

Fachschule Datenelektronik

FTE1 - Physik

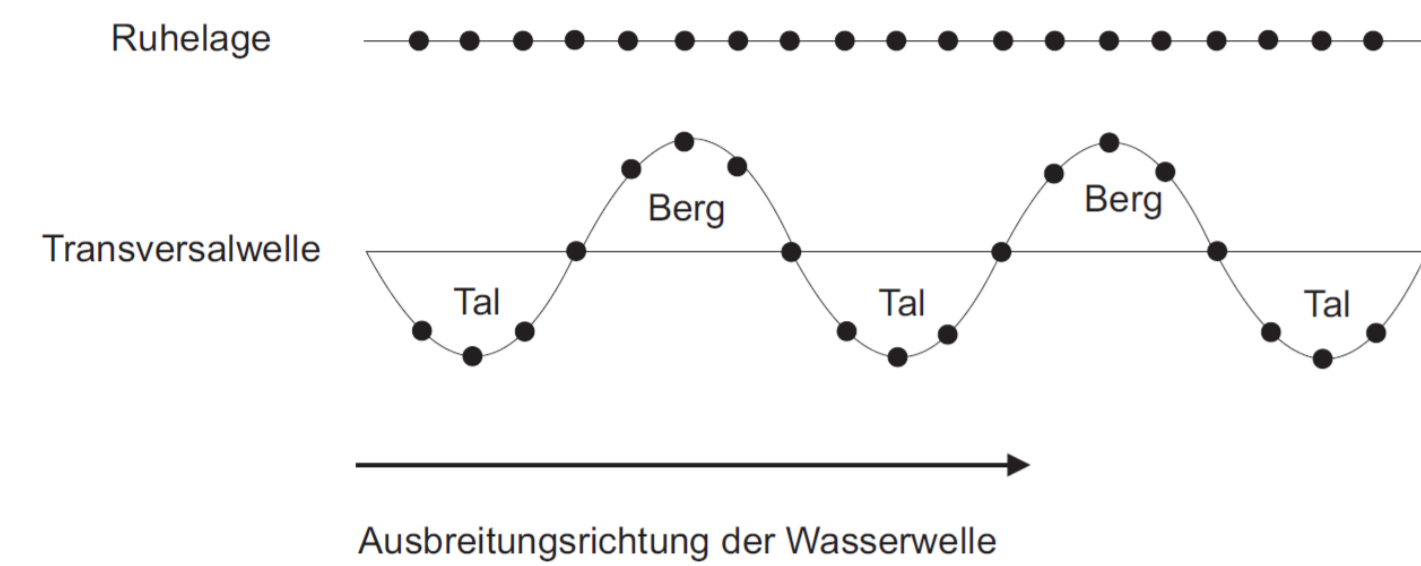
Schwingungen & Wellen

Was sind Wellen?

Unter einer Welle versteht man eine sich räumlich ausbreitende Störung. Beispiele sind die kreisförmigen Wellen, die sich nach dem Wurf eines Steins ins Wasser ausbreiten oder das horizontale Auslenken eines Seiles bzw. eines Slinky

