

## 2.9 Licht – Welle oder Teilchen?

### Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass Licht bei manchen Experimenten Teilchencharakter zeigt, bei anderen aber Wellencharakter;
- erkennen, dass die Eigenschaften des Lichts weder mit Hilfe des Wellenmodells noch mit Hilfe des Teilchenmodells vollständig erklärt werden können;
- wissen, dass beide Modellvorstellungen unvereinbar sind und für Licht kein anschauliches Modell zur Verfügung steht.

### Didaktische Hinweise

Die Schüler haben in den vorangegangenen Stunden Interferenzexperimente mit Licht durchgeführt und ein Experiment zum Photoeffekt gesehen. Während das Interferenzmuster nur im Wellenbild zu erklären ist, kann der Photoeffekt nur mit Hilfe des Teilchenmodells erklärt werden. Die Schüler sollen in dieser Stunde dafür sensibilisiert werden, dass es kein anschauliches Modell für das Licht gibt, mit Hilfe dessen alle Eigenschaften des Lichts beschrieben werden können.

Ziel der Gruppenarbeitsphase ist es, die experimentellen Befunde der letzten Stunden zu wiederholen und zu festigen. Dabei können auch experimentelle Befunde aus der geometrischen Optik angeführt werden. Das Reflexionsgesetz wird durch beide Modelle plausibel, hingegen ist die Brechung des Lichts nur mit dem Wellenmodell erklärbar. Falls dieses Phänomen aufgenommen werden soll, muss aber an geeigneter Stelle ein Demonstrationsexperiment mit der Wellenwanne durchgeführt werden.

Die Anfertigung von Postern („Licht ist eine Welle“ bzw. „Licht ist ein Teilchenstrom“) empfiehlt sich.

Bei den anschließenden Kurzreferaten stellen beide Gruppen ihre jeweiligen Ergebnisse vor. Es wird klar, wie gegensätzlich die beiden Modelle sind und dass keines der beiden die Eigenschaften des Lichts vollständig erklären kann. Zusätzlich bekommen sie die Gelegenheit, nachzuvollziehen, wie schwierig es ist, sich von konkreten Modellvorstellungen zu lösen.

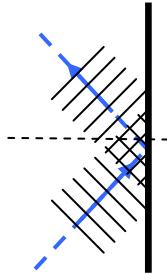
Die wesentlichen Inhalte können am Ende der Stunde in Kurzform (z. B. als Handout) jedem Schüler vorliegen, wobei die Widersprüchlichkeit der Modelle klar zu Tage treten sollte.

Das Handout kann während der Postererstellung durch eine weitere Schülergruppe erfolgen, die durch die Lehrkraft unterstützt wird.

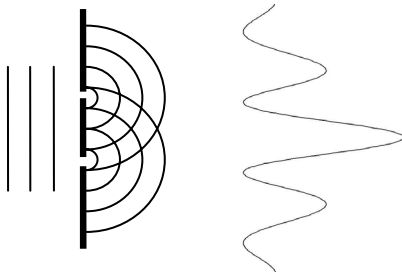
## Unterrichtsinhalte

Die „Wellengruppe“ erstellt ein Poster, auf dem, die Welleneigenschaften des Lichts zusammengefasst sind.

Lichtwellen werden an einem Spiegel nach dem Reflexionsgesetz reflektiert.

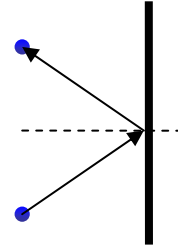


Lichtwellen überlagern sich und erzeugen ein Interferenzmuster.

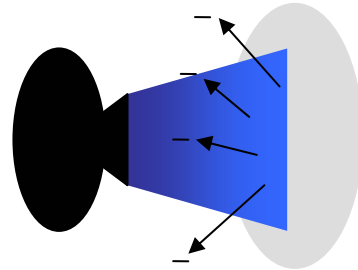


Die „Teilchengruppe“ fasst auf ihrem Poster die Teilcheneigenschaften zusammen.

Photonen werden an einem Spiegel nach dem Reflexionsgesetz reflektiert.



Die Photonen des UV-Lichts schlagen Elektronen aus einem Zinkblech.



Widerspruch!



Nach Fertigstellung der Poster tragen beide Gruppen ihre Ergebnisse in kurzen Referaten vor. Im Anschluss erhalten die Schüler Handouts, auf denen die bekannten Eigenschaften zusammengefasst sind und die Widersprüchlichkeit deutlich gemacht ist.

Die Schüler gehen nach dieser Unterrichtsstunde ohne (vermeintliche) Lösung des Widerspruchs nach Hause. Der Widerspruch kann in anschaulichen Modellen nicht aufgelöst werden.

Als Hausaufgabe formulieren die Schüler Hypothesen, welches Schirmbild man erhalten könnte, wenn ein Doppelspalt mit immer kleiner werdender Laser-Leistung bestrahlt wird.

## 2.10 Photonen sind keine gewöhnlichen Teilchen

### Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass bei geringer Intensität einzelne Photonen durch den Doppelspalt gehen;
- wissen, dass auch dann ein Interferenzmuster entsteht, wenn die Photonen einzeln, nacheinander durch den Doppelspalt gehen;
- wissen, dass das Zustandekommen eines Interferenzmusters nur erklärt werden kann, wenn das Photon in der Doppelspaltenebene als Welle beschrieben wird;
- wissen, dass Photonen in der Doppelspaltenebene prinzipiell nur an einem der Spalte registriert werden, diese registrierten Photonen dann aber nicht mehr zu einem Interferenzbild beitragen können.

### Didaktische Hinweise

Die Hausaufgabe bildet den Einstieg in die Unterrichtsstunde. Den Schülern wird mitgeteilt, dass es prinzipiell möglich – wenn auch technisch schwierig – ist, die Leistung eines Lasers auf einige eV pro Sekunde zu reduzieren.

Bei Leistungsreduktion wird das Schirmbild der Simulation „Laserlicht am Doppelspalt“ zunächst einfach lichtschwächer, wie man es naiv erwartet. Ab einer gewissen Leistung wird das Schirmbild jedoch (bei entsprechender Restlichtverstärkung) körnig, so dass die Photonenhypothese bestätigt wird. Trotzdem kommen an den Stellen maximaler destruktiver Interferenz nach wie vor keine Photonen an.

Führt man eine Messung in der Doppelspaltenebene durch, stellt man fest, dass ein einzelnes Photon stets entweder durch den rechten oder den linken Spalt geht. Wenn allerdings eine solche Messung durchgeführt wird, gibt es kein Interferenzbild mehr.

