

Vorbereitung für Kapitel 1: (LICHT)WELLEN

Licht macht hell ...

... indem es bei der Lichtquelle startet, mit Lichtgeschwindigkeit läuft, gespiegelt, gebrochen und sonst abgelenkt am Schluss im Auge oder einem anderen Lichtempfänger ankommt. Zur Erzeugung von Licht braucht es Energie; wenn das Licht verwandelt wird, auf der Haut, im grünen Blatt, in der Digitalkamera, in der Photovoltaikanlage usw. wird diese Energie frei. Die arabischen Optiker dachten noch, das Licht ginge von Auge aus. Galilei fragte als erster, ob das Licht unendlich schnell sei. Der Däne Olav Römer konnte durch Beobachtung der Jupitermonde herausfinden, dass Licht sich im leeren Raum mit $c = 300'000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ bewegt. In Wasser, Glas usw. ist es langsamer.

Lichtstrahlen

Im Schattenwurf wird die geradlinige Ausbreitung sichtbar. Mit dem einfachen **Modell des Lichtstrahls** arbeitet man in der geometrischen. Newton erdachte um 1700 ein **Teilchenmodell** fürs Licht. So konnte er die Spiegelung gleich erklären wie das Springen der Pingpong-Bälle. Dass aber Sonnenlicht im Regenbogen oder in Seifenblasen Farben zum Vorschein bringt, lässt sich so schlecht erklären. Um 1800 nahm der Arzt und Universalgelehrte Thomas Young, der auch die Dreifarbenlehre des Sehens aufstellte, die schon früher geäußerte Idee, Licht sei wellenartig, wieder auf.

Seilwellen, Wasserwellen, Erdbebenwellen, Schallwellen ...

... besitzen Gemeinsamkeiten, die wir an den Wasserwellen am besten erkennen: Sie sind räumlich und zeitlich periodisch. Im Bild einer idealen Welle kommt nach einer **Wellenlänge λ** wieder das Gleiche. Und an einem bestimmten Ort kommt nach einer gewissen Zeit, der **Schwingungs-** oder **Periodendauer T** , wieder die gleiche Bewegung. Wenn wir in Gedanken einen Wellenberg verfolgen, erhalten wir für seine Geschwindigkeit $v = s/t = \lambda/T = c$. Dies gilt für alle Wellen. Praktisch ist der Begriff **Frequenz f** mit $f = 1/T$ und der Masseinheit Hertz. Für **alle Wellen gilt: $c = \lambda/T = \lambda \cdot f$** .



(1) Daten für eine Wasserwelle könnten sein: $\lambda = 0.5 \text{ m}$ und $c = 0.2 \text{ m/s}$. Dann ist $T = \lambda/c = 0.25 \text{ s}$ und für die Frequenz gilt $f = 1/0.25 \text{ s} = 4 \text{ Hz}$. - (2) Daten für eine Schallwelle: $f = 400 \text{ Hz}$ und $c = 300 \text{ m/s}$. Dann ist $T = 1/f = 2.5 \text{ ms}$ (Millisekunden) und für die Wellenlänge gilt $\lambda = c \cdot T = 300 \text{ m/s} \cdot 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ s} = 0.75 \text{ m} \approx \text{Saitenlänge}$. - (3) Alle elektromagnetischen Wellen (Seite 2) laufen mit $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

(1) Daten für eine Wasserwelle könnten sein: $\lambda = 0.5 \text{ m}$ und $c = 0.2 \text{ m/s}$. Dann ist $T = \lambda/c = 0.25 \text{ s}$ und für die Frequenz gilt $f = 1/0.25 \text{ s} = 4 \text{ Hz}$. - (2) Daten für eine Schallwelle: $f = 400 \text{ Hz}$ und $c = 300 \text{ m/s}$. Dann ist $T = 1/f = 2.5 \text{ ms}$ (Millisekunden) und für die Wellenlänge gilt $\lambda = c \cdot T = 300 \text{ m/s} \cdot 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ s} = 0.75 \text{ m} \approx \text{Saitenlänge}$. - (3) Alle elektromagnetischen Wellen (Seite 2) laufen mit $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Auslöschung und Verstärkung durch Überlagerung sind Welleneigenschaften

Thomas Young war auch Sprachforscher - er entzifferte das Demotische auf dem Stein von Rosette - und Physikprofessor. Zur Demonstration von Welleneigenschaften erfand er die Wasserwellenwanne.

