

## “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 Puppens Duo 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/>

## Künstlerischer Teil, Kapitel 1

2

### Titel der Szene:

Das Licht

### Videoclip oder Foto:

Kapitel 1, Künstlerischer Teil

### Zeitintervall:

### Autor:

Stefan Heusler, Annette Lorke

### Editor:

Stefan Heusler

### Wissenschaftliche Schlagwörter:

Lichtgeschwindigkeit, Spektrum des sichtbaren Lichts, Naturkonstanten

### Beschreibung der Szene:

Nick stellt sich dem Publikum vor. Er ist Wissenschaftler und arbeitet für Prof. Schwerelos. Als bodenständig und pragmatisch denkender Mensch fällt es ihm nicht immer leicht, die allzu abstrakten und theoretischen Ausführungen von Prof. Schwerelos ohne Kritik hinzunehmen, da sie ihm oft fern jeglicher Realität erscheinen.

Prof. Schwerelos tritt ohne besondere Begrüßung auf und startet direkt damit, seine neueste Idee zu erklären: Eine Visualisierung von Elektronen, Positronen und dem *Nichts*. Obwohl das Nichts absolut leer ist, ist es nicht ohne innere Struktur. Gemäß seinem Modell ist das Nichts in zwei Teile eingeteilt: die normale "Welt" und die "Antiwelt". In der Welt können Teilchen wie das Elektron entstehen. In der Antiwelt Antiteilchen wie das Positron. An der Grenze zwischen diesen beiden Welten können Elektronen und Positronen aufeinander treffen und zerfallen dann in Licht (oder Photonen). Das Licht befindet sich weder in der normalen Welt noch in der Antiwelt, sondern auf der Grenze zwischen beiden Welten, da Licht keine Ruhemasse hat. Das Licht bewegt sich im Vakuum immer mit derselben Geschwindigkeit, unabhängig von der Bewegung des Beobachters, das heißt, die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist eine *Naturkonstante*.

Nach dieser Einleitung führen Prof. Schwerelos und sein Assistent Nick das erste Experiment durch: Weißes Licht wird durch ein Prisma in sein Farbspektrum zerlegt,



vom blauen bis zum roten Licht. Prof. Schwerelos erläutert, dass jeder Farbe eine Lichtwelle mit einer bestimmten Wellenlänge entspricht. Anschließend stellt Nick eine sehr fundamentale Frage: "Kann man Licht im Vakuum überholen?"

Prof. Schwerelos gibt zunächst zwei Beispiele für Wellen, die von ihrem Erzeuger überholt werden können: Ein Düsenjet kann seine eigenen Schallwellen überholen, eine Ente ihre eigenen Wasserwellen. Albert Einstein erkannte als erster, dass Lichtwellen

etwas ganz besonderes sind: Das Licht im Vakuum kann niemals überholt werden, die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit ist eine Naturkonstante. Dies hat Konsequenzen für den Zusammenhang zwischen Raum und Zeit, die Prof. Schwerelos allerdings nicht weiter erläutert (siehe hierzu Kapitel 1f, technischer Teil).

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

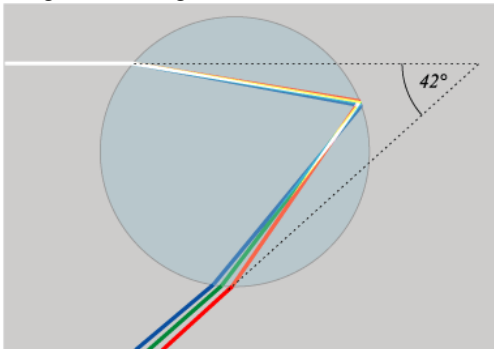
3

**Film:** QED – Materie, Licht und das Nichts  
**Filmszene:** Kapitel 1, Künstlerischer Teil  
**Regisseur:** Stefan Heusler  
**Film Studio:** Sciencemotion, [www.sciencemotion.de](http://www.sciencemotion.de)

### Einfaches Niveau

Warum kann man einen Regenbogen nur dann sehen, wenn es regnet und gleichzeitig die Sonne scheint? Das weiße Licht der Sonne besteht aus verschiedenen Farben, die jeweils auch bestimmten Energien entsprechen. In blauem Licht steckt mehr Energie als in rotem Licht. Jeder Regentropfen entspricht einem kleinen Prisma und spaltet wie ein Prisma das weiße Licht der Sonne in seine verschiedenen Farben auf. Für die Aufspaltung des Lichts gibt es eine sehr einfache Erklärung: Das Licht sucht sich immer den *schnellstmöglichen* Weg.

