

“QED – Materie, Licht und das Nichts”

1

Wissenschaftliches Gebiet und Thema:

Physikalische Eigenschaften von Licht

Titel/Jahr:

“QED – Materie, Licht und das Nichts” (2005)

Filmstudio:

Sciencemotion

Regisseur:

Stefan Heusler

Webseite des Films:

<http://www.sciencemotion.de/>

Beschreibung des Films:

Die DVD hat zwei Teile. Im künstlerischen Teil (30 Min.) besucht das Puppentheater Nick & Prof. Schwerelos auf ebenso charmante wie eigenwillige Weise das Gedankengebäude, das Einstein & Co. uns hinterlassen haben. Die beiden etwas verschrobene Wissenschaftler experimentieren, entwickeln Modelle, simulieren am Computer und haben jede Menge Spaß dabei, ohne dass zwangsläufig jede Idee gut oder jede Aussage vollkommen wasserdicht wäre. In rasantem Tempo werden so Modellvorstellungen zum Thema *Licht* aus den verschiedenen Physikepochen spielerisch präsentiert. Den roten Faden spinnen dabei zwei Naturkonstanten: Die Lichtgeschwindigkeit c und das Planck'sche Wirkungsquantum h .



Der technische Teil der DVD (120 Min.) beschreibt in einer Kombination aus Bildern und Formeln einzelne Bausteine zur Entwicklung der modernen Theorie der Wechselwirkung von Licht mit Materie, der Quantenelektrodynamik (QED). Die Modelle und Experimente des künstlerischen Teils werden in ca. 30 einzelnen Sequenzen weiter vertieft. Für etwa die Hälfte der technischen Sequenzen reicht Schulmathematik aus.

Link zur Trailer Webseite

<http://www.sciencemotion.de/>

DVD kaufen:

Die DVD kann für EUR 20,00 zzgl. Versandkosten per E-Mail bestellt werden über <http://www.sciencemotion.de/>

Technischer Teil, Kapitel 1d

2

Titel der Szene:

Interferenz

Videoclip oder Foto:

Kapitel 1d, Technischer Teil

Zeitintervall:

Autor:

Stefan Heusler, Annette Lorke

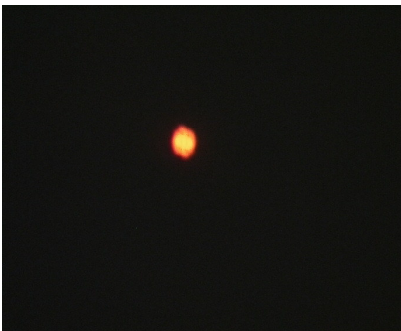
Editor:

Stefan Heusler

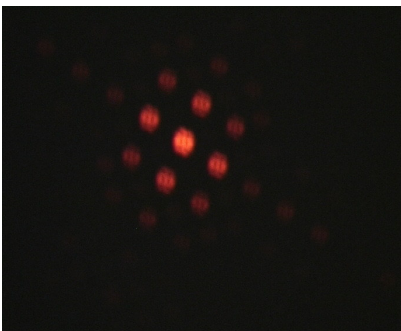
Wissenschaftliche Schlagwörter:

Interferenz, Superposition, Fermat'sches Prinzip, Doppelspaltexperiment

Beschreibung der Szene:



Wenn man normalerweise einen roten Laserstrahl auf eine dunkle Wand gerichtet wird, erscheint dort ein roter Lichtpunkt. In unserem kleinen Experiment wird der Laserstrahl durch einen Seidenstrumpf hindurch auf die Wand gerichtet. Anstelle eines einzelnen Punktes entsteht auf der Wand ein reguläres Gitter von Punkten. Um diese Beobachtung zu erklären, benutzen wir ein einfaches Wellenmodell und berechnen den Zusammenhang zwischen dem Abstand der Lichtpunkte auf der Wand und dem Abstand der einzelnen Poren im Gewebe des Seidenstrumpfs.