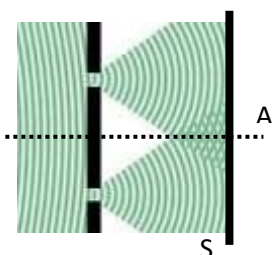


Wellen können sich ungestört durchdringen, wie man an jedem Hafen beobachten kann. Dabei kann eine Ente in Ruhe bleiben, weil gleichzeitig von irgendwo ein Wellenberg und von anderswo ein Wellental eintrifft: So heben sich zwei Wellen für einen Moment an einem Ort in ihrer Wirkung auf. Zwei Wellen können sich aber auch verstärken, wenn Wellenberge und -täler gleichzeitig eintreffen. Die Überlagerung von Wellen bezeichnet man generell als **Interferenz** (lat. *inter* = „zwischen“ und *ferire* = „sich gegenseitig schlagen“).

Die Foto macht deutlich, wie der grüne und ein weiterer Ball gleichzeitig Wellen erzeugen. An gewissen Stellen treffen gleichzeitig ständig Wellenberge vom einen und Wellentäler vom anderen Ball zusammen und gleichen sich aus: **Auslöschung** oder **destruktive Interferenz**. An anderen Stellen treffen abwechselungsweise immer Berge und Täler von beiden Bällen zusammen und verstärken sich: **konstruktive Interferenz**. Das Interferenzmuster (räumlich regelmässiges Auftreten von destruktiver und konstruktiver Interferenz) kann unmöglich anders als von Wellen erzeugt erklärt werden.

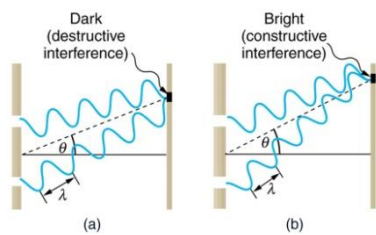
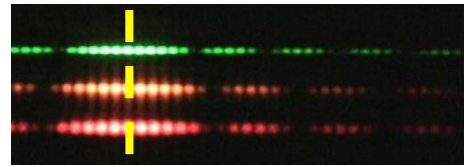
Das Doppelspaltexperiment, das sogenannte *experimentum crucis*

Thomas Young machte das, was er mit Wasserwellen gezeigt hatte, nun mit Licht. Er nahm einen Blechschirm mit zwei schmalen, parallelen Spalten und sandte Licht darauf. Im Bild ist - von oben blickend - dargestellt, dass das Licht sich nach den Spalten in allen Richtungen ausbreitet und es hinter dem Schirm zu den Interferenzerscheinungen kommt, die er auf der Wasserwellenwanne gezeigt hat: Es kann nicht anders sein: **Licht hat (auch!) Welleneigenschaften**.



Die Wellenlängen des Lichts

In einem Schulexperiment benützt am bequemsten einen Laser als Lichtquelle. Hinter den Doppelspalt stellt man senkrecht einen Schirm S, auf dem das Interferenzmuster als Abfolge von hellen und dunklen Linien zu sehen ist. Benutzt man drei Laser gleichzeitig, erhält man das komplexe, von vorn aufgenommene, Bild nebenan. Gestrichelt ist die Symmetrieachse A des Experiments eingezeichnet. Sie läuft durch die hellsten Punkte. Man erkennt deutlich, dass die dunklen Stellen der destruktiven Interferenz im grünen Licht näher beim Maximum liegen, als beim orangen oder roten. Die Farben müssen mit unterschiedlich langen Wellen zu tun haben. Die genaue Analyse benützt die schematischen Darstellungen des Geschehens:



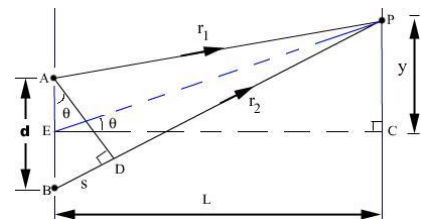
Im Bild (a) wird das Zustandekommen von destruktiver Interferenz schematisch dargestellt: Unter einem gewissen Winkel ϑ entsteht in einer gewissen Entfernung **destruktive** Interferenz, weil vom einen (im Bild vom unteren) Spalt ein Wellenberg und vom andern ein Wellental eintrifft. Im Bild (b) entsteht bei einem anderen (!) Winkel ϑ **konstruktive** Interferenz, weil die beiden Wellentäler miteinander (in gleicher Phase) ankommen. Je grösser die Wellenlänge, umso

grösser ist der Winkel ϑ . **Rotes Licht hat eine grössere Wellenlänge** als grünes Licht!

Verwirrend ist, dass die Helligkeit nicht gleichmässig abnimmt, sondern schon nach rund 12 hellen Stellen auf Null sinkt und wieder auftaucht. Das hat mit der Breite der Spalten (ca. 1000λ) zu tun.

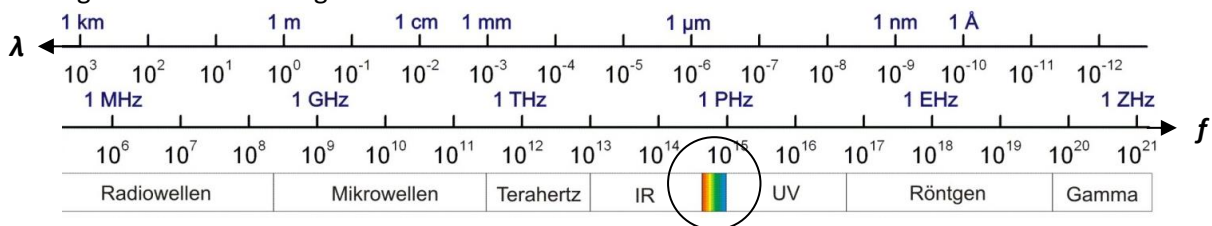
Mathematische Ergänzung:

Im schematisierten Bild rechts gilt: $\sin\vartheta = s/d$ mit dem Wegunterschied $s = r_2 - r_1$. Dieser ist bei Auslöschung ein ungerades Vielfaches der *halben* Wellenlänge. In typischen Experimenten ist der Schirm weit weg im Vergleich zur Wellenlänge ($\approx 10^6 \cdot \lambda$) und der Winkel ϑ derart klein, dass die Näherung $\sin\vartheta \approx \tan\vartheta = y/L$ gilt. Für die erste destruktive Interferenz mit $s = \lambda/2$ wird dann: $\lambda/2 = d \cdot (y/L)$. So lässt sich die kleine Wellenlänge λ mit den Werten y und L bestimmen, wenn man den Abstand der Spalten genügend genau kennt. Im Schulzimmer erhält man $L = 8 \text{ m}$, $y = 2.5 \text{ mm}$, $d = 1 \text{ mm}$. Man findet für grünes Licht etwa $\lambda = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 600 \text{ nm} = 0.6 \mu\text{m}$, also etwa ein halber Tausendstelmillimeter. Man müsste ein Haar in 1000 Teile spalten können!



Das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung (Spektrum = Farberscheinung, beim Prisma usw.)

Mit passend grossen Doppelspalten können die Wellenlängen all der unterschiedlich erzeugten elektromagnetischen Strahlungsarten bestimmt werden.



Im Diagramm ist ein grosser Ausschnitt dargestellt. Rechts sind die kurzen Wellenlängen mit den hohen Frequenzen. Die Skala gibt jeder Zehnerpotenz gleich viel Platz. Es fällt auf, dass das fürs Menschaugen sichtbare Licht nur einen winzigen Ausschnitt des ganzen Spektrums ausmacht. Die Skalen sind an beiden Enden offen. Der Wellenaspekt von Gamma- und Röntgenstrahlungen wurde erst spät erkannt. Die „Mikrowellen“, die elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge von rund 1 cm, wurden mit dem Radar entwickelt. Sie wirken heute in jeder Schnellküche.