Wenn das Licht die Wasseroberfläche trifft, macht es einen Knick, weil die Lichtgeschwindigkeit im Wasser kleiner ist als in der Luft. Die Geschwindigkeit im



Wasser hängt auch von der Energie bzw. der Farbe des Lichtes ab. Der *schnellstmögliche* Weg ist somit für die verschiedenen Farben unterschiedlich. Genau wie in einem Prisma spaltet sich das weiße Licht in ein Farbspektrum, weil die Lichtstrahlen verschiedener Farben im Wasser unterschiedliche Wege gehen.

In diesem Bild zeigen wir einen Regentropfen und das weiße Licht, das an der Wasseroberfläche *gebrochen*

wird. Das bedeutet einfach, dass das Licht einen Knick macht. Nur wenn die Lichtgeschwindigkeit im Wasser gleich der in der Luft wäre, würde das Licht auf einer geraden Linie weiterlaufen. Aber die Lichtgeschwindigkeit im Wasser ist kleiner als in der Luft und hängt auch von der Farbe des Lichtes ab. Blaues Licht ist schneller als rotes Licht. Weil die Geschwindigkeit des blauen Lichtes näher an der Lichtgeschwindigkeit in der Luft ist, weicht der Weg des blauen Lichtes von der geraden Linie wenig ab. Bei rotem Licht ist die Abweichung größer. Dadurch trennen sich die Wege der verschiedenen Farben durch das Wasser. Dasselbe passiert auch in dem Experiment, das Prof. Schwerelos und Nick mit dem Prisma vorführen.

Anschließend erklärt Prof. Schwerelos, dass die Lichtgeschwindigkeit eine Naturkonstante ist. Was ist eine Naturkonstante? Bewegt sich Licht durch die Luft heißt das, dass sich die Lichtgeschwindigkeit in der Luft nicht ändern kann – sie bleibt konstant. Die Lichtgeschwindigkeit kann sich nur ändern, wenn das Licht aus der Luft in ein anderes Medium, z.B. Wasser, eintritt. Betrachten wir ein einfaches Beispiel: Wenn wir einen Stein von einem hohen Turm hinabfallen lassen, wird er immer schneller, weil der Stein Energie durch die Erdanziehungskraft gewinnt und beschleunigt wird. Die Geschwindigkeit des Steins ist offenbar keine Naturkonstante. Wir können auch Licht von dem Turm hinunterfallen lassen, indem wir z.B. einen Laserstrahl nach unten richten. Das Licht gewinnt auch Energie durch die Erdanziehungskraft, aber es wird nicht schneller! Die Lichtgeschwindigkeit des Lasers bleibt exakt gleich groß, auch wenn sich seine Energie ändert. Das einzige, was sich durch die größere Energie verändert, ist die Farbe des Lasers, nicht die Geschwindigkeit.

Internetseite zum Regenbogen:  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Regenbogen>

**Autor:** Stefan Heusler, Annette Lorke  
**E-Mail:** [sciencemotion@web.de](mailto:sciencemotion@web.de)

4

**Film:** QED – Materie, Licht und das Nichts  
**Filmszene:** Kapitel 1, Künstlerischer Teil  
**Regisseur:** Stefan Heusler  
**Filmstudio:** Sciencemotion, [www.sciencemotion.de](http://www.sciencemotion.de)

### Fortgeschrittenes Niveau

Das Licht ist eine Welle, die im Vakuum nicht überholt werden kann. Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum bleibt immer gleich – sie ist eine Naturkonstante. Diese Aussagen reichen aus, um die spezielle Relativitätstheorie herzuleiten. Es dauerte recht lange, dieses einfache Prinzip zu formulieren, weil all die anderen Wellen, die man kannte, als Einstein die spezielle Relativitätstheorie entwickelte, überholt werden *können*. Der Grund, weshalb Lichtwellen so besonders sind, ist folgender: Im Gegensatz zu Wasserwellen oder Schallwellen kann das Licht sich durch das Vakuum fortbewegen.

Zwischen Naturkonstanten und Messungen besteht eine tiefe Verbindung. (siehe auch <http://www.ptb.de/en/wegweiser/einheiten/index.html>). Die Tatsache, dass die Lichtgeschwindigkeit durch eine derart krumme Zahl  $c=299.792.458$  Meter pro Sekunde beschrieben wird, ist eher ein historischer Unfall. Die Einheiten „Meter“ und „Sekunde“ waren bereits festgelegt, bevor man erkannte, dass die Lichtgeschwindigkeit eine Naturkonstante ist.