Wir nehmen der Einfachheit halber an, dass aus jeder Pore des Seidenstrumpfes eine Lichtwelle emittiert wird. Die Lichtwellen aus den einzelnen Poren interferieren miteinander. Wenn der Phasenunterschied zwischen den Lichtwellen gleich einem Vielfachen der Wellenlänge ist, verstärken sich die einzelnen Wellen in konstruktiver Interferenz. Wenn der Phasenunterschied zwischen den Lichtwellen gleich der halben Wellenlänge ist, löschen sie

sich in destruktiver Interferenz gegenseitig aus.

Autor: Stefan Heusler, Annette Lorke
E-Mail: sciencemotion@web.de

3

Film: QED – Materie, Licht und das Nichts
Filmszene: Kapitel 1d, Technischer Teil
Regisseur: Stefan Heusler
Film Studio: Sciencemotion, www.sciencemotion.de

Einfaches Niveau

Wenn Du einen Stein ins Wasser wirfst, kannst Du eine ringförmige Welle auf der Wasseroberfläche beobachten. Was passiert, wenn Du zwei Steine an zwei verschiedenen Stellen ins Wasser wirfst? Es entstehen zwei ringförmige Wellen, die miteinander *interferieren*, wenn sie sich treffen. Das heißt, dass man die Wellen miteinander addieren muss. Wenn man die Höhe der Wasseroberfläche als „Nulllinie“ bezeichnet, dann ist befindet sich die erste ringförmige Welle manchmal über und manchmal unter dieser Nulllinie. Dasselbe trifft auf die zweite ringförmige Welle zu.

Wir betrachten jetzt einen festen Punkt auf der Wasseroberfläche. Wenn an diesem Punkt zu einem bestimmten Zeitpunkt sich beide Wellen über der Nulllinie befinden, addieren sie sich zu einer Welle, deren Höhe noch stärker über Null ist. Das ist die so genannte „konstruktive Interferenz“. Wenn beide Wellen sich unter der Nulllinie befinden, addieren sie sich zu einer Welle, deren Höhe noch stärker unter Null liegt. Das ist ebenfalls konstruktive Interferenz, da sich der Effekt der beiden Wellen gegenseitig verstärkt. Nur wenn eine der Wellen über und die andere unter der Null liegt, addieren sich beide Welle zu einer Welle, die sich fast auf der Nulllinie befindet. Das ist die so genannte „destruktive Interferenz“, da beide Wellen sich gegenseitig auslöschen.

Interferenz ist die wichtigste Eigenschaft von allen Wellen, z.B. Schallewellen, Wasserwellen, Lichtwellen... Finde weitere Beispiele!

Wenn Du das nächste Mal an einem See vorbeikommst, werfe zwei Steine hinein und beobachte die Interferenz der beiden ringförmigen Wellen. Wenn Du willst, kannst Du das Resultat mit den folgenden Computeranimationen vergleichen:

<http://www.schulphysik.de/java/physlet/applets/optik2.html?Intensity=on&wavelength=3>
<http://www.schulphysik.de/ntnujava/doubleSlit/doubleSlit.html>

Autor: Stefan Heusler, Annette Lorke
E-Mail: sciencemotion@web.de

4

Film: QED – Materie, Licht und das Nichts
Filmszene: Kapitel 1d, Technischer Teil
Regisseur: Stefan Heusler
Film Studio: Sciencemotion, www.sciencemotion.de

Fortgeschrittenes Niveau

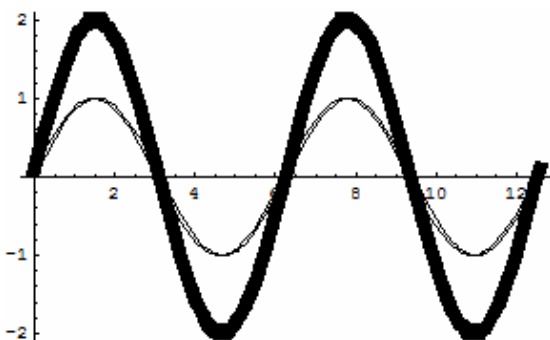
Das Superpositionsprinzip von Wellen besagt, dass zwei Wellen, die sich an einem Punkt treffen, zu addieren sind. Die resultierende Welle hängt von dem Phasenunterschied φ zwischen beiden Wellen ab.

