheinen aus ihm immer neue Wellenringe hervorzutreten, welche, sich erweiternd, nach außen hin fortschreiten. Es ist aber nur die Gestalt der Wasserfläche, welche fortschreitet, nicht das Wasser selbst; die Wasserteilchen verlassen dabei ebensowenig ihren Ort wie die Halme eines wogenden Ährenfeldes, sondern schwanken nur auf und ab, wie man an einem auf dem Wasser schwimmenden kleinen Holzstückchen, das diese schwingende Bewegung mitmacht, leicht beobachten kann. Die Gesamtheit aller von demselben Erregungspunkt ausgehenden Wellenringe bildet ein Wellensystem. Jede vom Mittelpunkt des Wellensystems auf der wagrecht gedachten Wasserfläche gezogene Gerade heißt ein Wellenstrahl. Alle Wasserteilchen, welche im Ruhezustand auf dieser Geraden lagen, befinden sich während der Wellenbewegung teils darüber, teils

darunter, je nachdem sie augenblicklich einem Wellenberg oder einem Wellental angehören, und bilden daher in ihrer Aufeinanderfolge eine auf und ab gewundene Wellenlinie. Eine Strecke auf dem Strahl, welche von einer vollständigen Welle, nämlich einem Wellenberg und einem Wellental, eingenommen wird, nennt man eine Wellenlänge.

Zur Beobachtung der Bewegung der Wasserteilchen während der Fortpflanzung einer Welle bedienten sich die Brüder E. H. und W. Weber (1825) der Wellenrinne, eines langen, schmalen Troges mit Seitenwänden aus Glasplatten. Dem Wasser wurde ein Pulver von gleichem spezifischen Gewicht (Bernstein) beigemischt, dessen Teilchen die Bewegungen der Wasserteilchen, an welchen sie teilnehmen, sichtbar machen. Es ergab sich, daß die Wasserteilchen in der durch die Fortpflanzungsrichtung gelegten Vertikalebene krummlinige Bahnen beschreiben, die an der Oberfläche Kreise, nach der Tiefe zu Ellipsen mit immer kleinerem vertikalem Durchmesser sind.

In Fig. 264 I mögen die Kreise 0 bis 12 die Bahnen von 13 Wasserteilchen vorstellen, welche im Ruhezustand gleichweit voneinander entfernt im horizontalen Wasserspiegel liegen. Wir betrachten die Lagen sämtlicher Teilchen in dem Augenblick, in welchem das Teilchen bei 0, nachdem es einen ganzen Umlauf vollendet hat und im Niveau wieder angekommen ist, sich gerade anschickt, einen zweiten Umlauf zu beginnen. Hat sich während der Dauer des ersten Umlaufs die Bewegung bis zum Teilchen 12 fortgepflanzt, so ist dieses gerade im Begriff, seinen ersten Umlauf anzutreten, d. h. es ist um einen ganzen Umlauf hinter der Bewegung des Teilchens 0 zurück. Das Teilchen 1 ist alsdann, weil

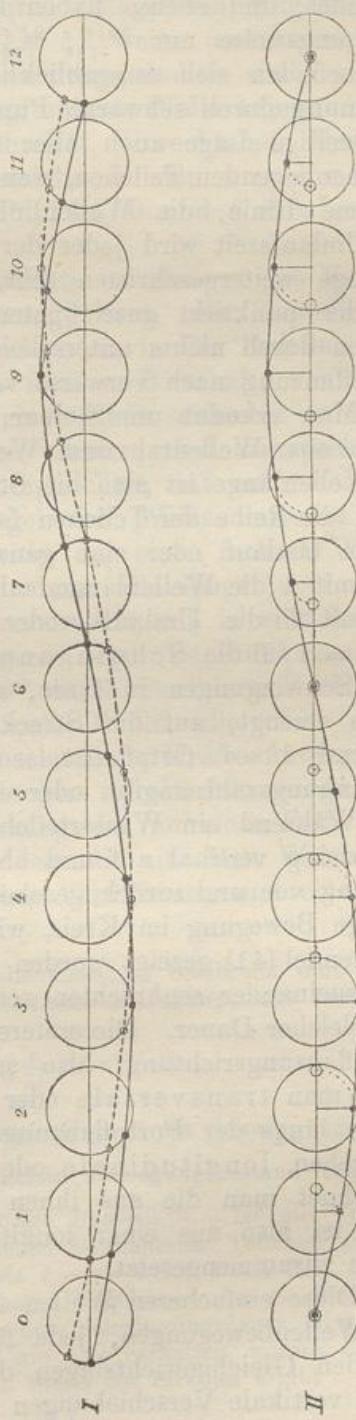


Fig. 264.
Entstehung fortschreitender Wellen.