Heute definiert man den Abstand „Ein Meter“ als die Strecke, die das Licht im Vakuum im  $1/299.792.458$  Teil einer Sekunde zurücklegt. Diese Definition wirft eine offensichtliche Frage auf: Was ist eine Sekunde? Für die Definition der Sekunde benötigen wir einen Oszillator mit der Periode  $T$  (bzw. einer Frequenz  $\nu = 1/T$ ). Mit Hilfe des Oszillators können wir die Sekunde als eine feste Anzahl von Schwingungen definieren. Auf diesem Prinzip basieren alle mechanischen Uhren. Eine sehr viel höhere Präzision erreichen wir, wenn wir anstelle einer mechanischen Uhr eine Atomuhr benutzen. Die Präzision der Atomuhr beruht darauf, dass wir sowohl die Energie  $E = h \cdot \nu$  eines bestimmten Photons, das das Atom aussenden kann, als auch die Planck'sche Konstante sehr genau kennen. Eine Sekunde wird durch die Frequenz  $\nu = 9.192.631.770$  1/s eines Photons im Mikrowellenbereich definiert, das von einem Caesium-Atom ausgesendet wird. In einer Sekunde oszilliert dieses Photon genau 9.192.631.770 Mal.

### Internetseiten über das SI-Einheitensystem

[http://de.wikipedia.org/wiki/Internationales\\_Einheitensystem](http://de.wikipedia.org/wiki/Internationales_Einheitensystem)  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Sekunde>

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

5

**Film:** QED – Materie, Licht und das Nichts  
**Filmzene:** Kapitel 1, Künstlerischer Teil  
**Regisseur:** Stefan Heusler  
**Filmstudio:** Sciencemotion, [www.sciencemotion.de](http://www.sciencemotion.de)

### Weiterführende Informationen

Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist immer gleich. Aber die *Geschwindigkeit*, also das Verhältnis zwischen der Fortbewegung im Raum und in der Zeit, ist eine klassische Größe. Die spezielle Relativitätstheorie, wie sie von Einstein formuliert wurde, ist eine klassische Theorie. Wir bezeichnen eine Theorie als *klassisch*, wenn Ort und Impulsvariablen kommutieren (siehe Kapitel 4 für die Definition des Kommutators).

Die Quantentheorie des Lichtes ist komplizierter. Licht befindet sich in ständiger Wechselwirkung mit dem Quantenvakuum. Die Kopplung des Lichtes an Elektronen und Positronen wird durch eine sehr kleine dimensionslose Zahl beschrieben, die Feinstrukturkonstante  $\alpha = e^2 / (2 \epsilon_0 h c) \approx 1/137$ . Hierbei ist  $e$  die Ladung des Elektrons und  $\epsilon_0$  die Dielektrizitätskonstante. Im Vakuum hat das Photon eine bestimmte Wahrscheinlichkeit, in ein virtuelles Elektron/Positron Paar zu zerfallen. Diese Wahrscheinlichkeit hängt von der Energie des Photons ab. Streng genommen ist die Kopplung  $\alpha$  von der Energie abhängig. Nur für kleine Energien ist die Kopplung  $\alpha \approx 1/137$  gut beschrieben.

Die Ruhemasse des Photons ist exakt null und unabhängig von der Energie. Wenn das Photon eine Ruhemasse hätte, würde unsere Welt nicht mehr so sein, wie sie ist. Jedes Teilchen, das eine Ruhemasse hat, kann im Prinzip abgebremst werden. Die Lichtgeschwindigkeit wäre keine Naturkonstante mehr, und die spezielle Relativitätstheorie wäre falsch.

Es ist nicht selbstverständlich, dass die Ruhemasse eines Teilchens trotz Wechselwirkung mit dem Quantenvakuum unverändert bleibt. Zum Beispiel sind die  $W^{+/-}$  and  $Z^0$  Bosonen (die Träger der schwachen Wechselwirkung, die 1983 am CERN entdeckt wurden) aufgrund der Wechselwirkung mit dem Quantenvakuum massiv. Die elektroschwache Wechselwirkung wird durch eine Theorie beschrieben, die der QED sehr ähnlich ist. Gemäß dem Standardmodell der Elementarteilchenphysik koppelt das Photon nicht an das Higgs-Feld und bleibt daher auch im Quantenvakuum ohne Ruhemasse. Die  $W^{+/-}$  und das  $Z^0$  Boson koppeln an das Higgs-Feld und erhalten eine Ruhemasse durch die Vakuumenergie des Higgs-Feldes. Der direkte Nachweis des Higgs-Feldes ist das wichtigste Ziel der kommenden Generation von Teilchenbeschleunigern, wie für das LHC am CERN (<http://public.web.cern.ch/Public/Content/Chapters/AboutCERN/Achievements/Achievements-en.html>).