Wir betrachten ein einfaches mathematisches Modell für Interferenz. Wir addieren zwei Sinus-Wellen mit dem Phasenunterschied φ :

$$F[x, \varphi] = \sin[x] + \sin[x + \varphi]$$

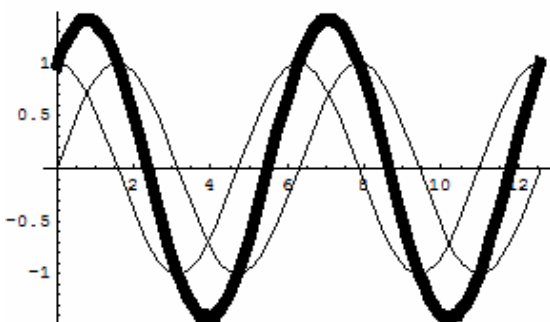
In diesem Modell interferieren zwei Wellen der Wellenlänge 2π mit dem Phasenunterschied φ . Wir

interessieren uns für die resultierende Welle in Abhängigkeit des Phasenunterschieds. Wenn φ klein im Vergleich zur Wellenlänge ist, verstärken sich die beiden Wellen gegenseitig. Das Resultat ist eine größere Welle mit fast verdoppelter Amplitude. Dies ist die konstruktive Interferenz.



Die dicke Linie ist die resultierende Interferenzwelle $F[x, \varphi]$ aus den beiden Sinus-Wellen mit der Amplitude 1 und für den Phasenunterschied $\varphi=0,01$.

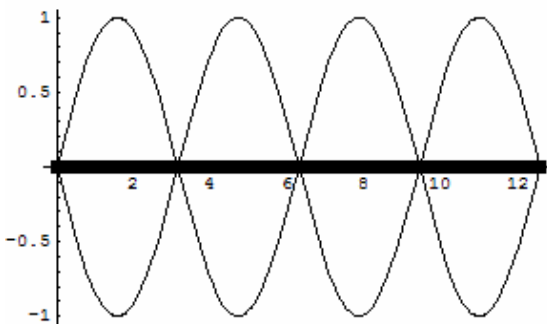
Wenn der Phasenunterschied etwa einem Viertel der Wellenlänge entspricht (in unserem Modell ist die Wellenlänge $\lambda = 2\pi$, also $\varphi = \lambda/4 = \pi/2$), sieht die Interferenzwelle so aus:



Die Amplitude von $F[x, \varphi=\pi/2]$ ist:

$$2 \sin[\pi / 4] = \sqrt{2}$$

Destruktive Interferenz tritt auf, wenn der Phasenunterschied die halbe Wellenlänge ist (in unserem Modell $\varphi = 2\pi/2 = \pi$):



Die Amplitude von $F[x, \varphi = \pi]$ ist gleich Null. Des Weiteren ist die Funktion gleich Null an jedem Punkt x .

$$F[x, \varphi = \pi] = 0$$

Die zwei Wellen löschen sich also gegenseitig aus.

Für jede Art von Wellen und jede Form von Superposition ist obiges Modell im Prinzip die ausreichende Beschreibung. Wir müssen nur die folgenden Verallgemeinerungen beachten:

- 1) Anstelle der Wellenlänge 2π ist jede beliebige Wellenlänge λ möglich.
- 2) Anstelle der Amplitude 1 ist jede andere Amplitude möglich.
- 3) Anstelle von nur zwei Wellen ist jede beliebige Anzahl von Wellen möglich.
- 4) In jeder Welle können Phasenunterschied und Wellenlänge verschieden sein.

