

## 2 Wellen und Quanten

Im Jahr 1900, dem Geburtsjahr der Quantenphysik, begann sich die Vorstellung vom Aufbau der Materie grundlegend zu verändern. Es wurde in den Folgejahren nämlich erstmals möglich, Objekte des Mikrokosmos genau zu beschreiben und verlässliche Voraussagen auch über die Stabilität der Materie zu treffen. Der dabei notwendige, ebenso abstrakte wie anspruchsvolle mathematische Formalismus macht dabei nicht selten Aussagen, die in krassem Widerspruch zu unseren Erfahrungen stehen. So ersannen die Physiker Versuchsanordnungen, um die paradoxen Aussagen der Quantenphysik auch experimentell zu überprüfen. Erstaunlicherweise bestätigten alle Versuchsergebnisse die Vorhersagen der Quantenphysik, so dass nicht sie, sondern unsere Vorstellung vom Aufbau der Materie korrigiert werden muss. Eines dieser Experimente ist das Doppelspaltexperiment, über das der amerikanische Physiker und Nobelpreisträger Richard Feynman schreibt: „Das Doppelspaltexperiment enthält das ganze Geheimnis der Quantenmechanik. Sämtliche Paradoxa, Geheimnisse und Absonderlichkeiten der Natur sind darin enthalten.“

Ziel des Lehrplanabschnitts 10.3 „Wellenlehre und Einblick in die Quantenphysik“ ist es, den Schülern einen Einblick in die Welt der Quanten zu geben. Dreh- und Angelpunkt ist dabei das Doppelspaltexperiment, das aber ohne Kenntnis der grundlegenden Eigenschaften klassischer Wellen nicht zu verstehen ist.

Aus diesem Grund und in direkter Anbindung an den Lehrplan werden in den ersten Unterrichtsstunden die Eigenschaften von Longitudinal- und Transversalwellen mit Hilfe von Experimenten erarbeitet, die durch Simulationen sinnvoll ergänzt werden. Insbesondere die Möglichkeit, eine Welle verlangsamt ablaufen zu lassen und auch anzuhalten, ermöglicht es, den Zusammenhang von Wellenlänge, Frequenz und Ausbreitungsgeschwindigkeit auf sehr anschauliche Art herzuleiten. Ebenso kann mit Hilfe geeigneter Simulationen das Reflexionsverhalten und die Überlagerung von Seilwellen gut studiert werden.

Im weiteren Verlauf werden Beugung und Interferenz von zwei- und dreidimensionalen Wellen betrachtet. Die geschieht weitgehend anhand von Experimenten mit der Wellenwanne. So kann bei Zuhilfenahme der Stroboskopfunktion das Auftreten von Zonen mit großer und kleiner Amplitude gut visualisiert werden. Um die erstaunliche Tatsache, dass die Stellen maximaler destruktiver und maximaler konstruktiver Interferenz ortsfest und zeitunabhängig sind, zu vertiefen, sollten die Schüler diese Bereiche bei zwei Sendern und vorgegebener Wellenlänge einmal selbst mit dem Zirkel konstruieren. Schließlich wird erarbeitet, dass Beugung und Interferenz *die* typischen Charakterisierungsmerkmale von Wellen sind.

Im Schülerexperiment, in welchem Laserpointer und selbstgedruckte Doppelspalte verwendet werden, erkennen die Schüler, dass Laserlicht offensichtlich die typischen Eigenschaften von Wellen besitzt. Dies bedeutet bereits einen ersten Bruch mit der in der 9. Jahrgangsstufe angelegten Vorstellung des Lichts als Photonenstrom. Bei der Durchführung eines Demonstrationsexperiments zum Photoeffekt wird dieser Widerspruch noch deutlicher und markiert den Übergang zur Beschäftigung mit der Quantenphysik.

In einer Simulation, bei der die auf einen Doppelspalt treffende Leistung eines Lasers sukzessive reduziert werden kann, werden die Schüler an die Tatsache herangeführt, dass bei entsprechend geringer Leistung am Schirm zwar immer nur einzelne Photonen registriert werden, diese aber dem Interferenzmuster folgen, das sich aus dem Wellenbild ergibt. Die „Helligkeitskurve“ muss dann als Maß für die Wahrscheinlichkeit interpretiert werden, ein Photon innerhalb eines bestimmten Raumbereichs aufzutreffen.

Schließlich stellt sich die Frage, wie sich Teilchen verhalten, denen bisher klassische Teilcheneigenschaften unterstellt wurden, die aber noch nie von einem Menschen gesehen wurden. Die Elektronenbeugungsröhre zeigt ein Schirmbild, das an ein Interferenzbild erinnert. Da Schüler dieser Jahrgangsstufe das Verhalten kurzwelliger Teilchen an Kristallen noch nicht verstehen können, wird wieder zum Doppelspaltexperiment und zugehörigen Simulationen übergegangen. Durch sie wird plausibel, dass auch Elektronen wellenartige Eigenschaften besitzen. Mit dieser Erkenntnis kann in einer vertiefenden Unterrichtsphase im Anschluss das Orbitalmodell der Atome und der Laser erklärt werden.

## 2.1 Transversal- und Longitudinalwellen

### Lernziele

Die Schüler ...

- erkennen, dass mechanische Wellen als sich ausbreitende Auslenkungen in einem elastischen Medium aufgefasst werden können;
- können Transversal- und Longitudinalwellen unterscheiden und Beispiele dafür nennen;
- können die Begriffe Überlagerung, Ausbreitungsgeschwindigkeit und Reflexion im Zusammenhang mit der Ausbreitung von Wellen verwenden.

### Didaktische Hinweise

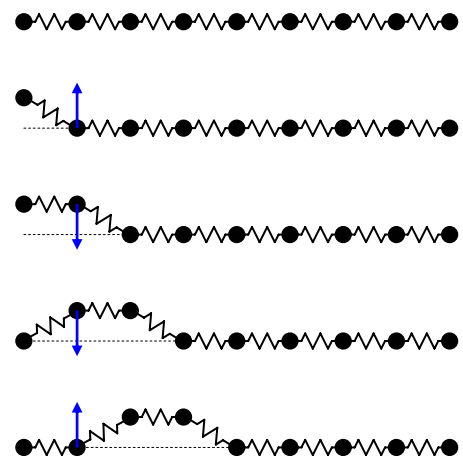
In dieser ersten Einheit geht es darum, mechanische Wellen als sich ausbreitende Auslenkungen in einem elastischen und trägen Medium zu begreifen. Um zu demonstrieren, dass Überlagerung und Reflexion allgemeine Welleneigenschaften sind, sollten zu deren Erläuterung auch unterschiedliche Arten von Wellen in einfachen Versuchen herangezogen werden. Dass mechanische Wellen als Longitudinal- und Transversalwellen auftreten, unterstreicht die Allgemeinheit von Wellenphänomenen. Die Unterrichtsstunde soll eine allgemeine Einführung in Wellenphänomene geben, an eine detaillierte Diskussion der Vorgänge bei mechanischen Wellen (z. B. Phasensprung am festen Ende) ist an dieser Stelle nicht gedacht.

### Hinweise zu Experimenten

Die Wellenmaschine bietet sich an, um viele grundlegende Aspekte mechanischer Wellen darzustellen: Die Bewegung jedes einzelnen Massestücks lässt sich auf Grund der von seinen Nachbarn übertragenen Kräfte gut nachvollziehen. In dem elastisch gekoppelten System von Massestücken pflanzen sich Auslenkungen aus der Gleichgewichtslage mit einer charakteristischen Geschwindigkeit fort. Laufen mehrere Auslenkungen über das Medium, breiten sich diese unabhängig voneinander aus und überlagern sich, ohne sich dabei zu beeinflussen. An den Enden kann bei geeigneter Versuchsanordnung Reflexion auftreten. Wenn keine Reibung wirkt, transportieren Wellen Energie verlustfrei. Als einfaches Beispiel für Transversalwellen lassen sich Wellen in einem gespannten Seil demonstrieren. Longitudinalwellen kann man mit Hilfe eines Federwurms oder in einer Schiene rollender, sich abstoßender Permanentmagnete darstellen.