Interferometer

Interferometer sind Wellenlängenmessgeräte, die mit der Verstärkung und Auslöschung arbeiten. Eine Seifenblase ist ein einfaches Gerät dieser Art. Die Dicke der Seifenhaut ist vergleichbar mit der Lichtwellenlänge und nicht überall gleich gross. Die Farben entstehen durch Auslöschung unterschiedlicher Teile des Sonnenspektrums. Ähnlich entstehen die Farben in einem dünnen Ölfilm auf Wasser.



Stehende Wellen

Der Begriff scheint einen Widerspruch in sich selbst zu sein: Wellen laufen mit c . - Entscheidend ist, das stehende Wellen auf einem **begrenzten Medium** entstehen:

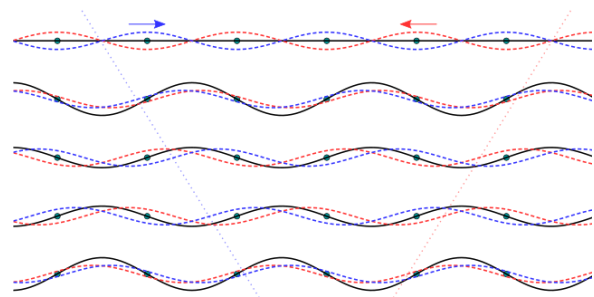
- 1-dimensionale stehende Wellen auf einer Saite, auf einem Seil, in einer Röhre ...
mit 2 Begrenzungspunkten,
- 2-dimensionale stehende Wellen auf einem Trommelfell, auf einem Gong, auf Wasser in einem Glas ...
mit 1 Begrenzungslinie,
- 3-dimensionale stehende Wellen im Innern einer Kirche, eines Badzimmers, eines Paukenkörpers ...
mit 1 Begrenzungsfläche.

An den Begrenzungspunkten, -linien und -flächen kann die Welle nicht weiterlaufen, sondern wird reflektiert.

Unter günstigen Umständen überlagern sich einlaufende und reflektierte Welle konstruktiv und bilden eine **stehen Welle**, die auch **Eigenschwingung** genannt wird.

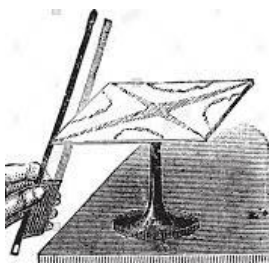
Im Wort «Eigenschwingung» klingt an, dass jeder Punkt eines begrenzten Systems um eine Gleichgewichtslage schwingt.

Am einfachsten sind die Eigenschwingungen in 1 Dimension. Es gibt zwar keine Ausbreitung mehr, trotzdem gilt die Beziehung $c = \lambda \cdot f$ noch wie jedermann und -frau mit einem Seil selber bestätigen kann. c ergibt sich aus der Beobachtung einer einzelnen Störung. λ und f kann man durch Beobachtung der stehenden Welle bekommen.

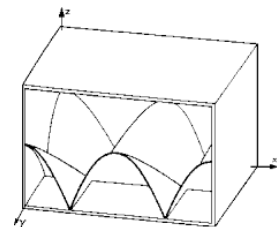


Zum Bild rechts gehört eine Simulation:

physikbuch.schule/standing-waves.html



In 2 Dimensionen wird die Situation sofort viel unübersichtlicher, wie E. F. F. Chladni herausgefunden und unter anderem Napoleon vorgeführt hat. Die Form der Chladni-Figuren ist einerseits durch die Begrenzungslinie (hier quadratisch) und andererseits durch die Anregung bestimmt – und natürlich durch die vom Material bestimmte Ausbreitungsgeschwindigkeit c . Die Figuren erinnern nicht an Wellen. Hingegen zeigen die tanzenden Sandkörner, dass es sich um eine Eigenschwingung handelt. Zwischen den schwingenden



Bereichen gibt es **Knotenlinien**, respektive **Knotenflächen**, respektive **Knotenpunkte** im 1-dimensionalen Fall. Zur Illustration von 3-dimensionalen Eigenschwingungen respektive stehenden Wellen ist die Figur rechts zu den Berechnungen eines Akustikers in einem quaderförmigen Raum angegeben.