Die allgemeine Prinzip - das so genannte Superpositionsprinzip – ist die Summation über all diese Wellen mit Phasenunterschied φ . Hinter dem Superpositionsprinzip steckt eine grundlegende Annahme: Wellen interagieren nicht miteinander. Die einzelne Welle verändert ihre Form nicht, auch wenn sie von anderen Wellen überlagert wird. Die Wellen werden einfach nur addiert. Die Gültigkeit dieser Annahme könnte man mit folgendem Experiment testen: Wenn man mit dem CD-Player ein Musikstück spielt und die Melodie selbst dazu mitsingt, ändert das nicht die Schallwellen, die aus den Lautsprechern kommen. Die eigene Stimme und die CD-Musik addieren sich einfach nur.

Allerdings ist das Superpositionsprinzip nur eine gute Näherung für die Beschreibung von Wellen. In den allermeisten Fällen ist die Näherung gerechtfertigt, und Wechselwirkungseffekte zwischen den Wellen können vernachlässigt werden.

Für Lichtwellen diskutieren wir Abweichungen vom Superpositionsprinzip in Kapitel 5a der DVD. Diese winzigen Abweichungen waren zu Maxwells Zeiten unbekannt und wurden erst im 20. Jahrhundert entdeckt.

Abschließend noch zwei Internetbeispiele zu Computersimulationen über das Superpositionsprinzip:

<http://www.schulphysik.de/java/physlet/applets/optik2.html?Intensity=on&wavelength=3>
<http://www.schulphysik.de/ntnujava/doubleSlit/doubleSlit.html>)

Autor: Stefan Heusler, Annette Lorke
E-Mail: sciencemotion@web.de

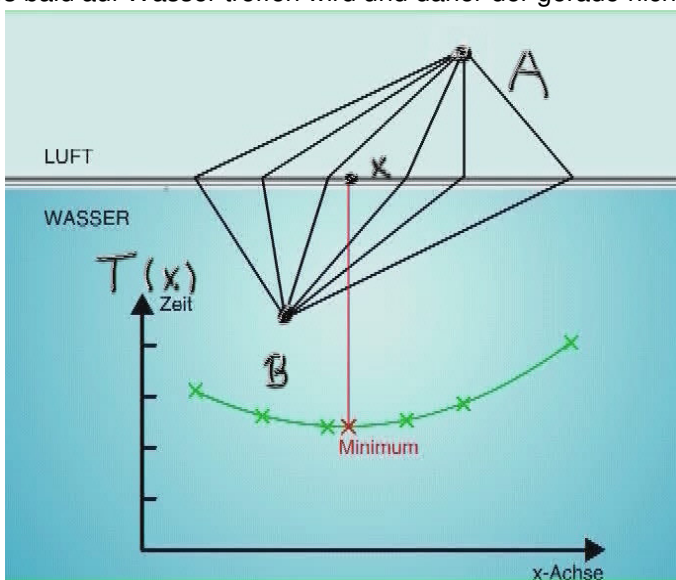
6

Film: QED – Materie, Licht und das Nichts
Filmszene: Kapitel 1d, Technischer Teil
Regisseur: Stefan Heusler
Film Studio: Sciencemotion, www.sciencemotion.de

Weiterführende Informationen

Interferenz ist die wichtigste und faszinierendste Eigenschaft von Strahlung und Materie. Erinnern wir uns an das Fermat'sche Prinzip: *Licht sucht sich immer den schnellstmöglichen Weg*. Dieses Prinzip beruht auf dem Teilchenbild von Licht, was die Annahme ermöglicht, dass Photonen *einen bestimmten Weg* wählen (siehe auch Kapitel 1b). Das Fermat'sche Prinzip provoziert eine offensichtliche Frage:

Nehmen wir an, dass ein Lichtstrahl vom Punkt A aus startet. Woher kann der Lichtstrahl wissen, welches der schnellstmögliche Weg ist, um zu Punkt B zu gelangen? Am Punkt A befindet sich das Licht in der Luft. Wer sagt dem Licht, dass es bald auf Wasser treffen wird und daher der gerade nicht der schnellste Weg ist?