## Unterrichtsinhalte

Bei einem angestoßenen Federpendel führt ein elastisch aufgehängtes Massestück Schwingungen aus. Welche Bewegungen auftreten, wenn viele Massestücke mit vielen Federn verbunden sind, kann man sich anhand der Momentaufnahmen rechts überlegen und mit der Wellenmaschine ausprobieren. Zunächst seien alle Massestücke in Ruhe und im Kräftegleichgewicht. Wenn das Massestück ganz links von Hand bewegt wird, tritt auch am zweiten Massestück eine Kraft auf, die rechts als Pfeil dargestellt ist. Dadurch folgt es – mit einer kleinen Verzögerung – der Bewegung. Man erkennt, dass sich die Auslenkung von Massestück zu Massestück fortpflanzt.



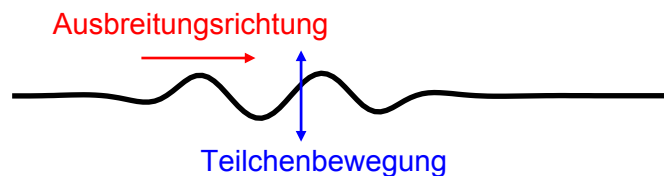
Solche Auslenkungen aus der Gleichgewichtslage, die sich in einem Medium ausbreiten, heißen Wellen. Wellen sind eine sehr allgemeine Erscheinung in der Physik und treten in vielen Formen auf.

Bei mechanischen Wellen gibt es zwei wichtige Sonderfälle

### Transversalwellen:

Hier bewegt sich jedes Teilchen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle.

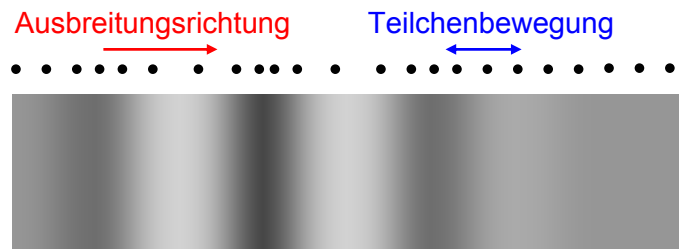
Beispiel: Seilwellen in einem gespannten Seil



### Longitudinalwellen:

Hier bewegt sich jedes Teilchen parallel zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Die Auslenkung bewirkt hier eine Änderung der Teilchendichte.

Beispiel: Schallwellen



### Grundlegende Eigenschaften aller Wellen:

- In einem Medium können sich gleichzeitig verschiedene Wellen ausbreiten, ohne sich gegenseitig zu stören (Überlagerung). Beispiel: Die Wasserwellen zweier in einen Teich geworfenen Steine durchdringen sich.
- Wellen breiten sich mit einer für das Medium charakteristischen Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  aus, die nicht von der Stärke der Auslenkung abhängt.
- Gelangen Wellen an den Rand des Mediums bzw. an ein Hindernis, so tritt in der Regel Reflexion auf (z. B. Schallwellen an einer Wand).
- Wellen transportieren Energie, aber keine Materie von einer Quelle weg.

## 2.2 Größen zur Beschreibung von Wellen

### Lernziele

Die Schüler ...

- können sinusförmige Wellenzüge mit Hilfe der Größen Amplitude, Wellenlänge, Periodendauer, Frequenz und Ausbreitungsgeschwindigkeit beschreiben;
- kennen den mathematischen Zusammenhang zwischen Ausbreitungsgeschwindigkeit, Wellenlänge und Frequenz und können ihn in Beispielen anwenden.

### Didaktische Hinweise

Die Ausbreitung periodischer, sinusförmiger Wellen wird in dieser Unterrichtseinheit genauer untersucht. Im Mittelpunkt steht die Einführung der Begriffe Wellenlänge und Frequenz sowie die zentrale Beziehung  $c = \lambda \cdot f$ . Dieser Zusammenhang kann und soll aus der einfachen Betrachtung  $v = s / t$  gewonnen werden, ohne die Funktionsgleichung einer fortschreitenden Welle  $y(x, t)$  einzuführen.

### Hinweise zu Experimenten

Eine fortschreitende, sinusähnliche Welle kann mit Hilfe eines Seils erzeugt werden. Es ist dabei aber unbedingt darauf zu achten, dass Reflexionen am offenen oder geschlossenen Ende die ursprüngliche Welle nicht zu einer stehenden Welle überlagern. Aus diesem Grund ist es hier ratsam, nach der Demonstration der Seilwelle zu einem mechanischen Analogon oder einer Simulation überzugehen. Als mechanisches Analogon dient ein Draht, der die Form einer Schraubenlinie besitzt und um die Längsachse rotiert. Dabei wird dessen Projektion senkrecht zur Achse betrachtet. Eine Umdrehung entspricht einer Periodendauer  $T$ . Damit lässt sich auch gut darstellen, dass bei einer fortschreitenden Welle der Eindruck einer gleichförmigen Bewegung entsteht, obwohl jedes Teilchen lediglich eine kleine periodische Bewegung um seine Ruhelage ausführt.

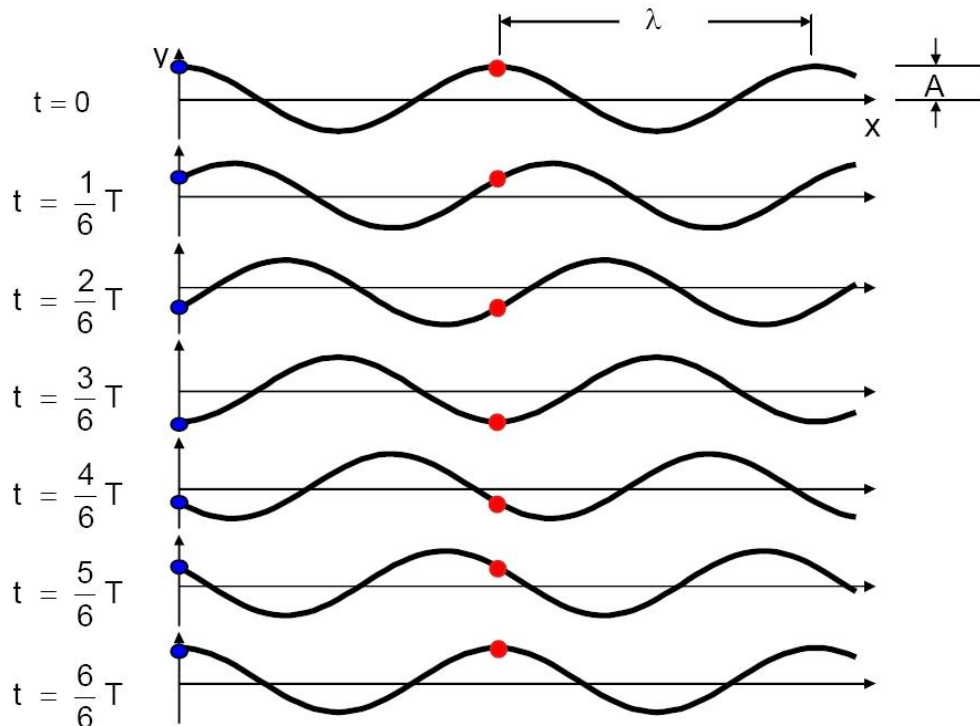
### Literatur und Medien

In dieser Unterrichtseinheit bietet sich der Einsatz eines Simulationsprogramms besonders an, da geeignete Simulationen verlangsamt ablaufen und auch Standbilder erzeugt werden können. Es sollte jedoch auf keinen Fall darauf verzichtet werden, vorher auch Experimente zu zeigen, denn nur so wird deutlich, dass die Simulation tatsächlich Wellenlänge, Periodendauer und Ausbreitungsgeschwindigkeit aus dem Experiment visualisiert. Hierzu wird das auf der CD befindliche Java-Applet „Physlet welle01“ [sim\_Ausbreitungsgesch\_Welle\_CD/Wellen-Quanten] empfohlen.