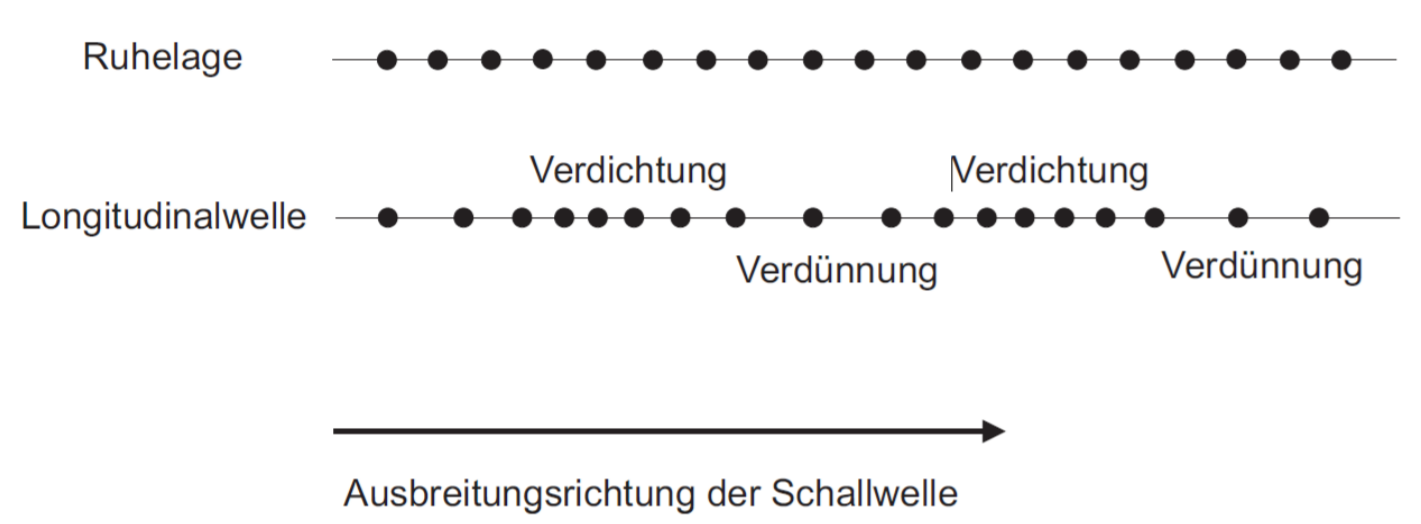
Klatschen wir einmal in die Hände oder lassen einen Luftballon platzen, so breitet sich eine einmalige Störung in Form einer Druckwelle durch die Luft aus. Eine Störung kann aber auch ein periodischer Vorgang sein, wie beim periodischen Auslenken eines Seilendes, rhythmischen Klatschen oder Singen eines Tones. Eine solche periodische Welle lässt sich durch sogenannte Berge und Täler (Wasserwelle, Seilwelle) bzw. Verdichtungen und Verdünnungen der Luft bei Schallwellen beschreiben.

Im Folgenden betrachten wir eine Kette von Bojen auf einem See, die sich alle voneinander im gleichen Abstand befinden. Ist die Wasseroberfläche glatt (oder auch „ungestört“), liegen die Bojen alle bewegungslos auf dem Wasser und man spricht davon, dass sie sich in Ruhelage befinden. Breitet sich jedoch eine Wasserwelle auf dem See aus, bewegen sich die Bojen auf ihren Plätzen auf und ab. Die Kette der Bojen beschreibt eine Abfolge von Bergen und Tälern.



Eine solche Störung, die senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung im Medium erfolgt, nennt man eine Querwelle oder auch Transversalwelle. Beispiele dafür sind die schon betrachteten Wasser- und Seilwellen.

Erfolgt die Störung jedoch in Ausbreitungsrichtung, so spricht man von einer Längswelle oder auch Longitudinalwelle. Eine solche Longitudinalwelle kann man z.B. auf dem Bahnhof beobachten: Ein Zug aus mehreren lose miteinander verbundenen Wagen, die sich alle im gleichen Abstand voneinander befinden, steht auf einem Gleis (Ruhelage). Wird dieser Zug nun durch eine Lokomotive leicht angestoßen, so breitet sich dieser Stoß durch die gesamte Reihe der Wagen bis zum letzten Wagen aus. Die Wagen sind mal dichter beieinander (Verdichtung) und mal weiter voneinander entfernt (Verdünnung). Genauso kann man sich die Ausbreitung einer Schallwelle, die durch einen schwingenden Gegenstand (z.B. eine Lautsprechermembran) entsteht, in Luft vorstellen: die sich zu Beginn in Ruhe befindenden Luftmoleküle werden durch eine Schallwelle immer wieder zusammengedrückt und auseinandergezogen und somit verdichtet bzw. verdünnt sich die Luft



Erzeugung von Wellen

Ausbreitung einer Welle: Mechanische und elektromagnetische Wellen werden durch periodische Schwingungen erzeugt. Ein einfaches Beispiel ist ein schwingendes Pendel - an einem solchen Pendel befindet sich zum Beispiel ein Stift unter dem ein Blatt Papier mit konstanter Geschwindigkeit hergezogen wird. Der am Pendel befestigte Stift beschreibt nun auf dem Papierstreifen, der das Ausbreitungsmedium darstellt, eine sinusförmige Welle. Bei diesem Beispiel ist die Wellenlänge abhängig von der Geschwindigkeit, mit der der Papierstreifen bewegt wird. Die Amplitude der Welle wird durch den maximalen Pendelausschlag bestimmt.