sein Abstand von 0 zwölfmal kleiner ist, auch nur um $\frac{1}{12}$ Umlauf gegen das Teilchen 0 zurückgeblieben, hat also $\frac{11}{12}$ seines Umlaufs vollendet, und ebenso haben die Teilchen 2, 3, 4 ... gleichzeitig, beziehungsweise nur $\frac{10}{12}, \frac{9}{12}, \frac{8}{12} \dots$ ihres Umlaufs ausgeführt, und befinden sich augenblicklich in den Stellungen, welche in der Zeichnung durch schwarze Punkte angegeben sind. Wir finden die gleichzeitige Lage auch aller in der Zeichnung nicht angegebenen zwischenliegenden Teilchen, wenn wir diese Punkte durch eine stetige krumme Linie, die Wellenlinie, verbinden. Nach einem Zwölftel der Umlaufszeit wird jeder der Punkte um ein Zwölftel des Kreisumfangs weitergeschritten sein, und sämtliche Punkte liegen jetzt auf der punktiert gezeichneten Wellenlinie, welche sich von der vorigen durch nichts unterscheidet, als daß sie in der Richtung der Fortpflanzung nach vorwärts verschoben ist.

Man erkennt unmittelbar, daß während der Umlaufszeit eine ganze aus Wellental und Wellenberg bestehende Welle entsteht; die Wellenlänge ist also die Strecke, um welche sich die Bewegung durch die Reihe der Teilchen fortpflanzt, während ein Teilchen einen ganzen Umlauf oder eine ganze Schwingung vollendet. Bezeichnet man mit λ die Wellenlänge, mit V die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und mit T die Umlaufs- oder Schwingungsdauer, so ist $\lambda = V T$. Ist $n = 1/T$ die Schwingungszahl, d. h. die Anzahl der Umläufe oder Schwingungen in 1 sec, so müssen, da jede Schwingung eine Welle erzeugt, auf die Strecke V , um welche sich die Bewegung während 1 sec fortpflanzt, soviele Wellenlängen gehen, als die Schwingungszahl angibt, oder es ist $V = n \lambda$.

Während ein Wasserteilchen seinen Kreis beschreibt, wird es gleichzeitig vertikal auf und ab und horizontal in der Fortpflanzungsrichtung vor und zurück geschoben. Man kann in der Tat die gleichförmige Bewegung im Kreis, wie schon beim kreisförmig schwingenden Pendel (41) gezeigt worden ist, als zusammengesetzt ansehen aus zwei zueinander senkrechten geradlinigen pendelartigen Schwingungen von gleicher Dauer. Die erstenen Schwingungen, welche senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung, also senkrecht zum Wellenstrahl erfolgen, nennt man transversale oder Querschwingungen, die letzteren, welche längs der Fortpflanzungsrichtung, also im Strahle selbst, vor sich gehen, longitudinale oder Längsschwingungen, und ebenso bezeichnet man die aus ihnen bestehenden Wellen. Eine Wasserwelle ist also aus einer longitudinalen und aus einer transversalen Welle zusammengesetzt.

Diese einfacheren Wellen können aber auch, bei anderen Arten von Wellenbewegungen, jede für sich allein auftreten. Trägt man von den Gleichgewichtslagen der Teilchen in Fig. 264 II aus bloß deren vertikale Verschiebungen nach ab- und aufwärts auf, so erhält man das Bild einer transversalen Welle, und behält man bloß die Verschiebungen in horizontaler Richtung bei, dasjenige einer longitudinalen Welle. Da bei letzterer kein Teilchen aus der Richtung

des Strahles heraustritt, so gibt es bei den longitudinalen Wellen keine Wellenform, keine Berge und Täler; man bemerkt aber leicht, daß die in Fig. 264 II durch Ringelchen angedeuteten Teilchen von 0 bis 3 und von 9 bis 12 weiter auseinander gerückt, zwischen 3 und 9 enger zusammengeschoben sind, als sie es im Ruhezustande waren. Eine longitudinale Welle bringt also in dem Mittel, durch welches sie fortschreitet, abwechselnde Verdichtungen und Verdünnungen hervor, welche in den um eine halbe Wellenlänge voneinander entfernten Punkten 0 und 6 ihre größten Werte erreichen.

Die Machsche Wellenmaschine brachte bei dem obigen Versuch eine transversale Welle zur Anschauung; denn alle Pendelkugeln schwingen senkrecht zu der Linie, welche sie in der Ruhelage einnehmen. Auch die Seilwellen, die man z. B. erhält, wenn man einen langen Kautschukschlauch am einen Ende senkrecht zu seiner Länge mit der Hand in Schwingungen versetzt, sind transversal. — Der Machsche Wellenapparat ist so eingerichtet, daß man, nachdem die Schwingungen in der dort angegebenen Weise angeregt sind, sämtliche Schwingungsebenen gleichzeitig um einen rechten Winkel drehen kann; die Kugeln schwingen dann alle längs jener Linie, und die vorher transversale Welle verwandelt sich in eine longitudinale mit abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen. In Fig. 264 II ist diese Drehung um 90° durch punktierte Kreisbögen angedeutet. Eine wirklich longitudinale Welle, die nicht durch äußere Veranstaltung, sondern durch elastische Kräfte fortgepflanzt wird, erhält man, wenn man einem langen spiralförmig gewundenen Draht, der an Fäden horizontal aufgehängt ist, am einen Ende einen Stoß in der Längsrichtung erteilt; indem die einzelnen Windungen hin- und herschwingen, sieht man eine Verdichtung und eine Verdünnung die Spirale entlang laufen.