Unabhängig von der Dimension kann man folgende Eigenschaften festhalten:

- Es gibt (unendlich) viele Eigenschwingungen mit je einer Schwingungsfrequenz.
- Es gibt eine langsamste Schwingung, die Grundschwingung mit der Grundfrequenz.
- Nicht zu jeder Frequenz gibt es eine Schwingung.
- Damit eine stehende Welle entsteht, muss dem System Energie zugeführt werden.
- Es ist möglich, dass das System zugleich mehrere Schwingungen ausführt. Das einfachste Beispiel ist eine in der Mitte gezupfte Saite.
- Die Überlagerung von Grund- und Oberschwingungen mit den entsprechenden Frequenzen ergeben die charakteristische Klangfarbe der Instrumente.
- Die stehenden Wellen von technischen Objekten bilden eine Herausforderung für Planung und Betrieb. Beispiel: schwingende Flügelspitzen eines Verkehrsflugzeugs, Aufstarten von Turbinen-Generatoren in Kraftwerken. Hängebrücken können zugleich verschiedenen Eigenschwingungen ausführen, die durch mässige Winde angeregt werden. Eindrücklich sind die Eigenschwingungen der Tacoma Narrows Hängebrücke, die 1940 einstürzte. Weil die Probleme schon vor der Eröffnung auftraten, hatte man die Brücke unter Kontrolle und nun den Film!



Vorbereitung für Kapitel 1: ENERGIE - ARBEIT - LEISTUNG

Die moderne Physik

Das Jahr 1900 markiert die Grenze zwischen der klassischen und der modernen Physik. Zwar merkt Max Planck nichts Revolutionäres, als er eine neue Konstante namens „h“ einführt und damit die Quantenphysik begründet. Auch für Albert Einstein ist der Artikel, mit dem er die Relativitätstheorie in die Welt setzt, nur eine von vier Publikationen des Jahres 1905. Die „alte“ Physik gilt nämlich weiterhin, beispielsweise die Grundgesetze des Elektromagnetismus. Nach ihnen werden die vielen Generatoren in den um 1900 neuen Kraftwerke ausgelegt. Erst aus heutiger Sicht wird deutlich, dass die „alte“ Physik bloss ein Spezialfall der „neuen“ Physik ist. Erst wenn man in die Dimension der Atome eintaucht, bemerkt man die Rolle von *h*.

Energie

Das Wort „Energie“ stammt vom altgriechischen *ἐνέργεια* *enérgeia*, was „Aktivität“, „Wirksamkeit“ bedeutet. Der Begriff ist trendy: *energy drink, energy dance, energy sleep*. Der Begriff ist offenbar vielschichtig, und wir nähern uns seiner Bedeutung in der Physik schrittweise.

(1) *Vernetzend*: In dem Sinn wie ein energischer Mensch die menschlichen Dinge in Bewegung zu bringen vermag, vermag Energie in der Physik die physikalischen Dinge in Bewegung zu versetzen.

(2) *Vergleichend*: Physikalische Energie kann in verschiedenen Formen vorkommen und mit finanziellem Vermögen verglichen werden: Vermögen kann in Form von Kleingeld oder Banknoten, von Goldbarren oder Edelsteinen, von Aktien oder Obligationen, von Bauland usw. vorkommen.

Vorläufige Festlegung: Mit Energie kann man Arbeit verrichten.

(3) *Physikalisch*: Die Energie ist eine Bilanzierungsgrösse, die in abgeschlossenen Bereichen erhalten bleibt. Sie hat das **Symbol E** und die **Masseinheit Joule**, abgekürzt J. Dieser Name geht auf schottischen Brauereibesitzer und Privatgelehrten James Prescott Joule zurück, der sich um 1850 das Verhältnis von mechanischer Arbeit und Wärme untersucht hat. Der Name wird auch im englischen Sprachraum französisch ausgesprochen, da Joules Vorfahren eingewandert sind. Vielleicht war es eine Bieridee, die Masseinheit so klein zu wählen, denn 1 Joule ist nur ungefähr die Energie, die es braucht um eine 100g-Tafel Schokolade vom Boden aufzuheben!