Anmerkung: Jede Art von Registrierung bzw. Messung setzt eine Wechselwirkung voraus, d. h. ein Photon oder ein sonstiges quantenmechanisches Teilchen muss dabei zwingend mit der Messanordnung in Wechselwirkung treten. Die Messanordnung muss dann zur vollständigen Beschreibung des Systems in die quantenmechanische Betrachtung mit einbezogen werden, was für makroskopische Systeme nicht möglich ist.

### Hinweise zu Experimenten

Um die Wirklichkeitsnähe der Simulation „Laserlicht am Doppelspalt“ zu unterstreichen, ist es ratsam, ein Experiment, bei dem ein Laserstrahl auf einen Doppelspalt trifft, aufzubauen und das entstehende Interferenzexperiment nochmals vorzuführen.

### Literatur und Medien

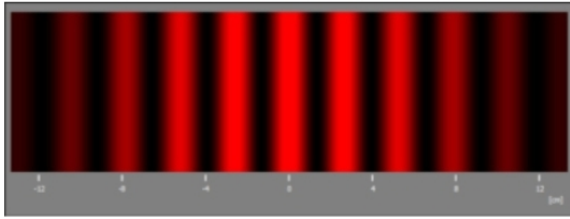
Das Programm „Laserlicht am Doppelspalt“ [sim\_Laserlicht-Doppelspalt\_CD/Wellen-Quanten] ermöglicht es, im Unterricht eine Simulation durchzuführen, bei der die Phänomene untersucht werden können, die bei solch geringen Leistungen auftreten. Die Simulation kann auch von den Schülern an mehreren Rechnern durchgeführt werden, wobei sie dazu Arbeitsaufträge erhalten sollten. Ausgehend von einem Doppelspalt, der mit einem Laser „vernünftiger“ Leistung bestrahlt wird, kann im Programm die auf den Doppelspalt fallende Leistung schrittweise reduziert werden. Es stehen jeweils unterschiedliche, einstellbare Spaltabstände und Wellenlängen (ein roter, ein grüner und ein blauer Laser) zur Verfügung. Bei großen Lichtintensitäten decken sich die Beobachtungen von Experiment und Simulation. Bei kleinen Beleuchtungsstärken gibt es die Möglichkeit, ein lichtschwaches Schirmbild

durch eine simulierte Restlichtverstärkung aufzuhellen, so dass sichtbar wird, welche Teile ausgeleuchtet werden, und welche nicht. Das Programm „Doppelspalt“ [sim\_Doppelspalt\_CD/Wellen-Quanten] vom Lehrstuhl für Physikdidaktik in München bietet zwar nicht die Möglichkeit, die auftreffende Leistung schrittweise zu reduzieren, dafür ist es möglich, die Spalte auch einzeln zu öffnen. Die Schüler sollen angehalten werden, beide Programme auf einem zu Hause zugänglichen Rechner zu installieren.

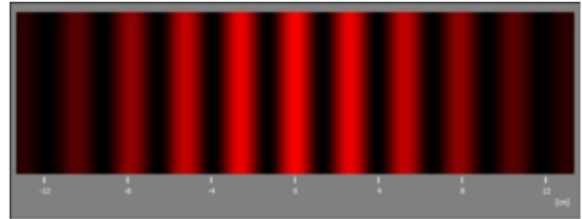
Einen Film, auf dem ein Schirm zu sehen ist, der von einzelnen Photonen getroffen wird, die durch einen Doppelspalt gingen, findet man unter [www\_Quantenphysik\_Schule].

### Unterrichtsinhalte

Führt man die Leistung des Lasers von 1 W beginnend herunter, wird das Interferenzbild zunächst erwartungsgemäß einfach lichtschwächer. Qualitativ ändert sich am Bild nichts.



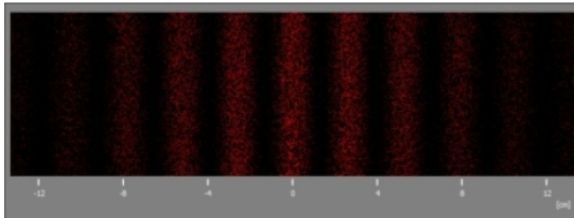
Bestrahlung des Doppelspalts mit einer Leistung von 1 W ohne Restlichtverstärkung



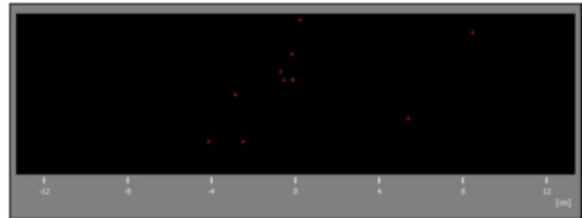
Bestrahlung des Doppelspalts mit einer Leistung von 10  $\mu\text{W}$  mit geeigneter Restlichtverstärkung

Bei weiterer Reduktion der Leistung (und gleichzeitig größerer Restlichtverstärkung) lässt sich jedoch allmählich erkennen, dass sich das Schirmbild aus einzelnen Auftrefforten zusammensetzt, die der Deutlichkeit wegen in der Simulation kurzzeitig nachleuchten.

Bei noch weiterer Verringerung der Leistung werden nach dem Photonenbild nur noch einzelne Photonen ausgesandt. Das Schirmbild zeigt nun eine deutlich körnige Struktur.



Bestrahlung des Doppelspalts bei 100.000 Photonen pro Sekunde mit geeigneter Restlichtverstärkung



Bestrahlung des Doppelspalts bei 10 Photonen pro Sekunde mit geeigneter Restlichtverstärkung

Es gibt Bereiche, die unabhängig von der Bestrahlungsintensität von keinem der ankommenden Photonen getroffen werden. Die Lage dieser Bereiche hängt eindeutig vom Abstand der Spalte ab. Für ein einzelnes Photon, welches am Schirm ankommt, ist demnach das Vorhandensein beider Spalte von Bedeutung.

Solange ein einzelnes Photon nicht registriert wird, muss es als Welle beschrieben werden, die durch beide Spalte geht. Wird sein Ort am Schirm bestimmt, tritt das Photon als punktförmiges Teilchen in Erscheinung.

Führt man eine Ortsbestimmung direkt am Doppelspalt durch, registriert man auch dort einzelne Photonen entweder am linken oder am rechten Spalt – dann gibt es aber kein Interferenzbild mehr!