Jedes Pendelchen der Machschen Wellenmaschine beschreibt eine Sinusschwingung um seine Ruhelage (20), also eine Bewegung, die durch die Formel

$$y = a \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

darstellbar ist. Darin bedeutet a die Amplitude, T die Schwingungsdauer; den Ausdruck $\frac{2\pi t}{T}$, der den augenblicklichen Bewegungszustand bestimmt, nennt man die Phase und t die zugehörige Phasenzzeit. Ist ein Teilchen in der Richtung des Strahles von dem soeben betrachteten Teilchen um die Strecke x entfernt, so ist seine Phasenzzeit $t - \tau$, wenn τ die Zeit ist, in welcher sich die schwingende Bewegung um x fortpflanzt. Da die Bewegung durch die Reihe der Teilchen während einer Schwingungsdauer T um die Wellenlänge λ fortschreitet, muß sich $\tau : T$ wie $x : \lambda$ verhalten, woraus sich für die Ausweichung an der durch x gegebenen Stelle des Strahles ergibt

$$y = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right).$$

Diese Gleichung gibt für jeden bestimmten Wert von x die im Laufe der Zeit erfolgenden Ausweichungen des daselbst liegenden Teilchens und für

jeden bestimmten Wert von t die in diesem Augenblick stattfindende Lage aller längs des Strahles aufeinander folgenden Teilchen, also die Gestalt der transversalen Welle (Sinusoide); man nennt sie daher geradezu die Gleichung eines Wellenstrahles. Sie gilt übrigens ebenso gut für eine longitudinale Welle, da diese aus der transversalen durch bloße Drehung der Schwingungsrichtung um 90° ohne Änderung der Ausweichung hervorgeht (vgl. Fig. 263 II). Die Ausweichung y ist sowohl in bezug auf t als in bezug auf x periodisch; läßt man bei unverändertem x die Zeit t um T , oder bei unverändertem t die Strecke x um λ zunehmen, so durchläuft y die ganze Periode seiner zwischen $-a$ und $+a$ liegenden Werte.

Betrachten wir die beiden Teilchen, welche augenblicklich die Gipfel zweier aufeinander folgenden Wellenberge einnehmen, so finden wir beide gerade im Begriff, aus dieser ihrer höchsten Lage nach abwärts zu gehen; diese beiden Teilchen, welche offenbar um eine Wellenlänge voneinander abstehen, befinden sich also in dem nämlichen Schwingungszustand (in der nämlichen Phase). Dasselbe gilt überhaupt von je zwei Teilchen, welche um eine oder mehrere ganze Wellenlängen voneinander entfernt sind; ihre Bewegungen erfolgen in völliger Übereinstimmung. Nehmen wir dagegen zwei Teilchen, welche um eine halbe Wellenlänge voneinander abstehen, von denen z. B. das eine auf dem Gipfel eines Wellenbergs, das andere in der Tiefe des benachbarten Wellentals liegt, so sind diese in gerade entgegengesetzten Schwingungszuständen. Während nämlich das erste aus seiner höchsten Lage nach abwärts zu gehen beginnt, ist das zweite im Begriff, aus seiner tiefsten Lage nach aufwärts zu gehen. Überhaupt sieht man ein, daß die Bewegungen zweier Teilchen, deren Abstand voneinander eine halbe Wellenlänge oder ein ungerades Vielfaches einer halben Wellenlänge beträgt, zueinander in vollkommenem Gegensatz stehen.

285. Interferenz. Wirft man zwei Steine in einiger Entfernung voneinander in ruhiges Wasser, so entstehen zwei gleiche Wellensysteme, welche bei ihrer weiteren Ausbreitung sich durchkreuzen; wo dies geschieht, sehen wir die Oberfläche von einem zierlichen Netzwerk kleiner Erhöhungen und Vertiefungen bedeckt, welche durch das Zusammenwirken oder durch die Interferenz der beiden Wellensysteme entstehen. An allen Stellen nämlich, wo zwei Wellenberge zusammentreffen, erhebt sich das Wasser zu doppelter Höhe, und wo zwei Wellentäler sich durchkreuzen, senkt es sich zu doppelter Tiefe. An jenen Stellen dagegen, wo ein Wellenberg mit einem Wellental zusammentrifft, wird das Wasser auf seine ursprüngliche Höhe, die es im Ruhezustand einnimmt, zurückgeführt, d. h. hier heben sich die beiden Wellenbewegungen gegenseitig auf. Überhaupt erleidet in einem Mittel, welches von zwei oder beliebig vielen gleichen oder ungleichen Wellensystemen mit kleinen Ausweichungen bewegt wird, jedes Teilchen eine Verschiebung, welche die Summe aus allen ihm durch die einzelnen Wellensysteme in dem nämlichen Augenblick mitgeteilten Verschiebungen ist. Um diese Summe zu bilden, muß man alle Hebungen zusammenzählen,