Elektromagnetische Wellen können durch sogenannte Schwingkreise erzeugt werden, bei denen der Strom zwischen einer Spule und einem Kondensator hin und her fließt. Die Energie wird dabei periodisch von elektrischer Energie (Kondensator) in magnetische Energie (Spule) umgewandelt. Geschieht dies schnell genug, wird die Energie in Form einer elektromagnetischen Welle abgegeben. Dieser Effekt ist vor allem in der drahtlosen Kommunikation von besonderer Bedeutung.

Überlagerung von Wellen – Interferenz

In der Natur vorkommende Wellen sind in den seltensten Fällen reine monochromatische Wellen, sondern eine Überlagerung aus vielen Wellen unterschiedlicher Wellenlängen. Die Überlagerung erfolgt dabei durch das Superpositionsprinzip, was mathematisch bedeutet, dass alle Wellenfunktionen der einzelnen Wellen addiert werden. Die Anteile der Wellenlängen werden als **Spektrum** bezeichnet.

Beispiele:

- Sonnenlicht ist eine Überlagerung aus elektromagnetischen Wellen. Das Spektrum umfasst einen Wellenlängenbereich von Infrarot über sichtbares Licht bis Ultraviolett. Derartige Spektren bezeichnet man auch als **kontinuierlich**.
- Ein Musikton eines Instrumentes setzt sich zusammen aus einem Grundton und mehreren Oberschwingungen. Die unterschiedlichen Anteile an Oberschwingungen sind der Grund warum eine Posaune anders klingt als eine Flöte. Ein solches Spektrum heißt **diskret**, da es sich nur aus einzelnen, klar abgetrennten Wellenlängen zusammensetzt.

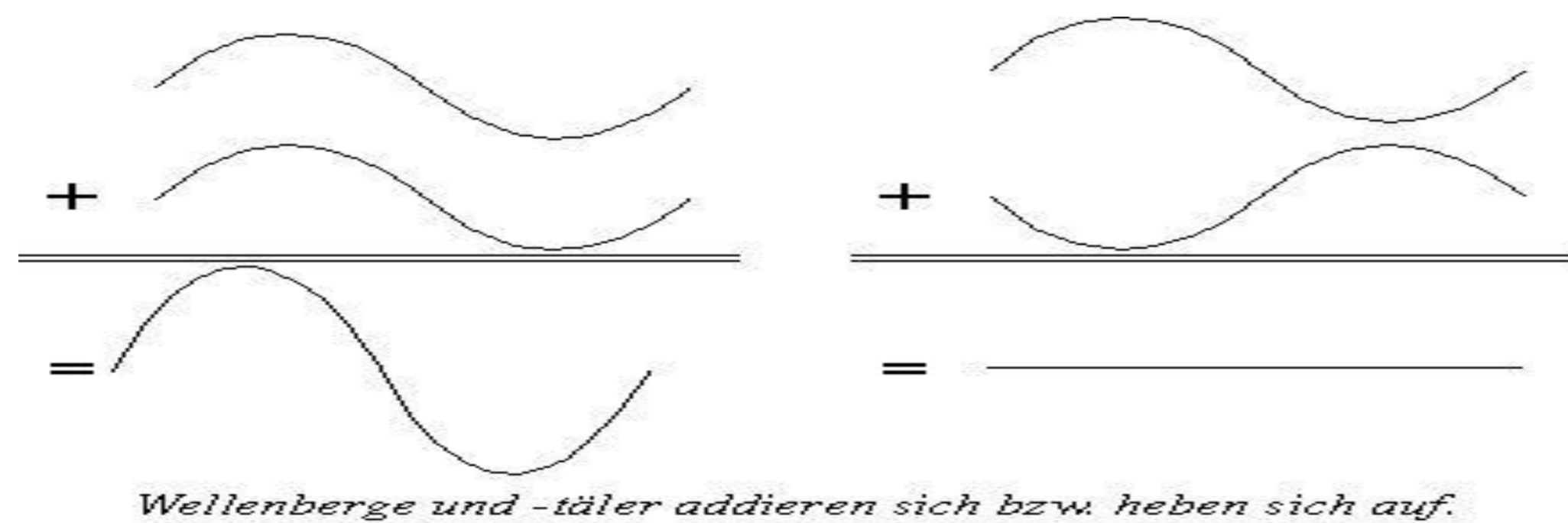
Dabei können verschiedene Effekte auftreten:

- Interferenz – Überlagert man Wellen, so kann es zu einer konstruktiven Verstärkung, aber auch zu einer teilweisen oder gar totalen Auslöschung der Welle (wenn beide Wellenlängen und Frequenzen gleich sind und die Wellen genau gegenläufig schwingen) kommen. Dieses Phänomen spielt im Alltag beim Radio eine Rolle – benachbarte Funkzellen strahlen einen Sender auf verschiedenen Frequenzen aus, um Interferenzen im Überlappungsbereich zu vermeiden.

- Stehende Welle – Bei Überlagerung zweier sich gegenläufig ausbreitender Wellen derselben Frequenz und Amplitude kommt es zur Ausbildung von stehenden Wellen. Diese breiten sich nicht aus, sondern bilden räumlich konstante Schwingungsmuster: An den sogenannten **Bewegungsbücheln** schwingen sie mit der verdoppelten Amplitude und der ursprünglichen Frequenz, an den dazwischenliegenden **Bewegungsknoten** ist die Amplitude zu allen Zeiten Null. Diese Erscheinung ist ein Sonderfall der Interferenz. Sie tritt insbesondere vor einer reflektierenden Wand auf oder auch zwischen zwei passend abgestimmten Wänden, die gemeinsam einen Resonator bilden.

- Schwebung – Eine Überlagerung zweier Wellen von benachbarter Frequenz führt zu einer Schwebung. Die Amplitude einer solchen Welle nimmt periodisch zu und ab – je näher die Frequenzen beieinander liegen, desto (zeitlich) langsamer geschieht dieser Vorgang. Dieser Effekt wird beispielsweise beim Stimmen von Musikinstrumenten ausgenutzt. Man findet Schwebungen auch bei älteren Telefonapparaten, die einen Wecker mit 2 Glockenschalen haben. Diese Schwebung empfindet der Mensch als angenehm.

- Wellenpaket – Die Überlagerung von Wellen mit allen Frequenzen aus einem Intervall erzeugt ein Wellenpaket. Hierbei zeigt die Einhüllende der Welle nur einen einzelnen Berg, vor und hinter diesem ist die Amplitude Null. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle – insbesondere in Medien – häufig frequenzabhängig ist, laufen solche Wellenpakete mit fortschreitender Zeit auseinander. Bei der Nachrichtenübermittlung mit Lichtpulsen über Glasfaserkabel muss dieses berücksichtigt werden.



Wellenberge und -täler addieren sich bzw. heben sich auf.