## 2.11 Die statistische Deutung des Doppelspaltexperiments

### Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass die Helligkeitsverteilung des Schirmbildes, die man bei starker Ausleuchtung des Doppelspaltes erhält, mit Hilfe des Wellenbildes aus der Lage der beiden Spalte und der Wellenlänge berechnet werden kann;
- wissen, dass die Helligkeit in einem kleinen Bereich des Schirms ein Maß für die Wahrscheinlichkeit dafür ist, dass ein Photon in diesem Bereich ankommt.

### Didaktische Hinweise

Durch die Doppelspaltsimulation haben die Schüler erkannt, dass sowohl das Wellenbild als auch die Beschreibung durch Teilchen unvollständige Modellvorstellungen für Licht sind.

Betrachtet man in der Simulation das Schirmbild bei geeigneter Beleuchtungsintensität für einige Zeit, ist deutlich zu erkennen, dass einige Bereiche des Schirms selten von Photonen getroffen werden, andere häufig. Die Bereiche, die bei starker Beleuchtung hell erscheinen, werden häufig getroffen, die, die dunkel erscheinen, selten.

Aus einer einfachen vorgegebenen Verteilung, die in Form eines bekannten Säulendiagramms dargestellt werden kann, wird die statistische Deutung aus der Helligkeitsverteilung erarbeitet.

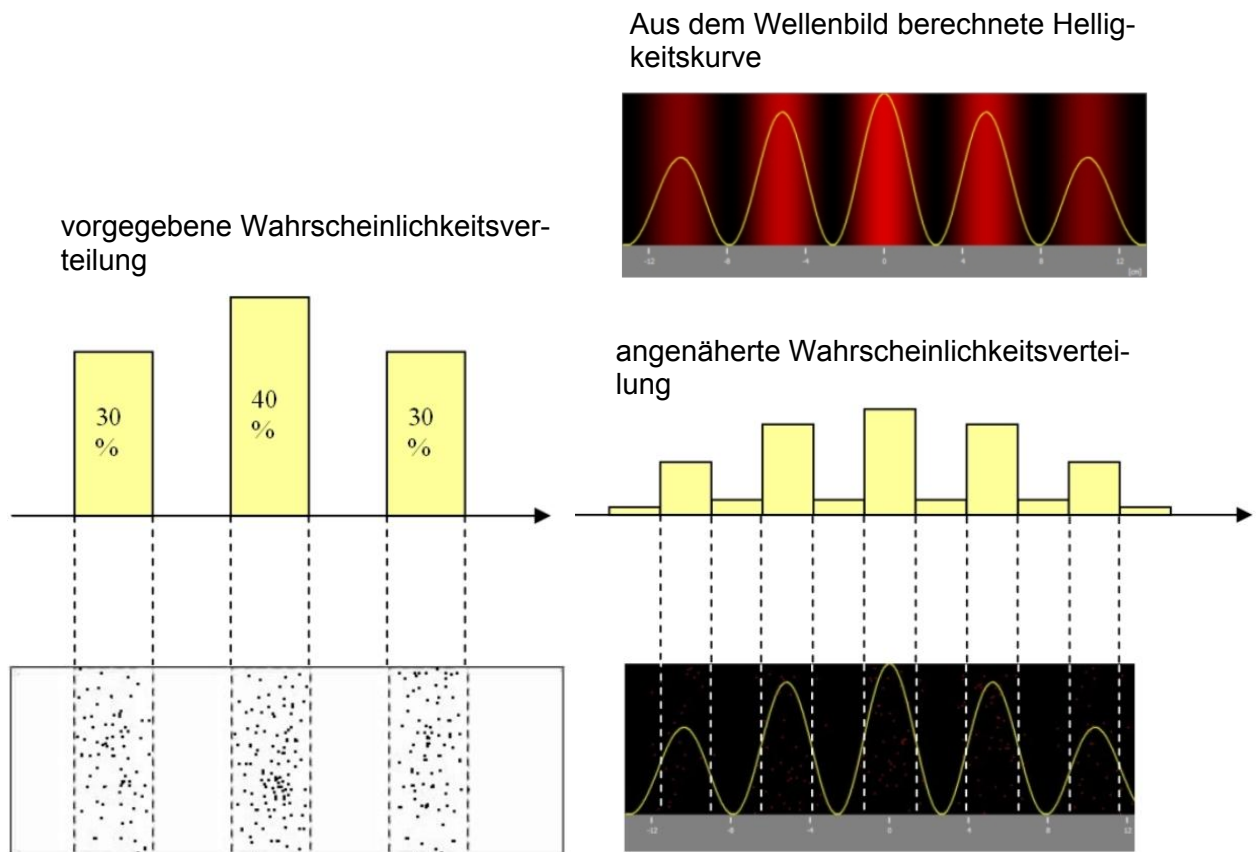
### Literatur und Medien

Bei dem Programm „Laserlicht am Doppelspalt“ kann die Helligkeitsverteilung (normiertes Amplitudenquadrat der elektrischen Feldstärke) mit eingeblendet werden. Damit ist es möglich, eine Brücke zu den aus der Mathematik bekannten Säulendiagrammen zu bauen.

## Unterrichtsinhalte

Mit Hilfe eines Säulendiagramms (z. B. drei Säulen, Angaben in %) wird ausgedrückt, mit welcher Wahrscheinlichkeit eine bestimmte Anzahl von Teilchen auf bestimmte Bereiche eines Schirms treffen soll. Zu einer fiktiven Verteilung wird ein passendes Schirmbild gezeichnet.

Aus der Helligkeitsverteilung, die mit Hilfe des Wellenbildes berechnet wird, kann man ein ähnliches Säulendiagramm für die Auftreffwahrscheinlichkeit beim Doppelspaltexperiment erstellen. Damit wird das körnige Schirmbild beim Doppelspaltexperiment mit geringer Beleuchtungsstärke plausibel.



Die Helligkeitsverteilung beim Doppelspaltexperiment kann mit Hilfe des Wellenbildes aus dem Spaltabstand berechnet werden. Genaue Experimente haben ergeben, dass diese gleichzeitig auch angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit einzelne Photonen an welcher Stelle des Schirms auftreffen.

## 2.12 Sind Elektronen „normale“ Teilchen?

### Lernziele

Die Schüler ...

- kennen den Aufbau der Elektronenbeugungsröhre und können ihn beschreiben;
- vollziehen nach, dass sich das Schirmbild bei Änderung der Beschleunigungsspannung und beim Anlegen eines Magnetfeldes ändert;
- wissen, dass die Elektronen am Graphitkristall ähnlich wie beim Doppelspalt gebeugt werden;
- deuten das Schirmbild bei der Elektronenbeugungsröhre als Interferenzmuster.

