

Lichtbrechung

1

Wissenschaftliches Gebiet:

Physikalische Eigenschaften von Licht

Film/Jahr:

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

Filmproduzent:

Hans-Bernd Dreis, Stefan Heusler

Regisseur:

Stefan Heusler

Besetzung:

Prof. Schwerelos und sein Assistent Nick

Webseite des Films:

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

Beschreibung des Films:

Die DVD hat zwei Teile. Im künstlerischen Teil (30 Min.) besucht das Puppenspielerpaar Nick & Prof. Schwerelos auf ebenso charmante wie eigenwillige Weise das Gedankengebäude, das Einstein & Co. uns hinterlassen haben. Die beiden etwas verschrobenen 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 Seite

http://www.sciencemotion.de/files/qed_trailer.mpg

DVD:

Die DVD kann für EUR 20,00 zzgl. Versandkosten per E-Mail bestellt werden über

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

Technischer Teil, Kapitel 1b

2

Titel der Szene:

Lichtbrechung

Videoclip oder Foto:

Kapitel 1b, Technischer Teil

Zeitintervall:

Autor:

Stefan Heusler, Annette Lorke

Editor:

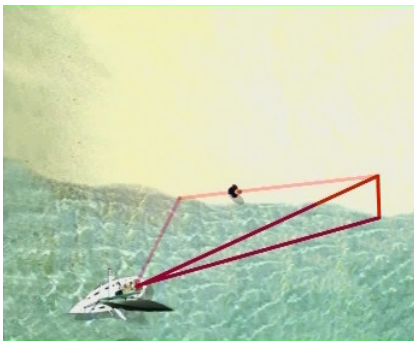
Stefan Heusler

Wissenschaftliche Schlagwörter:

Brechungsgesetz, Fermat'sches Prinzip, Totalreflexion

Beschreibung der Szene:

Rotes Laserlicht tritt aus der Luft ins Wasser ein. An der Grenze zwischen Luft und Wasser wird das Licht gebrochen. Wir erklären das Brechungsgesetz und das Fermat'sche Prinzip mit einer einfachen Metapher:



Ein Mann befindet sich auf einem Strand. Er möchte auf dem schnellstmöglichen sein Boot erreichen, das im seichten Wasser vor Anker liegt. Da sich der Mann auf dem Strand schneller als im Wasser fortbewegen kann, ist es für ihn schneller, einen Weg zum Boot zu wählen, der länger am Strand verläuft. Der kürzeste Weg (die gerade Linie) ist also nicht der schnellste Weg.

Das Fermat'sche Prinzip besagt, dass Licht den schnellstmöglichen Weg geht. Weil die Lichtgeschwindigkeit in der Luft größer als im

Wasser ist, wird der Lichtstrahl an der Grenze gebrochen.

Abschließend wird die für technische Anwendungen wichtige Totalreflexion erklärt.

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

3

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

Einführende Beschreibung

Wenn Du ein kleines Experiment machen möchtest, geh in die Küche und fülle ein Glas mit Wasser. Schau durch das Glas Wasser hindurch und beobachte, wie zum Beispiel einer Eurer Stühle durch das Wasser verzerrt wird. Kannst Du Dir vorstellen, woran das liegen könnte?

Jeder Gegenstand, den Du siehst, reflektiert Licht und strahlt es in Dein Auge. Wenn Du den Stuhl durch das Glas Wasser ansiehst, dann geht der Lichtstrahl, der vom Stuhl ausgeht, erst durch das Wasser, bevor er in Dein Auge fällt. An der Grenze zwischen der Luft und dem Wasser wird der Lichtstrahl gebrochen. Das bedeutet, dass er nicht mehr entlang einer geraden Linie verläuft. Ein sehr einfaches und wichtiges Prinzip beschreibt dieses Verhalten von Licht: *Licht sucht sich nicht den kürzesten Weg, sondern den schnellsten Weg*. Beachte den Unterschied zwischen Es ist die Geschwindigkeit des Lichtes, die den Weg bestimmt. Wenn die Lichtgeschwindigkeit in zwei verschiedenen Substanzen (hier: Luft und Wasser) nicht gleich groß ist, gibt es einen Unterschied zwischen dem *kürzesten* und dem *schnellsten* Weg. Das Licht ist in der Luft schneller als im Wasser. Darum wird der Lichtstrahl gebrochen, wenn er aus der Luft ins Wasser eintritt.