Veranschaulichung von verschiedenen Energieformen - Beispiele für die 10er-Faktoren

1 nJ (nano)	1 μJ (mikro)	1 mJ (milli)	1 Joule	1 kJ (kilo)	1 MJ (mega)	1 GJ (giga)
Kernenergie	therm. En.	Schall	Lageenergie	Lichtenergie	chem. Ener.	Bew.energ.
1 s „α“ aus 10 kg Granit	schwirrend. Stäubchen	ein Klavierton	Volleyball 3 dm heben	Sonne in 1 s auf 1 m ²	RAGUSA essen	5000t-Zug 72 km/h
10 ⁻⁹ Joule	10 ⁻⁶ Joule	10 ⁻³ Joule	10 ⁰ Joule	10 ⁺³ Joule	10 ⁺⁶ Joule	10 ⁺⁹ Joule

Energie in extrem unterschiedlichen Grössenordnungen - Beispiele in Milliarden-Sprüngen

10 ⁻²⁷ Joule	10 ⁻¹⁸ Joule	10 ⁻⁹ Joule	1 Joule	10 ⁺⁹ Joule	10 ⁺¹⁸ Joule	10 ⁺²⁷ Joule
1 Spinflip im MRI	Photon etwa 1 eV	Radioaktiv. von Granit	1 Newton um 1 Meter	schwerer Güterzug	grosses Erdbeben	10 Sek. Sonne

Arbeit wird verrichtet, wenn man einem System (volle Liftkabine, stehendes Auto, «leerer» Akku...) **Energie zuführt**, oder wenn ein System **Energie abgibt** (Wasser im Stausee, Akku beim Telefonieren ...). Arbeit wird auch in Joule gemessen.

Leistung ist etwas Anderes: Leistung = Arbeit pro Zeit

Physikalische Leistung ist ähnlich wie Schulleistung: Arbeit pro Zeit. Die Leistungsnote ist umso besser, je mehr Arbeit in der zur Verfügung gestellten Zeit verrichtet wird. Die physikalische Leistung wird in Watt gemessen: 1 Watt = 1 Joule / 1 Sekunde. Ein Pferd leistet 1 kW, ein Automotor 100 kW, ein KKW 1000 MW. Es strengt an, dauernd 100 W zu leisten! - Übrigens ist 1 kWh = 3.6 MJ.

Vorbereitung für Kapitel 1: ELEKTRIZITÄT

Elektrische Energie

Ums Jahr 1900 verbreitet sich Elektrizität (vom griechischen *elektron* = Bernstein) rasch auch in die Privathaushalte. Elektrizität, genauer gesagt elektrische Energie, wird in Glühlampen in Licht, im Kochherd in Wärme, im Staubsauger in Bewegungsenergie, im Radio in Schall umgewandelt. Heute läuft ohne Elektrizität nichts: „Hilfe, mein Akku ist leer!“

Weil man die Elektrizität nicht sehen kann, macht man sich Bilder, problematische, oft falsche: Wenn man den Akku lädt, fügt man nur elektrische Energie hinein, nichts Stoffliches, wie beim Autotank. Im vollen Akku hat es gleich viele elektrische Ladungen in Form von Elektronen und Protonen, wie im leeren Akku, sie sind nur anders angeordnet. Der Unterschied zwischen einem vollen und einem leeren Akku entspricht dem zwischen einer gespannten und einer ungespannten Feder.

Elektrische Ladungen

Die Atome sind aus negativ geladenen Elektronen in der Hülle und den positiv geladenen Protonen im Kern aufgebaut. Positive und negative Ladungen üben anziehende Kräfte aufeinander aus; gleichartige Ladungen stoßen sich ab. Der Akku des Smartphones ist eine raffinierte chemische Struktur. Wenn er geladen ist, können sich Lithium-Ionen, das sind Atome des drittkleinsten Elements, denen ein Elektron fehlt, vom Plus- zum Minuspol durchschlängeln und dort das fehlende Elektron aus dem geschlossenen Stromkreis holen. Dabei gibt der Akku Energie ab.