Manchmal fragen

Manchmal stellen Schüler diese Frage, wenn das Fermat'sche Prinzip mit der Analogie des Mannes, der so schnell wie möglich zu seinem Boot im Wasser gelangen möchte, erklärt wird. Im Gegensatz zu dem Mann, der schon im Voraus weiß, dass sich sein Boot im Wasser befindet, weiß der Lichtstrahl bei Punkt A nichts über seinen weiteren Weg.

In der Tat erklärt das Fermat'sche Prinzip nicht, wie es das Licht schafft, den schnellsten Weg zu finden. Das Fermat'sche Prinzip ist als Beschreibung aus Sicht der klassischen Physik entwickelt worden. Die quantenmechanische Beschreibung des Fermat'schen Prinzips gelang Richard Feynman.

Die Lichtwelle an Punkt A geht nicht nur einen Weg, sondern alle möglichen Wege von A nach B. Auf jedem dieser unendlich vielen Wege verläuft eine Welle mit einer Phase, die von der Länge des Weges abhängt. An (jedem beliebigen) Punkt B interferieren all diese unendlich vielen Wellen miteinander.

Schon vor Feynman war ein ähnliches Wellenbild des Lichtes bekannt. Neu ist bei Feynmans Ansatz, dass ein *einzelnes Photon* mit sich *selbst interferiert*. Weiterhin wird die resultierende Welle an Punkt B von Feynman als quantenmechanische Wellenfunktion interpretiert. Der Absolutbetrag dieser Wellenfunktion ist die Wahrscheinlichkeit, das Photon bei B zu finden.

Wir bezeichnen mit $T_{A \rightarrow B}(x)$ die Zeit, die ein einzelnes Photon mit Winkelgeschwindigkeit ω benötigt, um, wie im Bild gezeigt, den Weg von A nach B über den Punkt x an der Grenzschicht zwischen Wasser und Luft zurückzulegen. Die Superposition aller Wege, die die Grenzschicht an beliebigem x treffen, ist gegeben durch:

$$P_{A \rightarrow B}[\omega] = \int_{-\infty}^{+\infty} \sin[\omega T_{A \rightarrow B}[x]] dx$$

Wenn alle Weglängen im Vergleich zur Wellenlänge groß sind, also $T[x]$ sehr viel größer als $1/\omega$ für alle x ist, kann das Integral in einer Sattelpunktnäherung berechnet werden. In diesem Fall wird das Integral von solchen Wegen dominiert, die dem klassischen Weg nahe sind, der definiert ist durch die Lösung der Gleichung:

$$\frac{d T_{A \rightarrow B}[x]}{d x} = 0$$

Diese stationäre Lösung ist nichts anderes als das klassische Snellius'sche Brechungsgesetz.

Für ein einzelnes Photon ist es alles andere als selbstverständlich, dass es dem klassischen Weg folgt. Quantenmechanisch kann nur die Wahrscheinlichkeit $|P_{A \rightarrow B}[\omega]|^2$ angegeben werden, das Photon an Punkt B anzutreffen. In einem Lichtstrahl von Abermillionen Photonen werden so gut wie alle dem klassischen Weg folgen, da der Beitrag aller anderen Wege sich durch die Überlagerung sehr stark oszillierender Phasenunterschiede auslöscht. Allerdings könnte ein Detektor, der weit entfernt von einem klassischen Weg positioniert ist im Prinzip Photonen beobachten, die von dem klassischen Weg abweichen. Auch man sehr lange auf solch ein Ereignis warten muss, ist die Wahrscheinlichkeit nicht null. Solche Ereignisse kommen öfter vor, wenn die Wellenlänge von der Größenordnung des Abstands von A nach B ist, wenn also $T[x]$ in etwa $1/\omega$ entspricht.

Für weiterführende Informationen und den Zusammenhang zum Doppelspaltexperiment empfehlen wir das sehr lesenswerte Buch von Richard Feynman: „QED. Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie“. Feynman visualisiert dort die Auslöschung der Superposition nicht-stationärer Wege mit Vektordiagrammen.

Webseite über Interferenz:

<http://de.wikipedia.org/wiki/Superpositionsprinzip>