### Didaktische Hinweise

Nachdem die Schüler gelernt haben, dass sich Licht nicht durch ein anschauliches Modell vollständig beschreiben lässt, stellt sich die Frage, ob dies auch für andere Objekte gilt, die sich auf Grund ihrer Größe nicht direkt beobachten lassen, wie z. B. Elektronen.

### Hinweise zu Experimenten

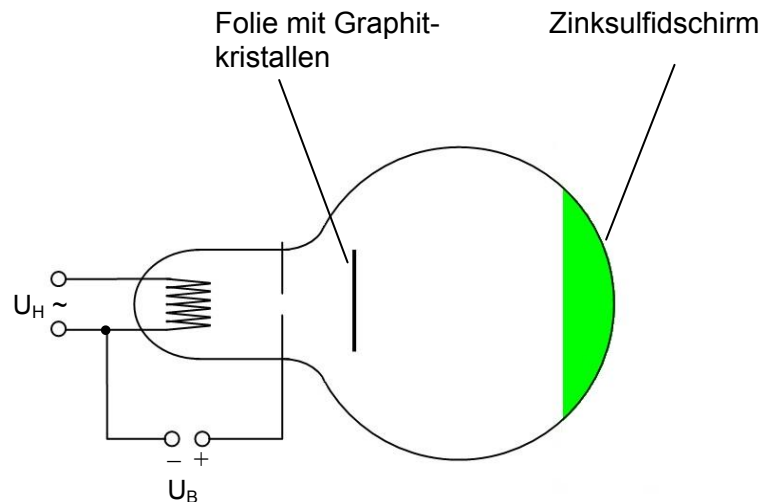
In der Elektronenbeugungsröhre werden Elektronen auf Graphitkristalle geschickt. Es führt zwar zu weit, die Vorgänge am Graphitkristall genauer zu erläutern, doch kann den Schülern mitgeteilt werden, dass an den Graphitkristallen ein ähnlicher Effekt eintritt, wie bei einem Doppelspalt, auf den Photonen treffen.

Das entstehende Schirmbild erinnert an ein Interferenzmuster. Durch Variation der Beschleunigungsspannung und durch Anlegen eines Magnetfeldes (z. B. mit Hilfe eines Hufeisenmagneten) kann gezeigt werden, dass die Teilchen, die das Interferenzmuster bilden, geladene Teilchen sind. Da die Interferenzringe bei größerer Beschleunigungsspannung näher zusammenrücken, liegt zudem die Vermutung nahe, dass energiereiche Elektronen – ähnlich wie energiereiche Photonen – eine kleinere Wellenlänge haben, als energieärmere.

## Unterrichtsinhalte

### Versuch:

Werden Elektronen in einer so genannten Elektronenbeugungsröhre beschleunigt und auf Graphitkristalle geschickt, treffen die Elektronen anschließend auf einen Fluoreszenzschirm, wo man hellere und dunklere konzentrische Kreise beobachtet.



### Erklärung:

Nimmt man an, dass die Graphitkristalle quasi als Doppelspalt fungieren, kann das Schirmbild als Interferenzmuster gedeutet werden, welches durch geladene Teilchen – Elektronen – zustande kommt. Das Interferenzmuster besteht allerdings nicht aus Streifen sondern aus konzentrischen Ringen.

Dass es sich tatsächlich um geladene Teilchen handelt, erkennt man daran, dass ein äußeres Magnetfeld Einfluss auf die Gestalt der Interferenzringe hat.

Vergrößert man die Beschleunigungsspannung, erhöht sich einerseits die kinetische Energie der Elektronen, andererseits beobachtet man ein Zusammenrücken der Interferenzringe. Letzteres spricht für eine Verringerung der Wellenlänge.

Auch Elektronen verhalten sich unter gewissen Umständen wie Wellen und erzeugen Interferenzmuster. Die Wellenlänge der Elektronen ist offenbar umso kleiner, je energiereicher sie sind.



## 2.13 Elektronen am Doppelspalt

### Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass auch Elektronen, die einzeln und hintereinander auf einen Doppelspalt treffen werden, ein Interferenzmuster erzeugen;
- wissen, dass das Zustandekommen eines Interferenzmusters nur erklärt werden kann, wenn das Elektron in der Doppelspaltebene als Welle beschrieben wird;
- wissen, dass Elektronen ähnlich wie Photonen in der Doppelspaltebene prinzipiell nur an einem der Spalte registriert werden, diese registrierten Teilchen dann aber nicht mehr zu einem Interferenzbild beitragen können;
- wissen, dass sich die Auftreffwahrscheinlichkeit für ein Elektron aus einer Theorie berechnen lässt, in der ein Elektron als Welle beschrieben wird.

### Didaktische Hinweise

Von der Elektronenbeugungsröhre, die im Detail recht schwierig zu verstehen ist, wird zu dem im Prinzip einfachen Doppelspaltexperiment mit Elektronen – dem berühmten Jönsson-experiment – und einer entsprechenden Simulation übergeleitet.

Um zu verdeutlichen, dass Elektronen beim Durchgang durch den Doppelspalt ein überraschendes Verhalten zeigen, ist es sinnvoll, zunächst das Verhalten klassischer Teilchen zu untersuchen.

Führt man die Doppelspaltsimulation bei extrem kleinen Spaltabständen mit Elektronen durch, erhält man im Fall *eines* geöffneten Spaltes eine deutliche Häufung hinter dem Spalt, ähnlich wie im Fall klassischer Teilchen, die nach außen stark abnimmt. (Beugungseffekte am Einzelspalt, die natürlich ebenfalls eine Rolle spielen, sollen hier nicht thematisiert werden). Sind aber beide Spalte geöffnet, erhält man ein Interferenzmuster, ähnlich wie bei der Verwendung von Photonen: Auf dem Schirm gibt es Bereiche, die von den Elektronen häufig und solche, die selten getroffen werden. Beschreibt man Elektronen ähnlich wie Photonen im Wellenbild, kann aus dem Spaltabstand und der Elektronenenergie die Helligkeitsverteilung berechnet werden. Diese gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit, Elektronen an einer bestimmten Stelle des Schirms auftreten.