Die elektrische Ladung wird in Coulomb gemessen. Charles Augustin Coulomb erfand als Ingenieur ein Gerät zur Ladungsmessung und war zur Zeit Napoleons Chef des Gymnasialwesens. Unten sind einige Beispiele mit verschiedenen Ladungsmengen:



1 aC (atto)	1 pC (pico)	1 μ C	1 mC	1 Coulomb	1 DC (deka)	1 kC
6 Protonen	Pulliknistern	LED-Blitz	Schall	Photoblitz	Handyakku	Veloakku
10^{-18} C	10^{-12} C	10^{-6} C	10^{-3} C	10^0 C	10^{+1} C	10^{+3} C

Elektrischer Strom



Nur wenn Ladungen fließen, kann elektrische Energie transportiert werden. Elektrischer Strom ist eine Riesenzahl von bewegten elektrischen Ladungen, Ionen oder Elektronen. Man misst den Strom in Ampère. André-Marie Ampère war Mathematiker zur Zeit Napoleons und erfand ein Gerät zur Messung der Stromstärke. Er war aber auch Inspektor der Gymnasien und verfasste eine französische Grammatik!

1 Ampère fließt, wenn in 1 Sekunde die Ladungsmenge 1 Coulomb durch eine Fläche strömt; beispielsweise $6 \cdot 10^{18}$ Elektronen in 1 s durch einen Toaster.

Elektrische Spannung

Die elektrische Spannung (erinnert zurecht an „gespannte Feder“) ist ein Maß für die Energie, die die Ladungen transportieren können. Sie wird in Volt gemessen, nach Alessandro Volta, der als Physikprofessor an der Universität Pavia die elektrische Spannungsreihe und um 1800 die erste Batterie erfunden hat. Wenn zwischen zwei Punkten die Spannung 1 Volt herrscht, dann transportiert eine Ladung von 1 Coulomb die Energie von 1 Joule - unabhängig von der Zeit. Wenn der Prozess in 1 Sekunde geschieht, dann fließt ein Strom von 1 Ampère zwischen den Polen und erbringt eine Leistung von 1 Watt.



In der Tabelle sind verschiedene Beispiele von realen und fiktionalen Spannungen angegeben.

1 nV	1 μ V	1 mV	1 Volt	1 kV	1 MV	1 GV
Rauschen	Antenne	Mikrofon	Batterie	Netz	Höchstsp.	POKEMON

1 Elektronvolt (eV) ist die Energie, die 1 Elektron transportiert, wenn es die Spannung 1 V durchläuft.

Vorbereitung für Kapitel 2: IMPULS

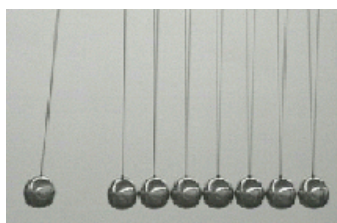
Übergang zur Quantenmechanik

Um 1920 wurde deutlich, dass die Quantenphysik nicht nur beim Licht, sondern auch bei der Materie anwendbar war. Mit Bohrs Atommodell konnte man nach einigen Anpassungen auch kompliziertere Atomspektren erklären. Andererseits konnte man das Atominnere offenbar nicht mit der gewöhnlichen Mechanik beschreiben. Heisenberg, Schrödinger und andere stellten fest, dass das Atom kein Planetenmodell in Miniformat war. Elektronen waren keine Dinger an einem definierten Ort. Und ohne Angriffspunkt wurde auch der Kraftbegriff unbrauchbar. Neben dem Energiebegriff erwies sich aber auch der Impulsbegriff als nützlich auch in der neuen, der Quantenmechanik.

Impuls

Das Wort «Impuls» stammt vom lateinischen *impulsus*, was äußerer Antrieb, Stoß, Anregung bedeutet. In der Umgangssprache benützen wir die Wörter Schwung oder Wucht.