Beim Physlet welle01 wird der Zusammenhang zwischen der Schwingungsdauer  $T$  eines Massestücks des Trägermediums und der Wellenlänge sehr klar dargestellt. Es ist jedoch zu beachten, dass im Anzeigefenster zwar die Frequenz  $f$  auftaucht, hier aber in Wirklichkeit die Kreisfrequenz angezeigt wird. Aus diesem Grund ist es sehr ratsam, die mitlaufende Uhr zu benutzen und dieser die Schwingungsdauer  $T$  zu entnehmen.

## Unterrichtsinhalte

Betrachtet wird eine sich in x-Richtung fortplanzende Welle. Die Anregung erfolge sinusförmig und dauerhaft, so dass ein ausgedehnter, periodischer Wellenzug entsteht. Unten sind Momentaufnahmen des Wellenzugs zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt.



Die maximale Auslenkung, die jedes Teilchen erfährt, heißt Amplitude  $A$  der Welle. Der Abstand zweier benachbarter Wellenberge heißt Wellenlänge  $\lambda$ . Nach Ablauf der Periodendauer  $T$  hat der Erreger eine volle Schwingung ausgeführt, und der Wellenzug ist um eine Wellenlänge  $\lambda$  gewandert.

Die Anzahl der Schwingungen, die der Erreger und damit auch jedes Teilchen pro Sekunde ausführt, heißt Frequenz  $f$ . Die Frequenz ist der Kehrwert der Periodendauer. Die Maßeinheit der Frequenz ist  $1/s = 1 \text{ Hz}$  (Hertz).

Die Geschwindigkeit, mit der der Wellenzug wandert, ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$ . Da der Wellenzug innerhalb einer Periodendauer  $T$  eine Strecke von einer Wellenlänge  $\lambda$  zurücklegt, gilt:

$$c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

### Beispiele:

Eine Schallwelle mit der Wellenlänge  $\lambda = 10 \text{ cm}$  entsteht, wenn die Frequenz des Senders eingestellt ist auf:

$$f = \frac{c_{\text{Schall}}}{\lambda} = \frac{340 \text{ m/s}}{0,10 \text{ m}} = 3,4 \text{ kHz} \quad (\text{hoher Pfeifton}).$$

Funkwellen eines UKW-Senders breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus und haben eine Frequenz von rund  $100 \text{ MHz}$ . Ihre Wellenlänge beträgt

$$\lambda = \frac{c_{\text{Licht}}}{f} = \frac{3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{100 \cdot 10^6 \text{ 1/s}} = 3,0 \text{ m}$$

## 2.3 Stehende Wellen

### Lernziele

Die Schüler ...

- erkennen, dass zwei Wellen mit entgegengesetzter Richtung und gleicher Frequenz sich so überlagern, dass sich ortsfeste Knoten und Bäuche ergeben;
- wissen, dass der Abstand benachbarter Knoten gleich der halben Wellenlänge ist;
- erfahren, dass sich die Schwingung eines Mediums begrenzter Länge durch stehende Wellen beschreiben lässt, die in Form von Grund- und Oberschwingungen auftreten können.

### Didaktische Hinweise

In dieser Einheit sollen die Schüler stehende Wellen zunächst als Ergebnis der Überlagerung zweier gleichfrequenter und gegenläufiger Wellen kennenlernen. In der skizzierten Unterrichtssequenz wird hierzu ein grundlegendes Experiment ausgeführt. Die Erklärung der beobachteten Knoten und Bäuche kann durch graphische Überlagerung der beiden Wellenzüge erfolgen (siehe skizzierte Unterrichtsinhalte). Es bietet sich aber auch an, die Vorgänge mit Hilfe des Simulationsprogramms „Laewell“ zu veranschaulichen. Die Deutung der Schwingungszustände eines beidseitig begrenzten Mediums als stehende Wellen ist wichtig zum Beispiel zur Erklärung der Tonentstehung bei Musikinstrumenten und in Bezug auf die Quantenphysik. Überlagerungen von Grundschwingung und Oberschwingungen oder Oberschwingungen unterschiedlicher Ordnung sollen hier aber nicht betrachtet werden.

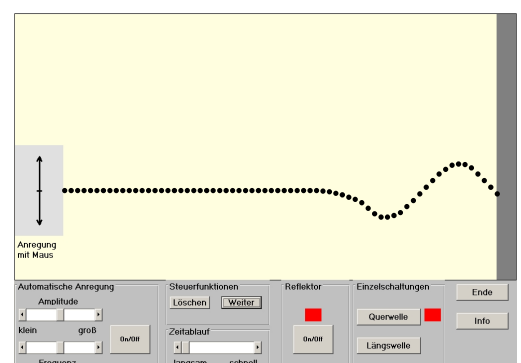
### Hinweise zu Experimenten

Eine stehende Schallwelle lässt sich leicht mit zwei identischen Lautsprechern erzeugen, die in etwa 1,5 m Abstand aufgestellt sind und vom selben Funktionsgenerator (z. B.  $f = 2 \text{ kHz}$ ) versorgt werden. Das Messmikrophon kann direkt mit dem auf Wechselspannungsmessung geschalteten Multimeter verbunden werden. Auch ein Oszilloskop ist als Anzeige geeignet, dann muss allerdings genau zwischen dem  $y(t)$ -Bild auf dem Schirm und der  $y(x)$ -Darstellung in den erklärenden Diagrammen unterschieden werden.

Grund- und Oberschwingungen auf einem beidseitig eingespannten Seil kann man bei einem etwa 5 m langen Seil leicht mit der Hand oder einem Experimentiermotor mit Exzenter erzeugen. Viele weitere Experimente zu stehenden Transversal- und Longitudinalwellen, z. B. auf langen Federn oder Luftsäulen, sind hier möglich und zeigen die allgemeine Bedeutung des Phänomens. Die Rolle stehender Wellen bei einem Saiteninstrument lässt sich demonstrieren, wenn man eine eingespannte Saite einmal zur Grundschwingung und einmal zur 1. Oberschwingung (genau in der Mitte mit dem Finger dämpfen) anregt.

### Literatur und Medien

Das Simulationsprogramm Laewell [sim\_Wellenmaschinen\_CD/Wellen-Quanten] erlaubt es, eine „Seilwelle“ entweder von Hand mit der Maus oder periodisch anzuregen. Trifft die Welle auf ein Hindernis, das in die Anordnung eingebaut werden kann, wird sie reflektiert. Dabei wird ein Wellenberg als Wellental reflektiert und umgekehrt. An eine systematische Behandlung der Reflexion ist hier zwar nicht gedacht, trotzdem kann das Zustandekommen stehender Wellen durch Reflexion am festen Ende qualitativ sehr schön studiert werden.



### Unterrichtsinhalte

Mehrere Wellen können sich im gleichen Medium überlagern, ohne sich gegenseitig zu stören. Im folgenden Versuch werden zwei Wellen gleicher Frequenz und entgegengesetzter Richtung überlagert:

Zwei Lautsprecher LS 1 und LS 2 sind an einen einzigen Funktionsgenerator angeschlossen. Mit dem Messgerät lässt sich die Amplitude des Schallsignals am Ort des Mikrophons untersuchen. Wenn das Mikrophon entlang der Verbindungslinie der Lautsprecher verschoben wird, sind abwechselnd Stellen kleiner und großer Amplitude zu beobachten.