### Literatur und Medien

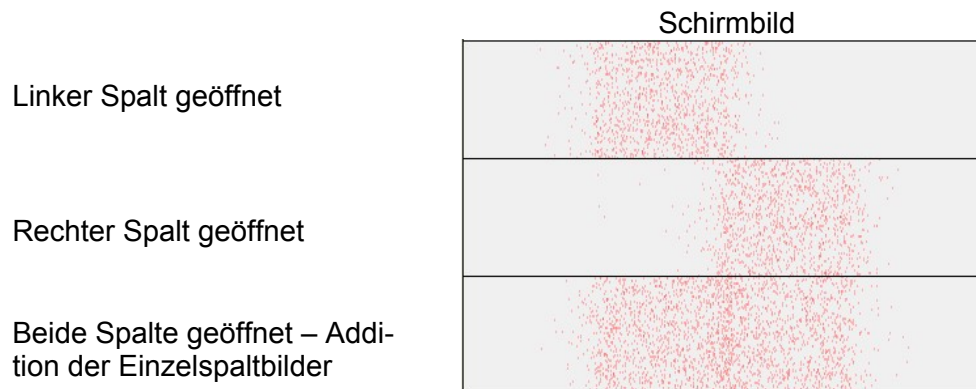
Ein sehr geeignetes Werkzeug ist die Simulation „Doppelspalt“ [sim\_Doppelspalt\_CD/Wellen-Quanten] vom Lehrstuhl für Physikdidaktik der Universität München. In diesem Programm lassen sich verschiedene Teilchen durch eine Doppelspaltanordnung schicken, wobei auch nur ein Spalt geöffnet werden kann. Durch die Belichtung einzelner „Photostreifen“ kann der Unterschied zwischen klassischen und quantenmechanischen Teilchen gut veranschaulicht werden. Es ist für die Schüler sehr empfehlenswert, das Programm aus dem Internet herunterzuladen.

## Unterrichtsinhalte

Um das Interferenzverhalten von Elektronen genauer zu untersuchen vollzieht man mittels einer Simulation ein Experiment nach, das im Jahr 1961 von Claus Jönsson in Tübingen erstmals durchgeführt wurde: ein Doppelspaltexperiment mit Elektronen. Die Spaltbreite betrug dabei nur etwa  $1,5 \mu\text{m}$ .

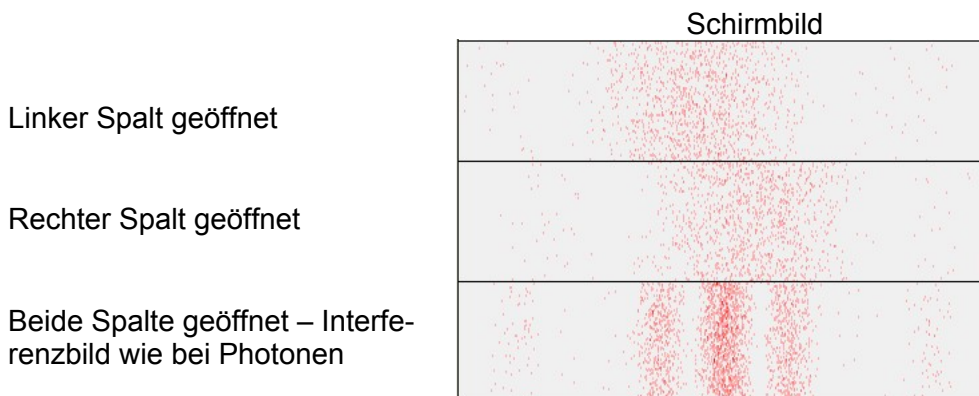
Um das außergewöhnliche Verhalten von Elektronen zu erfassen, wird die Simulation zunächst mit gewöhnlichen Teilchen durchgeführt.

### Doppelspaltexperiment mit klassischen Teilchen (z. B. Gewehrkugeln)



Einzelne klassische Teilchen gehen beim Doppelspaltexperiment entweder durch den linken oder den rechten Spalt. Es ist nicht von Belang, ob der jeweils andere Spalt geöffnet ist.

### Doppelspaltexperiment mit Elektronen



Die Auftreffwahrscheinlichkeit für *einzelne* Elektronen ist beim Doppelspaltexperiment durch den Abstand *beider* Spalte festgelegt. Sie berechnet sich, indem das Elektron als Welle beschrieben wird, die durch beide Spalte tritt.

Jönsson musste das Interferenzbild zwar stark vergrößern, doch dann konnte er deutlich das Interferenzmuster erkennen.

## 2.14 Die Welt der Quanten (Vertiefung 1)

### Lernziele

Die Schüler ...

- können die zentralen Eigenschaften von Quantenteilchen benennen und Unterschiede zu klassischen Teilchen angeben;
- wissen, dass alle Teilchen des Mikrokosmos durch die Quantenphysik beschrieben werden.

### Didaktische Hinweise

Im Animationsfilm „What the bleep do we know – the double-slit-experiment“ [Film\_Doppelspalt\_CD/Wellen-Quanten] steht das Doppelspaltexperiment mit Elektronen im Zentrum.

Der „Grand-Daddy of all Quantum-weirdness“ erzählt in amerikanischer Sprache, aber auf einprägsame Weise, von den seltsamen Phänomenen, die man beim Doppelspaltexperiment beobachtet. Zwar ist der Comicfilm recht unterhaltsam, doch leidet an einigen Stellen die Präzision unter der Plakativität. Die Schüler sollten nach dem Unterricht der vergangenen Sequenz diese unpräzisen Stellen selbst finden und die bisweilen unpassenden Vergleiche und Bilder als solche erkennen. Unkommentiert sollte man die strittigen Passagen des Films nicht lassen.

Am Ende des Films fassen die Schüler die Informationen des Films und der vorangegangenen Unterrichtsstunden nochmals zusammen, wobei die Liste auch mit Hilfe der Lehrkraft komplettiert werden kann. Ein Hinweis, dass die Quantentheorie eine universelle Theorie ist und alle Teilchen des Mikrokosmos durch sie beschrieben werden müssen, ist an dieser Stelle angebracht.

Die Schüler können angehalten werden, den Film zu Hause selbst anzusehen und sich die Seltsamkeiten der Quantentheorie nochmals vor Augen zu führen.

### Literatur und Medien

Der Film „What the bleep do we know – the doubleslit-experiment“ ist in den Dokumentarfilm „What the bleep do we know“ eingebunden, bei dem auch namhafte Physiker Beiträge u. a. zur Vermittlung der Quantentheorie geleistet haben.

## Unterrichtsinhalte

Die Schüler sehen den Film „What the bleep do we know – the doubleslit-experiment“ und fassen mit Hilfe des Films die wesentlichen Aspekte des Doppelspaltexperiments für alle quantenmechanischen Teilchen zusammen. Insbesondere die unpräzisen Stellen dienen dazu, sich intensiv mit den Aussagen der Quantentheorie auseinanderzusetzen.