Schon in der antiken Physik taucht die Idee auf: Aristoteles meint, dass ein bewegtes Objekt dauernd einen Antrieb benötige. Auch im Mittelalter war die Rolle der Reibung noch nicht klar und Buridan sprach vom Impetus, der die Bewegung aufrecht erhalte. René Descartes behauptete, die *quantitas motus* im Universum sei konstant. Die Vorläufer Newtons, unter ihnen Huygens, untersuchten Stossprobleme und fanden um 1650 Gesetzmässigkeiten, die wir heute mit dem Impuls erklären.



Das Verhalten einer Pendelkette ist bekannt: 1 hin – 1 weg; 2 hin – 2 weg usw. Es passiert nie, dass 1 Kugel gleich 2 Kugeln auslöst, die aber nur halb so hoch steigen, obwohl das nach dem Energieerhaltungssatz möglich wäre.

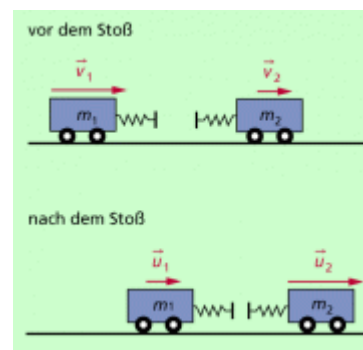
Übersichtlicher ist der vollkommen **elastische Stoss** zwischen zwei Massen m_1 und m_2 . Man beobachtet, dass gleiche Anfangsgeschwindigkeiten v_1 und v_2 (ohne Vektorzeichen, weil alles in einer Richtung) immer zu den gleichen Endgeschwindigkeiten u_1 und u_2 nach dem Stoss führen. Um die zwei unbekannt Grössen u_1 und u_2 zu berechnen, braucht man zwei Gleichungen. Die erste liefert die Erhaltung der Bewegungsenergie.

$$\frac{1}{2}m_1v_1^2 + \frac{1}{2}m_2v_2^2 = \frac{1}{2}m_1u_1^2 + \frac{1}{2}m_2u_2^2 \quad (E)$$

Die zweite Gleichung liefert die Erhaltung der einfachen Grösse «Impuls» $p = mv$:

$$m_1v_1 + m_2v_2 = m_1u_1 + m_2u_2 \quad (I)$$

Man kann Newtons Gesetze 2 und 3 auf die Wechselwirkung zwischen den beiden stossenden Objekten anwenden und die Impulserhaltung (I) unabhängig von der Kraftart herleiten.



Festlegung:	Der Impuls p ist ein Mass für den Kraftstoss.	$p = mv$
--------------------	---	----------------------------

(1) *Symbol und Masseinheit:* Das Symbol ist p (vektoriell); vgl *pulse* im Englischen. Allerdings heisst Impuls auf Englisch *momentum*. Die Masseinheit ist einfach kgm/s oder mkg/s.

Springt ein 50 kg schweres Kind mit 2 m/s von einem Gummiboot, überträgt es $p = 100$ mkg/s.

(2) *Impuls des Photons:* Einstein fand 1916 die Beziehung (1.3): $p = hf/c = h/\lambda$.

Der Rückstoss eines sichtbaren Photons beträgt bloss $p = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} / 500 \text{ nm} = 1.3 \cdot 10^{-27} \text{ mkg/s}$.

(3) *Rückstoss des Photons auf das emittierende Atom:* Es gilt die Impulserhaltung. Wir hoffen, die Endgeschwindigkeit u des Atoms, das anfangs in Ruhe war, sein klein. Wäre sie nahe bei der Lichtgeschwindigkeit, müsste das Gesetz (I) in der relativistischen Form benützt werden.



Der Rückstoss auf das Atom ist auch $p = 1.3 \cdot 10^{-27} \text{ mkg/s} = mu$. Wir betrachten den kritischsten Fall, das leichte Wasserstoffatom mit $m = 1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Wir können beruhigt sein, denn es ist bloss $u = p/m = 0.7 \text{ m/s} \ll c$.

(4) *Die zwei Kometenschweife* (im Bild Hale-Bopp) werden durch Übertragung von Impuls von Sonnenlicht und Sonnenwind (vor allem ionisierter Wasserstoff und Helium) verursacht. Der schmale, lange Schweif besteht aus Molekülionen. Der kürzere, gekrümmte Schweif besteht aus Staub.