Das Zustandekommen der Knoten und Bäuche lässt sich erklären, wenn man die Überlagerung der beiden, von den Lautsprechern erzeugten Wellenzüge betrachtet. In den Momentaufnahmen rechts sind die Wellenzüge von LS 1 und LS 2 sowie der resultierende Verlauf (rot) dargestellt. Am Ort eines Knotens

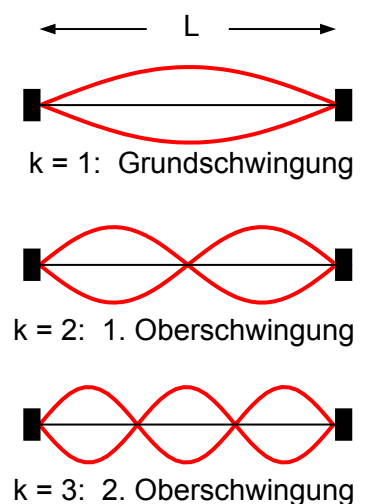
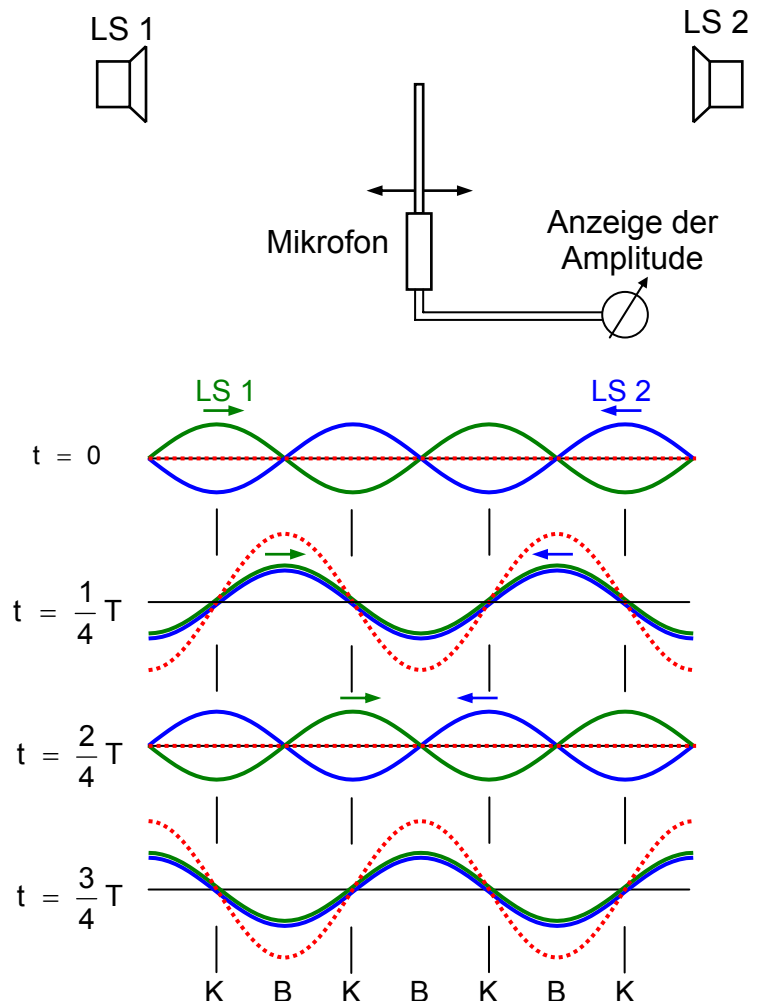
(K) heben sich die Auslenkungen der beiden Teilwellen zu jedem Zeitpunkt auf. Am Ort eines Bauches (B) addieren sich die Auslenkungen abwechselnd zu großen positiven und negativen Ausschlägen. Dabei ist der Abstand zweier benachbarter Knoten halb so groß wie die Wellenlänge.

Solche stehenden Wellen sind auch zu beobachten, wenn z. B. LS 2 durch eine Stellwand ersetzt wird, da die Schallwellen von LS 1 an der Wand reflektiert werden und sich dann die hin- und die zurücklaufende Welle ebenso wie oben dargestellt überlagern.

Stehende Wellen treten auch auf, wenn ein Seil an beiden Enden eingespannt ist und zu Schwingungen angeregt wird. Die Einspannung bewirkt, dass die durch die Anregung erzeugten Wellen an den Enden jeweils reflektiert werden und dass dort jeweils ein Knoten vorliegen muss. Damit diese Bedingung erfüllt ist, muss für die Wellenlänge  $\lambda$  und die Seillänge  $L$  gelten:

$$L = k \cdot \frac{\lambda}{2} \quad \text{mit } k = 1; 2; 3; \dots$$

Die Schwingungszustände werden als Grund- und Oberschwingungen bezeichnet. Stehende Wellen auf Saiten oder Luftsäulen sind die Grundlage für die Funktionsweise vieler Musikinstrumente.



## 2.4 Wellenfronten und Beugung

### Lernziele

Die Schüler ...

- kennen den charakteristischen Verlauf der Wellenfronten bei punktförmigen und linienförmigen Erregern;
- lernen die Beugung als charakteristisches Merkmal von Wellen kennen;
- kennen die Beugung hinter einem schmalen Spalt.

### Didaktische Hinweise

In dieser Einheit lernen die Schüler zunächst in zwei Dimensionen kreisförmige Wellen und linear-parallele Wellen als grundlegende Ausbreitungsmuster kennen. In drei Dimensionen ergeben sich entsprechend kugelförmige bzw. ebene Wellenfronten.

### Hinweise zu Experimenten

An der Wellenwanne (möglichst mit Stroboskop) lassen sich die Erzeugung von Wellenfronten und die Beugung einfach darstellen und im Detail beobachten.

### Literatur und Medien

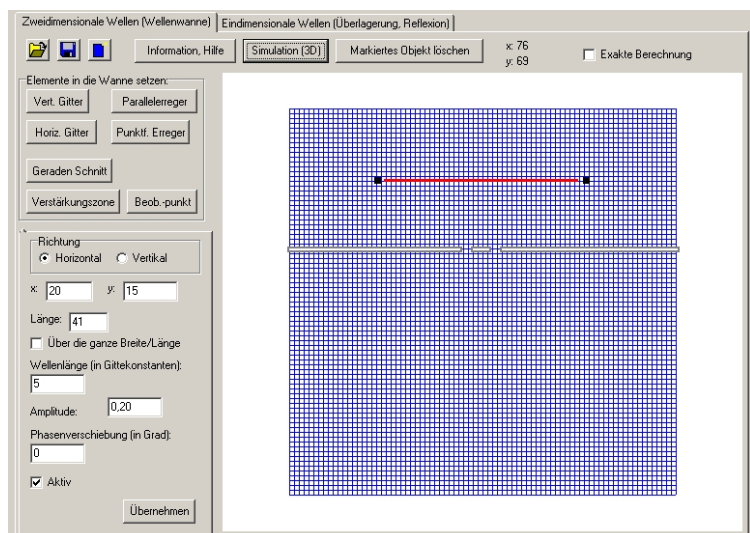
Die Simulation „Wellenwanne“ [sim\_Wellenwanne\_CD/Wellen-Quanten] kann an dieser Stelle erstmals gewinnbringend eingesetzt werden.

Mit Hilfe der Simulation können die meisten Experimente mit der Wellenwanne simuliert und schnell variiert werden. Da nicht nur unterschiedliche Erreger mit variabler Amplitude und Wellenlänge einstellbar sind, sondern auch Hindernisse und Spalte aufgebaut werden können, ist auch die Simulation von

Einfach-, Doppel- und Mehrfachspalt-Experimenten möglich. In einem Planungsfenster (screenshot) kann die Anordnung festgelegt werden.