- Photonen, Elektronen und alle anderen Objekte des Mikrokosmos gehorchen den Gesetzen der Quantenphysik.
- Quanten(-teilchen) müssen manchmal als Teilchen und manchmal als Welle beschrieben werden.
- Quanten sind aus klassischer Sicht weder Teilchen noch Welle.
- Gehen Quanten durch einen Doppelspalt, und werden in der Doppelspaltebene nicht registriert, so haben sie dort die Eigenschaft „Ort“ nicht.
- Macht man eine Ortsbestimmung direkt an den Spalten, so registriert man immer nur ein ganzes Quant, entweder rechts oder links; solche „untersuchten“ Quanten erzeugen kein Interferenzbild mehr.
- Treffen die Quanten auf einen Schirm, treten sie als kleine Punkte in Erscheinung.
- Auf jeden Bereich des Schirmes treffen die Quanten mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit.
- Die Wahrscheinlichkeit, auf einen bestimmten Bereich zu treffen, kann man im Wellenbild aus der Lage beider Spalte berechnen.

## 2.15 Gebundene Elektronen als stehende Wellen (Vertiefung 2)

### Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass es notwendig ist, gebundene Elektronen als stehende Wellen zu beschreiben;
- wissen, dass Elektronen durch elektromagnetische Kräfte an den Atomkern gebunden und damit eingesperrt werden;
- vollziehen nach, dass Orbitale als Gebiete einer bestimmten Aufenthaltswahrscheinlichkeit eine unmittelbare Konsequenz der Quantentheorie sind.

### Didaktische Hinweise

Ziel ist es nicht, in dieser Stunde ein tragfähiges, quantenphysikalisches Atommodell zu entwickeln, sondern eine Vorstellung davon zu vermitteln, dass die Quantenphysik den Schlüssel zur Beschreibung von Atomen liefert und sich daraus der Orbitalbegriff ableitet. Als ein mögliches Beispiel, an dem sich der Begriff der Aufenthaltswahrscheinlichkeit veranschaulichen lässt, kann das Experiment von Crommie, Lutz und Eigler dienen (vgl. Abb.). Das Innere des Rings wurde mit einem Rastertunnelmikroskop abgetastet. Die Stärke des gemessenen Tunnelstroms ist ein Maß für die Elektronendichte an einem Ort, also ein Maß für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons innerhalb des Rings. Das zweite Bild veranschaulicht das Zustandekommen des „Interferenzbilds“. Die Punkte repräsentieren dabei Orte, an denen das Elektron registriert wurde. Orte destruktiver Interferenz sind hier durch Kreislinien gekennzeichnet. Dort ist die Wahrscheinlichkeit, das Elektron anzutreffen, am geringsten.

### Hinweise zu Experimenten

Chladnische Klangfiguren veranschaulichen experimentell sehr schön zweidimensionale stehende Wellen. Allerdings ist es schwierig, eine Klangfigur zu erzeugen, bei der die Knotenlinien konzentrische Kreise sind.

### Literatur und Medien

Mit Hilfe eines Java-Applets [[www\\_Chladni](http://www.Chladni)] können Chladnische Klangfiguren virtuell erzeugt werden. Anzahl und Lage der Knotenlinien können eingestellt werden.

Die Bilder der Experimente, bei denen einzelne Elektronen eingesperrt wurden, finden sich an vielen Stellen im Internet, z. B. bei [[www\\_Crommie-Lutz-Eigler](http://www.Crommie-Lutz-Eigler)].

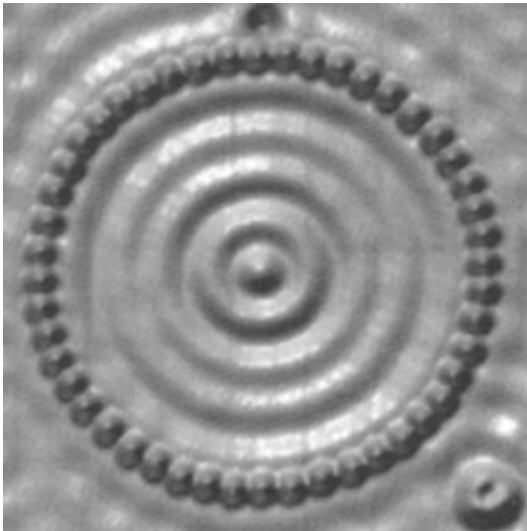
Unter [[sim\\_atomos\\_CD/Atome](http://sim_atomos_CD/Atome)] können Orbitale des Wasserstoffatoms in einer Simulation dargestellt werden. Wie bei den Chladnischen Klangfiguren kann durch die Angabe der Quantenzahlen Anzahl und Lage der Knotenflächen eingestellt werden.

## Unterrichtsinhalte

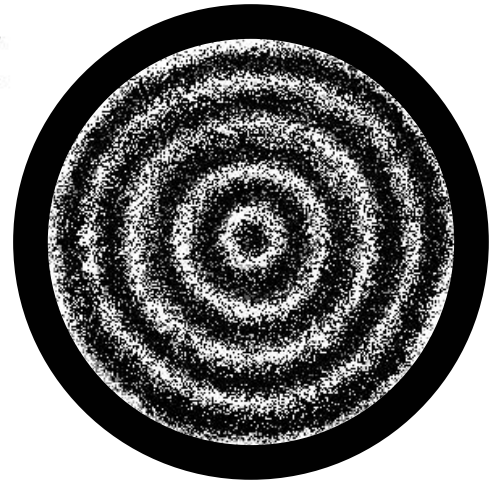
Durch ein kurzes Referat, das von einem Schüler gehalten werden kann, werden die Welleneigenschaften „eingesperrter“ Teilchen und die Ergebnisse des Doppelspaltexperiments mit Elektronen wiederholt. Grundlage hierzu bildet der bisherige Unterricht.