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

4

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

Weiterführende Beschreibung

Die Lichtgeschwindigkeit ist im Wasser kleiner als in der Luft. Diese experimentelle Beobachtung führt zum Phänomen der *Lichtbrechung*. Ein einfaches Prinzip erklärt alle Arten von Lichtbrechung, durch Wasser, Prismen, Linsen... Es ist das so genannte Fermat'sche Prinzip: „Licht sucht sich immer den schnellstmöglichen Weg“.

Das Fermat'sche Prinzip erklärt, warum das Licht nicht eine gerade Linie wählt, die kürzeste Strecke zwischen Luft und Wasser wäre. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in Luft und im Wasser verschieden ist, ist der gerade Weg nicht der schnellste. Das demonstriert der Mann, der die längere Strecke am Strand entlang läuft und die kürzere durchs Wasser schwimmt, um sein Boot schnellstmöglich zu erreichen.

Schauen wir uns nun das Laserstrahl-Experiment aus dem Videoclip genauer an, um zu verstehen, wie Totalreflexion entsteht. Der Winkel α sei der Einfallswinkel in der Luft, β der Brechungswinkel im Wasser, v_{Luft} die Lichtgeschwindigkeit in der Luft und v_{Wasser} die Lichtgeschwindigkeit im Wasser. Die Beziehung zwischen dem Verhältnis $v_{\text{Luft}}/v_{\text{Wasser}}$ der Geschwindigkeiten und dem Verhältnis der Winkel α , β kann aus dem Fermat'schen Prinzip hergeleitet werden und wird beschrieben durch das Snellius'sche Brechungsgesetz:

$$\frac{\sin[\alpha]}{\sin[\beta]} = \frac{v_{\text{Luft}}}{v_{\text{Wasser}}}$$

Der Winkel ist in demjenigen Medium größer, in dem auch die Geschwindigkeit größer ist.

Im Falle unseres Laserstrahl-Experiments bedeutet das:

$$v_{\text{Luft}} > v_{\text{Wasser}} \rightarrow \alpha > \beta$$

Der Lichtweg ist umkehrbar. Wenn die Zeit, um von A nach B zu gelangen, minimal ist, dann trifft dasselbe auch für den umgekehrten Weg von B nach A zu. Betrachten wir nun einen Laserstrahl, der vom Wasser in die Luft tritt. Um Totalreflexion zu verstehen, nutzen wir die Tatsache, dass der Winkel β kleiner als α ist. Wenn wir β vergrößern, vergrößert sich aufgrund des Snellius'schen Brechungsgesetzes auch α . Das Brechungsgesetz ist aber nur gültig, solange der Lichtstrahl von einem Medium in ein anderes gelangt. Das Brechungsgesetz kann also nur verwendet werden, solange α kleiner als 90° ist. Für $\alpha = 90^\circ$ ist der Winkel β kleiner als 90° . Dieser Winkel heißt „kritischer Winkel“.

In unserem Experiment lassen wir den Winkel β größer als den kritischen Winkel werden. In diesem Fall kann das Snellius'sche Brechungsgesetz nicht mehr zur Beschreibung des Lichtweges angewendet werden, da der Lichtweg dann nur noch innerhalb eines Mediums verläuft. Welchen Weg wählt das Licht jetzt? Innerhalb des Wassers ist der Lichtweg eine Gerade. An der Grenzschicht wird das Licht gemäß des Reflektionsgesetzes „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“ *reflektiert*. Das ist die so genannte *Totalreflexion* von Licht.