Zum einen erkennen die Schüler, dass die reale Wellenwanne durch die Simulation sehr gut abgebildet wird, zum anderen können bestimmte Phasen der Bewegung durch die Möglichkeit des Anhaltens besonders gut beobachtet werden.

Es wird empfohlen, die Schüler dazu anzuhalten, das Programm selbst aus dem Internet herunterzuladen und zu Hause einfache Simulationsexperimente durchzuführen.

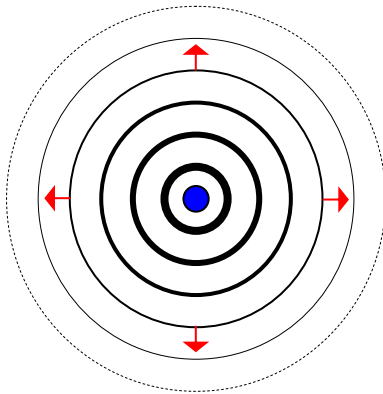




## Unterrichtsinhalte

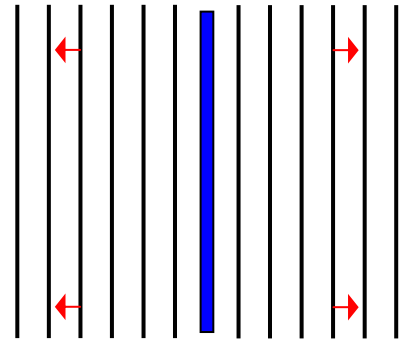
Viele Wellen breiten sich nicht entlang einer Linie (also eindimensional), sondern in einer Ebene oder im Raum aus. Mit der Wellenwanne kann man Wellen an einer Wasseroberfläche beobachten. Mit Hilfe des eingebauten Stroboskops können die auf einen Schirm projizierten Wellenfronten „in Zeitlupe“ dargestellt werden. Zunächst werden verschiedene Erreger untersucht:

punktförmiger Erreger



Es treten kreisförmige Wellenfronten auf, deren Amplitude nach außen hin abnimmt.

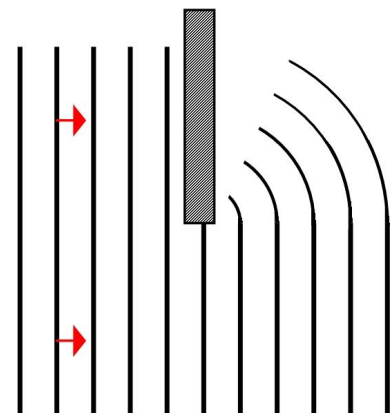
linienförmiger Erreger



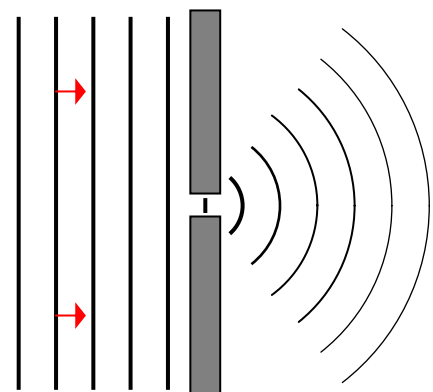
Es treten geradlinige Wellenfronten auf, deren Amplitude trotz zunehmenden Abstands vom Erreger ungefähr gleich bleibt.

Wenn Wellen auf ein begrenztes Hindernis treffen, verlaufen dahinter auch Wellenfronten in Bereiche, die eigentlich vom Hindernis verdeckt sind. Diese Erscheinung heißt Beugung.

Wellen breiten sich also nicht einfach geradlinig aus, sondern treten – mit geringerer Intensität – auch hinter Hindernissen auf. Deswegen sind Radiowellen auch hinter einer für Funkwellen undurchdringlichen Barriere zu empfangen. Auch Schallwellen sind hinter einem begrenzten Hindernis hörbar.



Bei der Beugung an einem schmalen Spalt („schmal“ bedeutet kleiner als die Wellenlänge) beobachtet man hinter dem Spalt kreisförmige Wellenfronten, die in einen breiten Winkelbereich ausgesandt werden. Der Spalt verhält sich für das Ausbreitungsgebiet ähnlich wie ein punktförmiger Erreger.



## 2.5 Interferenz bei zwei Sendern und Interferenz am Doppelspalt

### Lernziele

Die Schüler ...

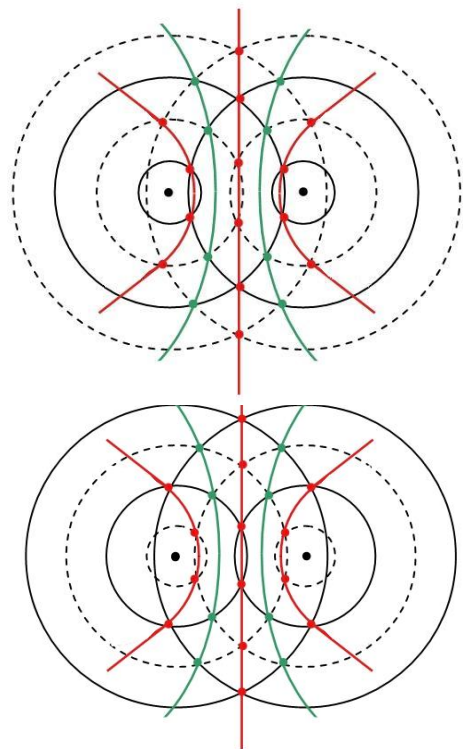
- kennen das charakteristische Interferenzbild zweier Sender und können es mit den Begriffen Maxima und Minima beschreiben;
- verstehen, wie die Zonen konstruktiver und destruktiver Interferenz zustande kommen;
- vollziehen nach, wie sich eine Änderung der Wellenlänge auf das Interferenzbild auswirkt;
- wissen, dass das Interferenzbild hinter einem Doppelspalt ebenso entsteht und die gleichen Charakteristika aufweist.

### Didaktische Hinweise

Die Erklärung der Interferenzmaxima und -minima bei zwei gleichfrequenten und phasengleichen Sendern bildet den Kernpunkt dieser Unterrichtseinheit. Zunächst wird ein typisches Interferenzbild an der Wellenwanne gezeigt, die Beobachtungen werden durch die Begriffe Maxima und Minima beschrieben.

Schließlich werden die Erkenntnisse auf das Interferenzmuster hinter einem Doppelspalt angewandt und experimentell überprüft. Die Überlegung, dass das Verdecken eines Spaltes an manchen Stellen die Intensität erhöhen kann, unterstreicht die Bedeutung der Interferenz als charakteristisches Wellenphänomen.

Es ist unverzichtbar, dass sich die Schüler anhand eigener Konstruktionsübungen (rechts) klar machen, dass die Stellen maximaler destruktiver Interferenz ortsfest und zeitunabhängig sind.



### Hinweise zu Experimenten

An der Wellenwanne (möglichst mit Stroboskop) lassen sich die Interferenz zweier Sender und am Doppelspalt mit einfachen Mitteln realisieren und im Detail beobachten. Auch die Verschiebung von Zonen maximaler destruktiver Interferenz (Interferenzhyperbeln) durch Änderung der Erregerfrequenz bzw. der Wellenlänge kann man an der Wellenwanne sehr gut zeigen. Es ist jedoch etwas aufwändig, den Einfluss des Spaltabstandes experimentell zu ermitteln, da eine Änderung des Spaltabstandes stets mit kleinen Umbauten an der Wellenwanne verknüpft ist. Der Zusammenhang von Interferenzbild und Senderabstand kann mit Hilfe von Moiré-Kreismustern und insbesondere auch durch geeignete Simulationsprogramme wie „Wellenwanne“ [sim\_Wellenwanne\_CD/Wellen-Quanten] dargestellt werden.