Longitudinalwelle

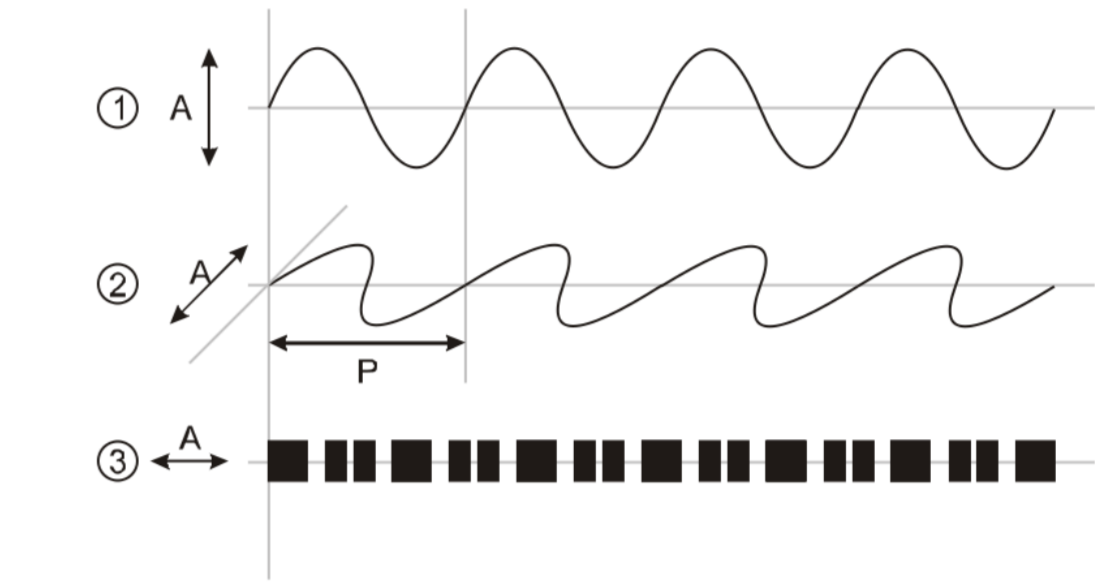
Wellen, die parallel zur Ausbreitungsrichtung schwingen, werden als Longitudinal- oder Längswelle bezeichnet. Ein wichtiges Beispiel ist der Schall, der sich in Gasen und Flüssigkeiten immer als Longitudinalwelle ausbreitet.

Mechanische Longitudinalwellen sind Druckwellen. Das bedeutet, dass sich in einem Medium Zonen mit Überdruck bzw. Druckschwingung (bzw. Unterdruck oder Zugspannung) in der Ausbreitungsrichtung fortpflanzen bzw. verschieben oder ausbreiten. Die einzelnen Teilchen im Ausbreitungsmedium, Atome oder Moleküle, schwingen hierbei in Richtung der Ausbreitung um den Betrag der Amplitude hin und her. Nach dem Durchlauf der Schwingung bewegen sich die Teilchen wieder an ihre Ruhelage, die Gleichgewichtslage, zurück.

Die Leistung einer Longitudinalwelle ist proportional zum Quadrat der Amplitude oder der Druckschwingung, siehe auch Schalldruck und Schallschnelle. Longitudinalwellen haben im gleichen festen Medium eine höhere Geschwindigkeit als Transversalwellen des gleichen Typs bei ansonsten gleichen Parametern.

Transversalwelle

Wellen, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingen, werden als Transversal-, Quer-, Schub- oder Scherwellen bezeichnet. Nur Transversalwellen können polarisiert sein. Beispiele sind elektromagnetische Wellen, Gravitationswellen, Biege- und Plasmawellen. Schall im Festkörper und seismische Wellen können sich bei geeigneter Materialbeschaffenheit als Transversalwelle fortpflanzen und Wasserwellen sind eine Mischform aus Longitudinal- und Transversalwellen.



Mathematische Beschreibung

Bezeichnung Symbol Beziehungen Amplitude A_0 $A_0 \perp k$ Transversalwelle $A_0 \parallel k$ Longitudinalwelle Wellenvektor k Ausbreitungsrichtung Wellenzahl k $k = |k|$ Wellenlänge λ $\lambda = 2\pi/k$ Kreisfrequenz ω $\omega(k)$ Dispersionsrelation Frequenz f $f = \omega/2\pi$ Phasengeschwindigkeit c $c = \omega/k = \lambda f$ Gruppengeschwindigkeit v_G $v_G = d\omega/dk$ Phase φ $\varphi = k \cdot r - \omega t$

Wellenfunktion

Mathematisch spricht man von einer Welle, wenn die Wellenfunktion $A(r, t)$, also die die Welle mathematisch beschreibende Gleichung, eine Lösung einer Wellengleichung ist. Diese Funktionen hängen im Allgemeinen von Ort r und Zeit t ab. Dabei gibt die Auslenkung A am Ort r zur Zeit t an. Funktionen dieses Typs entsprechen der Vorstellung, dass Wellen räumlich ausgedehnte Schwingungen sind. Eine allgemeine Funktion für jede Art von Welle anzugeben, ist dabei nicht ohne weiteres möglich. Häufig werden daher sehr einfache Lösungen der Wellengleichung herangezogen und die reale Welle als eine Überlagerung von vielen dieser Lösungen angesehen. Die gebräuchlichsten Elementarlösungen sind die Ebene Welle und die Kugelwelle.