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

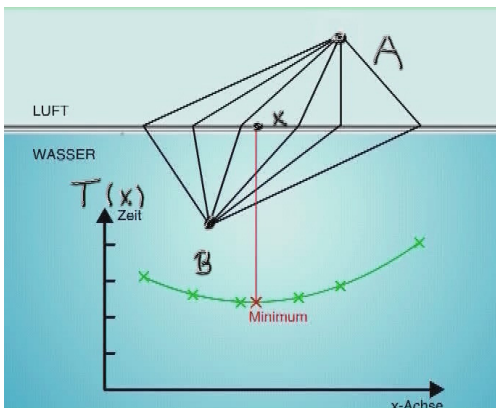
5

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

Wissenschaftliche Beschreibung

Wenn Licht auf eine Grenzschicht von zwei Medien mit den Brechungsindizes n_1 und n_2 trifft, wird ein Teil reflektiert und der Rest gebrochen. Das Reflexionsgesetz lautet „Einfallswinkel = Ausfallswinkel“, da der Lichtweg umkehrbar sein muss.

Die Lichtgeschwindigkeit im Medium ist $v = c/n$, wobei c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist ($c \approx 299.792 \text{ km/s}$). Das Snellius'sche Brechungsgesetz kann einfach aus dem Fermat'schen Prinzip hergeleitet werden, indem die Funktion $T[x]$ minimiert wird. Im Film wird $T[x]$ als Zeitfunktion definiert, die angibt, wie lange ein Lichtstrahl von A nach B unterwegs ist, wenn er die Grenzschicht am Punkt x durchquert.



Das Minimum $dT[x]/dx = 0$ entspricht dem Snellius'schen Brechungsgesetz

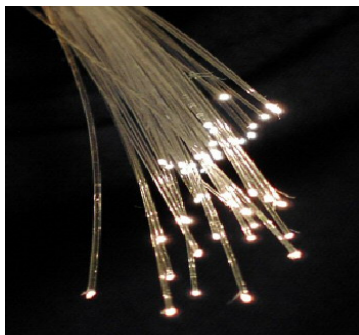
$$\frac{\sin[\alpha]}{\sin[\beta]} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Das Fermat'sche Prinzip kann nicht nur für die Lichtbrechung in Wasser angewendet werden, sondern für alle Arten von Medien, z.B. optische Linsen. Der Brechungsindex n hängt allerdings stark von der Wellenlänge λ des Lichtes ab. In flüssigem Wasser und in Glas ist

der Brechungsindex von blauem Licht größer als der Brechungsindex von rotem Licht, $n(\lambda_{\text{blau}}) > n(\lambda_{\text{rot}})$. Blaues Licht ist im Glas also langsamer als rotes Licht. Aus diesem Grund zerlegt ein Prisma das Licht in die Regenbogenfarben.

Auch der Lichtweg von gebrochenem Licht muss umkehrbar sein. Im Gegensatz zum Reflexionsgesetz ist die Symmetrie zwischen dem einfallenden und austretenden Lichtstrahl gebrochen, da die Winkel β und α verschieden sind. Wenn das Licht aus dem optisch dichteren Medium kommt, wird es total reflektiert, wenn der Winkel β größer als der kritische Winkel ist:

$$\beta > \beta_{\text{cr.}} = \text{ArcSin} \left[\frac{n_1}{n_2} \right]$$



Bei technischen Anwendungen wird die Totalreflexion in Glasfaserkabeln bei der Datenübertragung verwendet. Aufgrund der Totalreflexion kann die amplituden- und frequenzmodulierte Trägerwelle verlustfrei über lange Strecken transportiert werden. Die Frequenz der Trägerwelle ist üblicherweise im Mikrowellenbereich (GHz). Noch mehr Daten pro Sekunde können bei noch höheren Frequenzen der Trägerwelle übertragen werden. Die Verallgemeinerung des Fermat'schen Prinzips in der Quantenmechanik wird in Kapitel 1d

(Interferenz) diskutiert.

6

Internetseiten über Lichtbrechung:

http://de.wikipedia.org/wiki/Brechung_%28Physik%29

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

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