### Literatur und Medien

Insbesondere der Einfluss des Spaltabstandes auf die Lage der Interferenzhyperbeln ist mit Hilfe der Simulation „Wellenwanne“ besonders einfach und schnell nachzuvollziehen.

## Unterrichtsinhalte

In einer Wellenwanne befinden sich zwei punktförmige Erreger gleicher Frequenz. Die beiden Erreger erzeugen gleichphasige Wellen, das heißt, von beiden Sendern gehen jeweils gleichzeitig Wellenberge bzw. Wellentäler aus. Die Wellen der beiden Erreger überlagern sich und können sich dabei gegenseitig verstärken oder auslöschen. Diese Erscheinung heißt Interferenz.

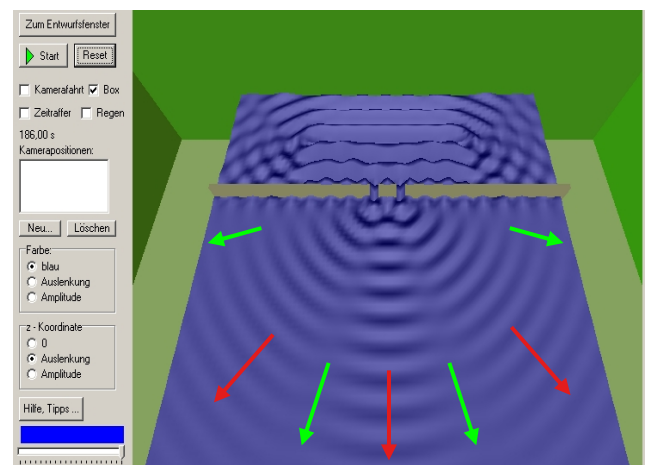
Von jedem der beiden Erreger gehen kreisförmige, sich überlagernde Wellenfronten aus. Dabei gibt es Bereiche, in denen jeweils Wellenberge bzw. Wellentäler aufeinander treffen (rote Linien in der Konstruktion). In diesen Zonen entstehen Wellen mit besonders großer Amplitude (konstruktive Interferenz). Dazwischen liegen Bereiche, in denen stets Wellenberge und -täler aufeinander treffen (grüne Linien in der Konstruktion). In diesen Zonen schwächen sich die Wellen gegenseitig (destruktive Interferenz). Bei gleicher Amplitude findet sogar völlige Auslöschung statt.

Unabhängig vom Zeitpunkt der Beobachtung behalten die Zonen konstruktiver und destruktiver Interferenz ihren Ort bei.

### Interferenz am Doppelspalt

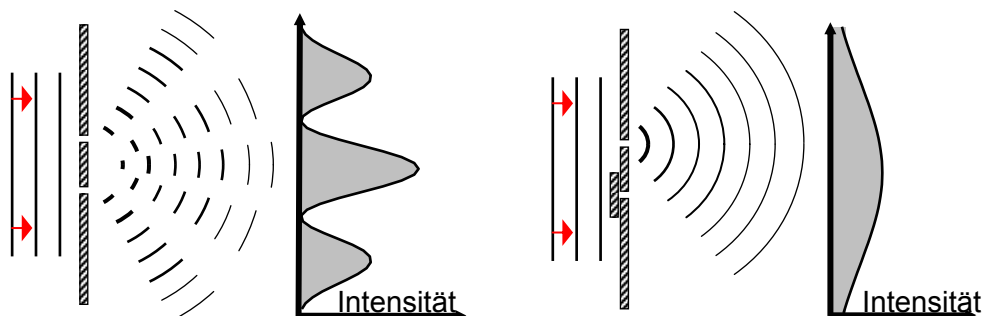
Treffen parallele Wellenfronten senkrecht auf zwei nebeneinanderliegende schmale Spalte (Doppelspalt), so wirkt jeder der beiden Spalte in Bezug auf den dahinterliegenden Bereich wie ein Sender. Hinter dem Doppelspalt tritt daher praktisch das gleiche Interferenzbild auf wie bei zwei punktförmigen Erregern.

Eine Momentaufnahme des Wellenbildes beim Doppelspalt ist hier als Screenshot aus dem Programm „Wellenwanne“ dargestellt. Man beobachtet Richtungen, in die kräftige Wellen ausgesandt werden (Maxima, rot) und Richtungen, die praktisch keine Wellen enthalten (Minima, grün).



Die Maxima und Minima rücken näher zusammen, wenn man bei gleichem Spaltabstand die Wellenlänge verkleinert oder bei gleicher Wellenlänge den Spaltabstand vergrößert.

Wird einer der beiden Spalte verdeckt, entsteht das Beugungsbild des Einfachspaltes. Durch das Verdecken des Spaltes wird die Intensität an manchen Stellen kleiner, an anderen größer! Dies ist eine Folge der Interferenz und ein klarer Beleg für die Ausbreitung von Wellen.



## 2.6 Beugung und Interferenz von Licht

### Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass Laserlicht besonders gut für Beugungs- und Interferenzexperimente geeignet ist;
- interpretieren die Intensitätsverteilungen hinter einem Einfachspalt und einem Doppelspalt als Auswirkungen von Beugung und Interferenz und erkennen, dass damit die wellenartige Ausbreitung von Licht nachgewiesen ist;
- können den Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts angeben;
- erkennen Beugung und Interferenz als Ursache vieler optischer Erscheinungen des Alltags.

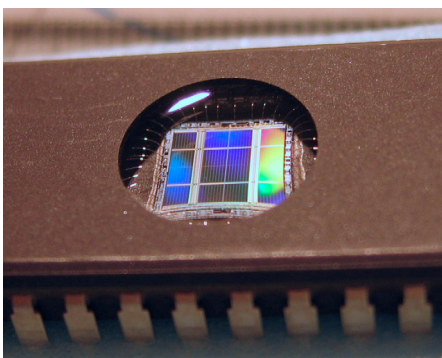
### Didaktische Hinweise

In diesem Abschnitt werden Belege für den wellenartigen Charakter von Licht dargestellt. Die Frage nach der Natur der Lichtwellen oder nach dem Medium, in dem sich diese Wellen ausbreiten, kann und soll in dieser Jahrgangsstufe nicht beantwortet werden.

### Hinweise zu Experimenten

Die Beugungs- und Interferenzeffekte lassen sich mit jedem roten Experimentierlaser oder Laserpointer (geeignet fixiert) in einem leicht abgedunkelten Raum mit rund 3 bis 5 m Schirmabstand bequem darstellen. Der Doppelspalt (z. B. als Dia) sollte nicht mehr als 0,2 mm Spaltmittenabstand besitzen (→ Abstand der Maxima über 1 cm auf dem Schirm). Durch das vorsichtige Verdecken eines Spaltes kann man zeigen, dass das Doppelspaltmuster in ein Einfachspaltmuster übergeht, und dass die „unterdrückten“ Maxima auf Beugungseffekte am Einfachspalt zurückzuführen sind (Spaltbreite  $\gg \lambda$ !). Mit einem Laserpointer für grünes Licht wird der Zusammenhang von Farbe und Wellenlänge qualitativ nachgewiesen.

Feine Metallgitter (wie sie z. B. als Lochblenden in Röhrenmonitoren vorkommen) kann man sowohl bei Beleuchtung mit Laserlicht zur Erzeugung von Interferenzmustern verwenden, als auch zur Beobachtung von Interferenzeffekten vor das Auge halten.



Interferenzeffekte an optischen Gittern (z. B. als Folien preiswert zu erhalten) und an CDs oder Halbleiterstrukturen (EPROMs, siehe Bild) sind besonders farbenprächtigt, wenn punktförmige Lichtquellen (kein diffuses Tageslicht oder Leuchtstoffröhren) verwendet werden.