Folgende Fragen liegen dann auf der Hand:

„Wie sperrt man Elektronen ein?“ und „Wie verhalten sich eingesperrte Elektronen?“



48 ringförmig angeordnete Eisenatome auf einer Kupferoberfläche



Häufigkeitsverteilung des Antreffens eines im Ring eingesperrten Elektrons

Im Jahr 1993 gelang es Crommie, Lutz und Eigler, ein Elektron in einem Ring aus 48 Eisenatomen auf einer Kupferoberfläche einzusperren. Es ist zwar nicht möglich, dies zu photographieren, doch konnte man in vielen Messungen das Innere des Rings Punkt für Punkt abtasten. Im Prinzip wurde an jeder Stelle mehrfach gemessen, ob das Elektron anwesend ist oder nicht. Es ergaben sich solche Orte, an denen das Elektron selten angetroffen wurde (als Wellentäler dargestellt) und solche, wo das Elektron häufig angetroffen wurde (Wellenberge). Einerseits entstand das Bild also ähnlich wie beim Doppelspaltexperiment, wo einzelne Elektronen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit auf einen Bereich des Schirms treffen und so letztendlich ein Interferenzbild ergeben. Andererseits erinnert das Bild stark an eine Chladnische Klangfigur, bei der zweidimensionale stehende Wellen beobachtet werden.

So wie Elektronen, die durch einen Doppelspalt laufen, als fortschreitende Welle beschrieben werden müssen, muss man eingesperrte Elektronen als stehende Welle beschreiben.

Wird ein Elektron an ein Proton gebunden und damit auf mikroskopisch engem Raum „eingesperrt“, erhält man das einfachste aller Atome, das Wasserstoffatom. Das Elektron muss man dann als stehende Welle im dreidimensionalen Raum beschreiben.

Eine dreidimensionale Welle kann nicht ohne weiteres bildlich dargestellt werden. Man kann jedoch (zumindest in Gedanken) viele Ortsmessungen durchführen und die Punkte markieren, an denen das Elektron angetroffen wird.

Man erhält so Bereiche, innerhalb derer das Elektron mit 90-prozentiger Wahrscheinlichkeit angetroffen wird. Einen solchen Bereich nennt man Orbital.

## 2.16 Atome haben unterschiedliche Energieniveaus (Vertiefung 3)

### Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass für ein Elektron, das an ein Proton gebunden ist, nur bestimmte Schwingungszustände möglich sind;
- vollziehen nach, dass unterschiedliche Schwingungszustände mit unterschiedlichen Energieniveaus verknüpft sind.

### Didaktische Hinweise

Die Schüler haben über die sukzessive Heranführung – ausgehend vom Doppelspaltexperiment mit Elektronen – erkannt, dass Elektronen, die durch elektromagnetische Kräfte an den Atomkern gebunden sind, als stehende Wellen zu betrachten sind. Ziel dieser Unterrichtsstunde ist es, daraus die Existenz der Energieniveaus abzuleiten und verständlich zu machen.

Ausgangspunkt der Überlegungen bzw. Folgerungen sind die stehenden Wellen einer schwingenden Saite. Im einfachsten Fall sind dies die reinen Zustände mit einem, zwei, drei, ... Knoten und den zugehörigen, sich daraus ergebenden Wellenlängen. Überlagerungen von Zuständen sollen hier nicht betrachtet werden.

Je nach Schwingungszustand kann demnach ein eingesperrtes Elektron nur ganz bestimmte Energiewerte annehmen. Da Elektronen wie Photonen als Wellen beschrieben werden müssen, liegt es nahe, dass auch die Wellenlänge von Elektronen umso kleiner ist, je größer ihre Energie ist. Einen experimentellen Hinweis gab es bereits bei der Elektronenbeugungsröhre.

Je nach Schwingungszustand hat demnach ein an ein Proton gebundenes Elektron eine bestimmte Energie. Die zu den unterschiedlichen Zuständen gehörigen Energiewerte kann man in ein Energieniveauschema eingetragen

### Hinweise zu Experimenten

Eindimensionale stehende Wellen können z. B. mit Hilfe eines regelbaren Experimentiermotors mit Exzenter und einem Gummiseil erzeugt werden.

### Literatur, Medien

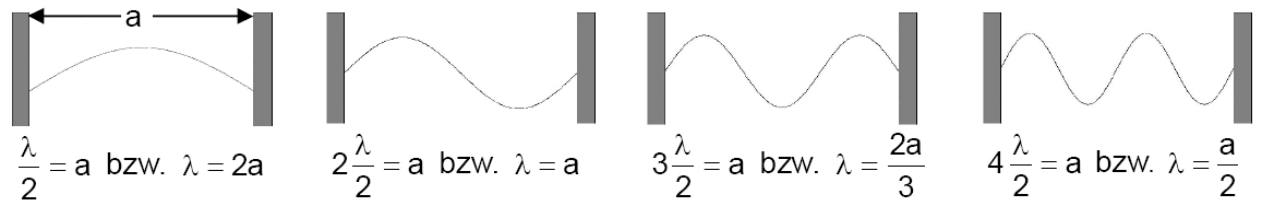
Als Simulation eignet sich das Programm „Laewell“ [sim\_Wellenmaschine\_CD/Wellen-Quanten]. Dort kann eine periodisch angeregte Welle, die an einem festen Ende reflektiert wird, simuliert werden. Da der Ablauf der Simulation jederzeit unterbrochen werden kann, ist es möglich, jede Phase des Zustandekommens einer stehenden Welle genau zu untersuchen.

## Unterrichtsinhalte

Stehende Wellen können am einfachsten an einer schwingenden Saite veranschaulicht werden.

So wie die Schwingung einer Saite bei einer stehenden Welle nur ganz bestimmte Wellenlängen besitzt, kann ein gebundenes Elektron auch nur ganz bestimmte Schwingungszustände annehmen.

Bei der Saite, deren Enden im Abstand  $a$  fest eingespannt sind, gibt es z. B. die folgenden Zustände:

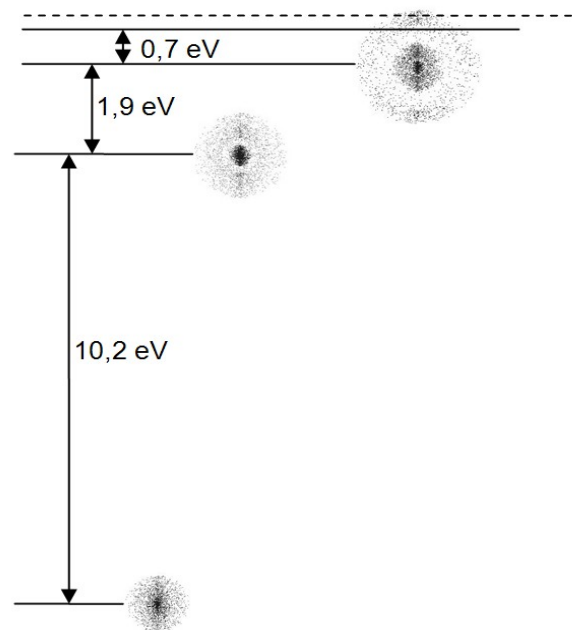


Wie ergeben sich aus diesen Betrachtungen Energieniveaus?