Amplitude

Die Amplitude ist die maximale mögliche Auslenkung der Welle. Sie ist bei Wellen – im Gegensatz zu Schwingungen – eine vektorielle Größe, da neben der Stärke der Auslenkung auch deren Richtung entscheidend ist. Ist die Ausbreitungsrichtung parallel zur Amplitude, handelt es sich um eine Longitudinalwelle, ist sie senkrecht, um eine Transversalwelle. In beiden Fällen ist die Intensität der Welle proportional zum Quadrat der Amplitude.

Phase

Die Phase einer Welle gibt an, in welchem Abschnitt innerhalb einer Periode sich die Welle zu einem Referenzzeitpunkt und -ort befindet. Sie legt also fest, wie groß die Auslenkung ist. Im Beispiel einer ebenen Welle ist die Phase $r - \omega t$ zum Zeitpunkt t am Ort r . Die Phase hängt also von den zwei Parametern Wellenvektor und Kreisfrequenz ω ab.

Bezeichnung	Symbol	Beziehungen
Amplitude	A_0	$A_0 \perp k$ Transversalwelle $A_0 \parallel k$ Longitudinalwelle
Wellenvektor	k	Ausbreitungsrichtung
Wellenzahl	k	$k = k $
Wellenlänge	λ	$\lambda = 2\pi/k$
Kreisfrequenz	ω	$\omega(k)$ Dispersionsrelation
Frequenz	f	$f = \omega/2\pi$
Phasengeschwindigkeit	c	$c = \omega/k = \lambda f$
Gruppengeschwindigkeit	v_G	$v_G = d\omega/dk$
Phase	φ	$\varphi = k \cdot r - \omega t$

Als **elektromagnetische Welle** bezeichnet man eine Welle aus gekoppelten elektrischen und magnetischen Feldern. Dazu gehören Radiowellen, Licht und Gammastrahlung. Die Wechselwirkung elektromagnetischer Wellen mit Materie hängt von ihrer Frequenz ab, die über viele Größenordnungen variieren kann. Entsprechend unterscheiden sich die Quellen, Ausbreitungseigenschaften und Wirkungen der Strahlung in den verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums.

Anders als zum Beispiel Schallwellen, benötigen elektromagnetische Wellen *kein* Medium, um sich auszubreiten. Sie pflanzen sich im Vakuum unabhängig von ihrer Frequenz mit Lichtgeschwindigkeit fort.

Als Transversalwellen zeigen elektromagnetische Wellen das Phänomen der Polarisation. Im freien Raum stehen die Vektoren des elektrischen und des magnetischen Feldes senkrecht aufeinander und auf der Ausbreitungsrichtung.

Elektromagnetische Wellen verhalten sich immer auch wie Teilchen (siehe Welle-Teilchen-Dualismus). Diese nennt man Photonen. Welches Verhalten bei einem Experiment mehr in den Vordergrund tritt, hängt davon ab, ob die Wellenlänge größer oder kleiner als die „charakteristische Ausdehnung“ (etwa eine Spaltbreite oder der Wirkungsquerschnitt oder die Ortsunschärfe beteiligter Teilchen) des Versuches ist.