Einfach- und Doppelspalte sowie optische Gitter ausreichender Qualität lassen sich mit Laserdruckern leicht herstellen (z. B. mit Hilfe des Standardgraphikprogramms „Paint“, einer günstigen Wahl des Verkleinerungsmaßstabs sowie einer Folie; Tintenstrahldrucker

eignen sich auf Grund der Folienbeschichtung nicht). Bei Benutzung von preisgünstigen Laserpointern können somit alle angegebenen Experimente zur Interferenz von rotem Laserlicht als Schülerexperimente durchgeführt werden.

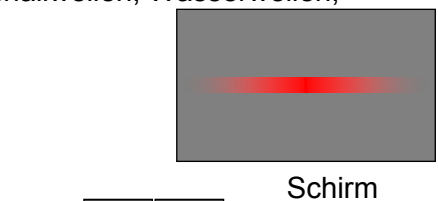
Obwohl der Lidschlussreflex nach dem derzeitigen medizinischen Kenntnisstand ausreicht, um das Auge bei Beleuchtung mit einem Laser dieser Leistungsklasse vor einer Schädigung zu schützen, ist auf die Einhaltung der Sicherheitsrichtlinien unbedingt zu achten!

## Unterrichtsinhalte

Wellen treten in vielen Bereichen der Natur auf: Seilwellen, Schallwellen, Wasserwellen, Funkwellen usw. Nun soll untersucht werden, ob auch Licht Welleneigenschaften aufweist. Für diese Versuche ist Laserlicht besonders geeignet, weil es eine hohe Intensität besitzt, als fast paralleles Lichtbündel emittiert wird und nur Licht einer Farbe enthält.

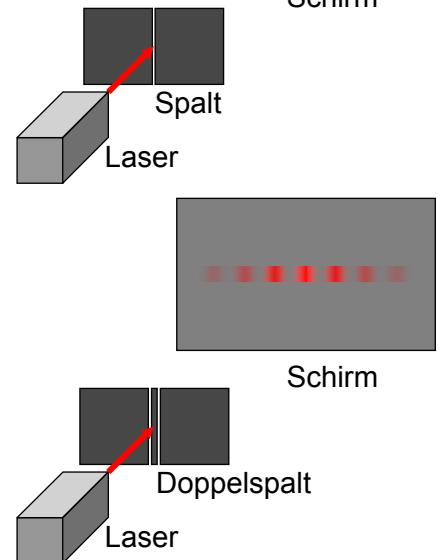
### Versuch 1: Einfachspalt

Im verdunkelten Raum wird ein Spalt einstellbarer Breite mit einem roten Laserlichtbündel beleuchtet und das „durchgehende“ Licht auf einem Schirm beobachtet. Bei breitem Spalt ist einfach ein heller Leuchtpunkt auf dem Schirm sichtbar. Bei Verringerung der Spaltbreite wird der Leuchtfleck schwächer, aber gleichzeitig senkrecht zur Spaltrichtung breiter!



### Versuch 2: Doppelspalt

Nun wird der Einfachspalt durch einen Doppelspalt ersetzt, dessen Spaltabstand wenige Zehntel Millimeter beträgt, so dass das Laserlichtbündel gleichzeitig auf beide Spalte fällt. Auf dem Schirm tritt eine Intensitätsverteilung auf, die man als Maxima und Minima wie beim Doppelspaltversuch mit Wasserwellen interpretieren kann.



Fällt Licht auf einen Einfachspalt oder einen Doppelspalt, so treten ähnliche Beugungsbilder auf, wie sie z. B. bei Wasserwellen beobachtet werden. Offensichtlich verhält sich Licht beim Durchgang durch die Spalte wellenartig.

Wenn statt des roten ein grünes Laserlichtbündel verwendet wird, ist eine ähnliche Verteilung zu beobachten, jedoch mit kleineren Abständen zwischen den Maxima. Dies liegt offensichtlich an der kleineren Wellenlänge des grünen im Vergleich zum roten Licht. Genaue Messungen haben ergeben, dass sich der Bereich des sichtbaren Lichts etwa von  $0,000\,4\text{ mm} = 400\text{ nm}$  (violett) bis  $0,000\,7\text{ mm} = 700\text{ nm}$  (rot) erstreckt. (1 Nanometer =  $1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$ ).



Licht breitet sich in Form von Wellen aus, deren Wellenlänge im Bereich von einem Zweitausendstel Millimeter liegt. Blaues Licht ist kurzwelliger als rotes Licht.

Dass die Wellennatur des Lichts im Alltag nicht offensichtlich ist, liegt an der geringen Wellenlänge im Vergleich zur Abmessung der Gegenstände in unserer Umgebung.

### Versuch 3: Gitter

Wird der Doppelspalt durch ein optisches Gitter (Folie mit lauter parallelen, äquidistanten Spalten) ersetzt, so erhält man ein viel helleres Beugungsmuster mit scharfen Maxima. Damit lässt sich weißes Licht in seine Spektralfarben zerlegen.

Bei einer CD entstehen die schillernden Farben, weil die Datenspuren (Abstand  $1,6\text{ }\mu\text{m}$ ) als Gitter auf das an der Aluschicht reflektierte Licht wirken. Auch feine gedruckte Gitter oder Metallgitter erzeugen unter geeigneten Bedingungen deutliche Interferenzeffekte.

## 2.7 Der Photoeffekt

### Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass man die Abgabe von Elektronen an Metalloberflächen als Folge der Absorption von geeignetem Licht als Photoeffekt bezeichnet;
- wissen, dass die Anzahl der pro Sekunde freigesetzten Elektronen durch die Intensität der Beleuchtung bestimmt wird und auch bei geringer Intensität sofort Elektronen austreten;
- erkennen, dass hinreichend kurzwelliges Licht erforderlich ist, um Elektronen durch den Photoeffekt auszulösen;
- vollziehen nach, dass diese experimentellen Befunde sich nicht mit der Annahme erklären lassen, Licht sei eine Welle, sondern dass sie auf den Teilchencharakter von Licht hinweisen.

### Didaktische Hinweise

An eine Messung der kinetischen Energie der Photoelektronen ist hier nicht gedacht. Es geht darum, die Widersprüche zwischen den Beobachtungen und der Wellenhypothese anhand eines qualitativen Experiments herauszuarbeiten, wobei auf eine sehr sorgfältige Argumentation zu achten ist.

### Hinweise zu Experimenten

Der Versuch mit Zinkplatte und Messverstärker wurde gewählt, weil sich damit qualitativ die Proportionalität von Beleuchtungsintensität und Photostrom zeigen lässt. Auch der fehlende Photostrom bei Beleuchtung mit einer Glühlampe lässt sich so besser zeigen als mit einer geladenen Zinkplatte auf einem Elektroskop, wo die Selbstentladung eine gewisse Rolle spielt. Gleichwohl ist auch der Hallwachsversuch als qualitativer Versuch zum Photoeffekt geeignet.

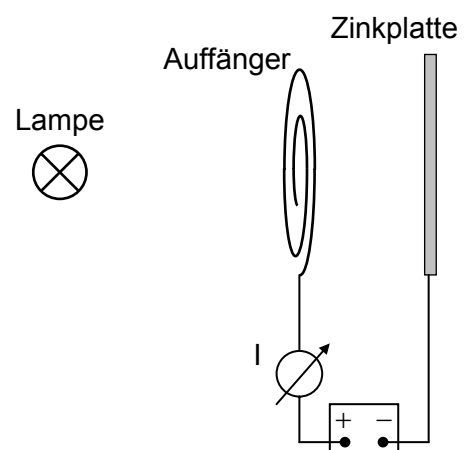
Mittels Freihandversuchen zur Fluoreszenz (z. B. mit fluoreszierenden Absperrbändern oder Sternen zum Aufkleben) lassen sich die Widersprüche zur Wellenhypothese bestätigen. Auch hier ist hinreichend kurzwelliges Licht erforderlich, um ein Nachleuchten auszulösen. Es ist aber darauf zu achten, dass das fluoreszierende Material nicht bereits vor dem Versuch belichtet wurde.