Bei Photonen gilt die Energie-Wellenlänge Beziehung  $E = hc / \lambda$ , je kleiner also die Wellenlänge ist, desto größer ist die Energie des Photons.

Für Elektronen gilt ähnlich wie für Photonen, dass die Energie umso größer ist, je kleiner die Wellenlänge ist. Wird ein Elektron durch ein Proton „eingesperrt“, sind wie bei der stehenden Welle nur Zustände mit ganz bestimmten Wellenlängen möglich. Zu jeder dieser möglichen Wellenlänge gehört ein möglicher Energiewert.

Die Energiewerte trägt man bei Atomen, z. B. dem Wasserstoffatom, in ein so genanntes Energieniveauschema (siehe Abb.) ein.





## 2.17 Der Laser (Vertiefung 4)

### Lernziele

Die Schüler ...

- wissen, dass ohne Quantenphysik ein Laser weder erklärt noch gebaut werden kann;
- verstehen unter Einbringung ihrer Kenntnisse über die Quantenphysik den Aufbau und die Funktion eines Lasers auf qualitativem Niveau.

### Didaktische Hinweise

In dieser abschließenden Stunde setzen die Schüler alle erworbenen Kenntnisse über Wellen, Quanten und Atome zusammen, um ein fortgeschrittenes, wenn auch nur qualitatives Verständnis von der Funktionsweise eines Lasers zu bekommen. Der Vorschlag dieser Unterrichtsstunde orientiert sich sehr nah an dem in „physik 2000“ [[www\\_Laser/physik2000](http://www_Laser/physik2000)] angebotenen Kurs.

Die Schüler arbeiten zu zweit an einem Rechner den Kurs über Laser durch, in welchem einer jungen Studentin ein Laser von einer erfahrenen Professorin erklärt wird. Dabei führen Studentin und Professorin einen Dialog, den die Schüler nachvollziehen.

In jeder Sequenz des Gesprächs finden sich Java-Applets, so dass im Verlauf des Gesprächs alle wesentlichen Aspekte durch visuelle Hilfen gut erläutert werden.

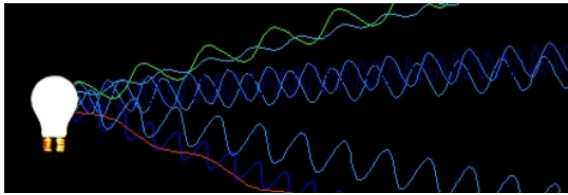
Zur Ergebnissicherung sollte ein zusammenfassendes Arbeitsblatt (evtl. mit Lückentext) an die Schüler herausgegeben werden.

### Literatur und Medien

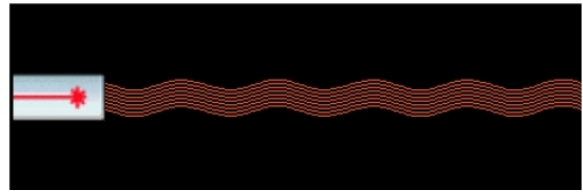
Auf der deutschen Internetseite von „physik 2000“ [[www\\_Laser/physik2000](http://www_Laser/physik2000)] werden neben dem Laser viele weitere Anwendungen der modernen Physik sehr anschaulich erklärt. Die Art der Erklärung ist gewöhnungsbedürftig und sicher nicht jedermanns Geschmack. Es werden aber komplizierte Sachverhalte in kleine „Häppchen“ zerlegt, durch Java-Applets begreifbar gemacht und durch den Text untermauert.

## Unterrichtsinhalte

Laserlicht ist monochromatisch, ein Laserstrahl hat eine sehr geringe Divergenz und erzeugt kohärentes Licht, d. h. die ausgesandten Photonen „schwingen“ alle im Takt. Laser gibt es seit 1960.



Licht einer Glühlampe: Ein ganzes Spektrum an Wellenlängen bzw. Farben wird emittiert.



Laserlicht: Nur eine Wellenlänge bzw. Farbe; die Wellenzüge „schwingen im Takt“

### Laserlicht wird erzeugt – induzierte Emission

Photonen geeigneter Wellenlänge können Atome anregen, so dass diese in einen energetisch höheren Zustand gehoben werden. Die Photonen werden dabei vom Atom absorbiert. Sie können aber auch angeregte Atome wieder in den Grundzustand versetzen, indem sie die Emission eines zweiten, identischen Photons auslösen (induzieren). Man spricht daher von induzierter Emission.

Teilchenbild: Ein Photon trifft auf ein bereits passend angeregtes Atom, wobei das Atom ein Photon emittiert, das identisch mit dem ursprünglichen ist.



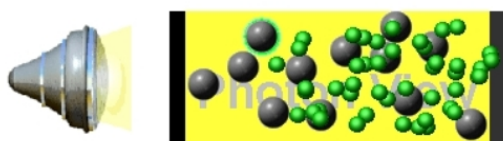
Wellenbild: Eine Lichtwelle trifft ein angeregtes Atom, wobei die Energie der Welle verdoppelt wird und das Atom wieder im tieferen Energiezustand ist.



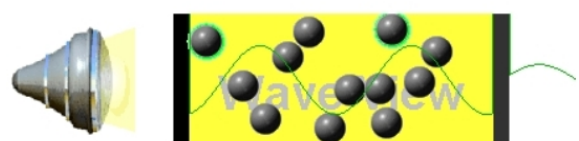
### Licht im Resonator

Bringt man die Atome in einen so genannten Resonator (ein kleiner Zylinder, dessen Stirnseiten verspiegelt sind), so kann durch Zufuhr von Energie die Anzahl der angeregten Atome sehr groß werden. Ein zufällig ausgesandtes Photon, das senkrecht auf einen der Spiegel fällt, wird nun ständig hin und her reflektiert. Unterwegs trifft es immer wieder auf angeregte Atome, weshalb die Zahl der durch induzierte Emission ausgelösten Photonen immer weiter ansteigt. Man muss allerdings durch Energiezufuhr von außen dafür sorgen, dass ständig genügend Atome im angeregten Zustand sind.

Ein kleiner Teil dieser „Photonenlawine“ verlässt den Resonator als Laserstrahl, da einer der Spiegel eine geringe Durchlässigkeit besitzt. Im Wellenbild stellt man sich eine im Resonator befindliche stehende Lichtwelle vor, deren Amplitude ständig anwächst.



Laser im Teilchenbild



Laser im Wellenbild