Wellencharakter

Physikalisch betrachtet handelt es sich bei elektromagnetischen Wellen um sich ausbreitende Schwingungen des elektromagnetischen Feldes. Hierbei stehen elektrisches und magnetisches Feld bei linear polarisierten Wellen senkrecht aufeinander und haben ein festes Größenverhältnis. Dieses ist gerade durch die Wellenimpedanz gegeben. Insbesondere verschwinden elektrisches und magnetisches Feld an denselben Orten zur selben Zeit, so dass die häufig gelesene Darstellung, dass sich elektrische und magnetische Energie zyklisch ineinander umwandeln, im Fernfeld *nicht* richtig ist. Sie stimmt allerdings zum Beispiel für das Nahfeld eines elektromagnetischen Wellen erzeugenden elektrischen Dipols oder Schwingkreises. Die Entstehung elektromagnetischer Wellen erklärt sich aus den Maxwell'schen Gleichungen: Die zeitliche Änderung des elektrischen Feldes ist stets mit einer räumlichen Änderung des magnetischen Feldes verknüpft. Ebenso ist wiederum die zeitliche Änderung des magnetischen Feldes mit einer räumlichen Änderung des elektrischen Feldes verknüpft. Für periodisch (insbesondere sinusförmig) wechselnde Felder ergeben diese Effekte zusammen eine fortschreitende Welle.

Beispiele für Experimente, in denen der Wellencharakter zum Tragen kommt:

Erscheinungen wie Kohärenz und Interferenz lassen sich nur mit dem Wellenmodell erklären, weil die Mindestabmessungen der entsprechenden Versuche deutlich größer sind als die Wellenlänge

des Lichts.

Man könnte die von Rundfunksendern emittierte Strahlung als sehr große Anzahl von Photonen betrachten. Es gibt allerdings kein Messgerät, das derart energiearme Photonen einzeln nachweisen könnte. Es ist auch deshalb nicht zielführend, hier das Teilchenmodell zur Erklärung von Effekten heranzuziehen. Da die Antennen etwa die Größe der Wellenlänge haben, muss man für alle physikalischen Erklärungen die Welleneigenschaft der Strahlung betrachten.

Teilchencharakter

Für bestimmte Eigenschaften elektromagnetischer Wellen (z. B. Photoelektrischer Effekt), genügt das oben beschriebene Wellenmodell nicht mehr, um alle beobachtbaren Phänomene zu beschreiben, vielmehr treten die Teilcheneigenschaften einzelner Photonen, der Quanten des elektromagnetischen Feldes, in den Vordergrund. Der Wellencharakter (etwa Interferenz) bleibt aber voll erhalten. Man spricht deshalb vom Dualismus von Teilchen und Welle.

Im Rahmen dieser Teilchenvorstellung des Lichtes wird jeder Frequenz f die Energie eines einzelnen Photons zugeordnet, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum ist. Andererseits haben auch Teilchen, wie zum Beispiel über mehrere Atome hinweg bewegte Elektronen, Welleneigenschaften (siehe auch Elektrischer Strom). Beide Aspekte elektromagnetischer Wellen werden theoretisch im Rahmen der Quantenelektrodynamik erörtert.

Beispiele für Wirkungen, in denen der Teilchencharakter zum Tragen kommt:

Beim Compton-Effekt trifft eine elektromagnetische Welle mit etwa 20 pm Wellenlänge auf ein Elektron, dessen Wirkungsquerschnitt um etwa drei Größenordnungen kleiner ist. Zur Erklärung des physikalischen Ablaufes der Wechselwirkung muss also der Teilchencharakter des Lichtes herangezogen werden. Jeder Versuch, die beobachtete Änderung der Wellenlänge mit dem Wellenmodell zu erklären, scheitert.

Beim photoelektrischen Effekt ist das Verhältnis der Wellenlänge zum Wirkungsquerschnitt eines Elektrons noch größer. Also kann auch hier das Wellenmodell nichts zur Erklärung beitragen. Im Gegenteil – es führt zu offensichtlichen Widersprüchen. Die Erzeugung von Laserlicht beruht auf den Eigenschaften einzelner Atome, die jeweils erheblich kleiner sind als die erzeugte Wellenlänge. Deshalb muss man für die Erklärung der Herstellung auf das Photonenmodell zurückgreifen.

Photonen mit genügender Energie (etwa von einigen Elektronvolt aufwärts) wirken auf Materie ionisierend und können chemische (photochemische) Wirkungen auslösen, wenn die Bindungsenergien überschritten werden (Fotochemie). Diese chemische Wirksamkeit wird gelegentlich als Aktivität bezeichnet.

Autoren: Sven MAIER, Marco Hesse – FTE1 2010/11

Das für den Menschen sichtbare Spektrum (Licht)