### Unterrichtsinhalte

Wurde im letzten Abschnitt die Ausbreitung von Licht untersucht, steht nun die Frage im Vordergrund, wie sich Licht bei der Absorption z. B. an einer Metalloberfläche verhält.

#### Versuch:

Eine Zinkplatte und ein spiralförmiger Auffangdraht sind in wenigen cm Abstand aufgestellt. Mit dem Netzgerät wird der Auffänger gegenüber der Zinkplatte positiv auf-



geladen. Ein empfindliches Stromstärkemessgerät (Messverstärker) zeigt an, ob Strom fließt.

#### Beobachtungen:

Zunächst tritt kein Stromfluss auf, weil die Luft zwischen Zinkplatte und Auffänger als Isolator wirkt. Wird die Zinkplatte mit einer UV-Lampe beleuchtet, so tritt Stromfluss auf. Wird das Netzgerät umgepolt, so fließt kein Strom mehr. Die Zinkplatte setzt also durch das UV-Licht negativ geladene Teilchen frei, die bei richtiger Polung des Netzgerätes zum Auffänger wandern und den Stromfluss hervorrufen. Diese Teilchen sind Elektronen.

Als Photoeffekt bezeichnet man die Tatsache, dass durch die Beleuchtung mit geeignetem Licht aus Metalloberflächen Elektronen austreten.

#### Weitere Beobachtungen:

Wird die Beleuchtungsintensität verringert, so sinkt die Stromstärke, also die Anzahl der pro Sekunde der von der Zinkoberfläche austretenden Elektronen. Man hat aber festgestellt, dass auch bei sehr geringer Intensität einzelne Elektronen austreten, und zwar sofort nach dem Einschalten der Beleuchtung.

Wird eine Glasscheibe in den Strahlengang gehalten, so verschwindet der Stromfluss. Offenbar ist nur das durch Glas absorbierte UV-Licht in der Lage, Elektronen aus der Zinkplatte „herauszuschlagen“. Ob Elektronen aus der Zinkplatte herausgeschlagen werden, hängt also nur von der Wellenlänge des verwendeten Lichts ab und nicht von der Beleuchtungsintensität.

Diese Befunde sind mit der Vorstellung von Licht als Welle nicht vereinbar. Es lässt sich nicht erklären, warum Licht mit geringfügig größerer Wellenlänge als der Grenzwellenlänge selbst bei großer Beleuchtungsstärke gar keinen Photoeffekt auslöst, Licht mit geringfügig kürzerer Wellenlänge hingegen schon bei geringer Intensität einen Photostrom verursachen kann.

Nimmt man an, Licht sei ein Strom von Teilchen, wobei jedes Teilchen eine bestimmte Energie hat, kann man den Photoeffekt einfach deuten:

Bei geringer Intensität treffen pro Zeiteinheit zwar weniger Teilchen auf die Oberfläche, doch schlagen die energiereichen Teilchen weiterhin einige Elektronen heraus. Licht aus dem langwelligen, offenbar ungeeigneten Spektralbereich besteht aus Lichtteilchen, deren Energie nicht ausreicht, um ein Elektron herauszulösen. Darum tritt selbst bei hoher Intensität kein Photoeffekt auf.

Die Beobachtungen beim Photoeffekt legen die Schlussfolgerung nahe, dass Licht keine Welle ist, sondern in Form von Teilchen mit bestimmter Energie auftritt. Die „Lichtteilchen“ nennt man Photonen.

## 2.8 Energie der Photonen

### Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass jedes Photon eine Energie besitzt, die nur von der Wellenlänge des betreffenden Lichts abhängt;
- kennen den Formelzusammenhang zwischen Photonenenergie und Wellenlänge;
- erkennen die Bedeutung dieses Zusammenhangs anhand praktischer Beispiele.

### Didaktische Hinweise

Die Beziehung  $E = h c / \lambda$  soll nicht durch eine Messreihe bestimmt werden. Auch die fundamentale Bedeutung der Planck-Konstanten  $h$  sowie der Lichtgeschwindigkeit  $c$  sind nicht Thema der Stunde.

Ausgehend von einer Je-desto-Aussage wird der indirekt proportionale Zusammenhang zwischen der Energie der Photonen und ihrer Wellenlänge plausibel gemacht. Damit und mit den Zahlenwerten für die Planck-Konstante und die Lichtgeschwindigkeit ergibt sich die folgende Beziehung zwischen der Energie und der Wellenlänge eines Photons:

$$E_{\text{ph}} = 1240 \text{ eV} \cdot \text{nm} / \lambda.$$

### Hinweise zu Experimenten

Ein qualitativer Zusammenhang von Spannung und Lichtwellenlänge bzw. Farbe kann bei Leuchtdioden qualitativ leicht ermittelt werden. In einem Schülerexperiment erkennt man, dass rote Leuchtdioden bei einer deutlich geringeren Spannung zu leuchten beginnen als grüne oder gar blaue.



## Unterrichtsinhalte

Um Photoeffekt auszulösen, muss das verwendete Licht hinreichend kurzwellig sein. Offensichtlich besitzen die Photonen eine umso größere Energie, je kürzer die Wellenlänge des betreffenden Lichts ist. Genaue Messungen haben ergeben, dass die Photonenenergie umgekehrt proportional zur Wellenlänge ist, und es gilt:

$$E_{\text{Ph}} = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Dabei sind:  $E_{\text{Ph}}$  die Energie eines Photons,  
 $\lambda$  die Wellenlänge des Lichts,  
 $c$  die Lichtgeschwindigkeit ( $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ),  
 $h$  die Planck-Konstante ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ).  
 ( $h$  und  $c$  sind Naturkonstanten)

Die Photonenenergie wird meistens nicht in J (Joule), sondern in der für atomare Vorgänge besser geeigneten Maßeinheit eV (Elektronenvolt) angegeben.

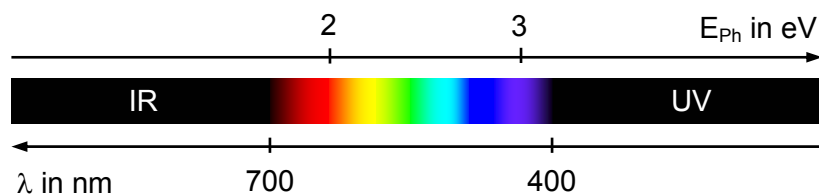
Zur Erinnerung:  $1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Wenn man die Wellenlänge in Nanometern angibt ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ), lässt sich der Zusammenhang zwischen Photonenenergie und Wellenlänge in der praktischen Form schreiben:

$$E_{\text{Ph}} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{\lambda}$$

### Beispiel 1:

Licht ist sichtbar im Wellenlängenbereich von etwa 700 nm (rotes Ende des sichtbaren Spektrums) bis etwa 400 nm (violetttes Ende). Der Energiebereich der sichtbaren Photonen erstreckt sich also etwa von 1,8 eV bis 3,1 eV.



### Beispiel 2:

UV-Licht kann auf Grund seiner großen Photonenenergie Hautzellen schädigen. Besonders gefährlich sind Photonen mit einer Energie von etwa 4 eV, die sogar Hautkrebs auslösen können. Die Wellenlänge dieser UV-B-Strahlung berechnet sich wie folgt:

$$\lambda = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{E_{\text{Ph}}} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{4 \text{ eV}} = 310 \text{ nm}$$

Die in Bezug auf Hautkrebs nicht ganz so gefährliche UV-A-Strahlung liegt im Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 320 nm.