

## “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 verschrobeneren 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 2

2

### Titel der Szene:

Licht und Elektron

### Videoclip oder Foto:

Kapitel 2, Künstlerischer Teil

### Zeitintervall:

### Autor:

Stefan Heusler, Annette Lorke

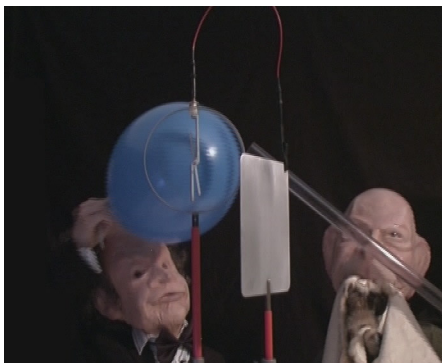
### Editor:

Stefan Heusler

### Wissenschaftliche Schlagwörter:

Photoelektrischer Effekt, Absorption und Emission von Photonen

### Beschreibung der Szene:



Prof. Schwerelos und sein Assistent Nick führen den photoelektrischen Effekt in einem Experiment vor: Eine zunächst neutrale Metallplatte wird mit zusätzlichen Elektronen negativ geladen. Die Elektronen können nur dann von der Metallplatte in die Luft entkommen, wenn sie Strahlung aus dem ultravioletten Spektralbereich absorbieren. Weder Licht aus dem roten noch aus dem blauen Spektralbereich kann die Elektronen aus dem Metall herauslösen, unabhängig von der Intensität des Lichtes. Einstein hat als erster dieses Experiment richtig interpretiert.

Jegliche Art von Strahlung (sichtbares Licht, ultraviolettes Licht, Infrarotstrahlung, etc) ist *quantisiert*, besteht also aus diskreten Energieportionen. Diese Energieportionen werden Photonen genannt. Ein einzelnes Photon trägt eine bestimmte Energieportion, die komplett von einem Elektron absorbiert werden kann. Nur wenn die Energie des einzelnen Photons groß genug ist, kann das Elektron von der Metallplatte entweichen.

Nach der experimentellen Demonstration stellt Prof. Schwerelos sein Modell vor, um das Resultat zu deuten. Elektronen in einer Metallplatte ähneln Fröschen in einem Gefängnishof. Sie können über die Mauer des Gefängnishofs nur dann springen, wenn ein *einzelner* Sprung hoch genug ist. Ist die Sprunghöhe nicht ausreichend, kommen sie nicht über die Mauer, egal wie oft sie springen.

Die entscheidende Idee, die Einstein entwickelt hat, ist die Quantisierung von Licht. In unserem Modell wird die Idee durch die Frösche umgesetzt, die nur einzelne Sprünge hintereinander machen können, also die Sprungenergie in einzelnen Portionen aufnehmen. Die Energieportionen, die zum Sprung anregen, entsprechen den Photonen. Die Sprunghöhe wiederum entspricht der Energie des absorbierten Photons.

Prof. Schwerelos und Nick demonstrieren abschließend auch das "umgekehrte" Experiment. Sie schauen sich dabei nicht die Absorption, sondern die Emission von Photonen an. Das passiert zum Beispiel im glühenden Metalldraht eines Toasters. Sowohl die Wärmestrahlung als auch das rote Licht bestehen aus einer sehr großen Anzahl von einzelnen Photonen.

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

3

**Film:** QED – Materie, Licht und das Nichts  
**Filmszene:** Kapitel 2, Künstlerischer Teil  
**Regisseur:** Stefan Heusler  
**Film Studio:** Sciencemotion, [www.sciencemotion.de](http://www.sciencemotion.de)

### Einfaches Niveau

Licht besteht aus sehr vielen kleinen Energieportionen, den so genannten Photonen. Photonen besitzen unterschiedlich hohe Energie. Zum Beispiel haben die Photonen in blauem Licht mehr Energie als in rotem Licht. Die Energieportionen werden von den Elektronen im Atom absorbiert oder emittiert. Wenn das Elektron ein Photon absorbiert, gewinnt es die Photonenergie. Wenn das Elektron ein Photon emittiert, verliert es Energie. Absorption und Emission sind ein fortwährender Prozess. Während Du diesen Text liest, absorbieren die Elektronen in den Atomen Deines Auges unzählige Photonen.

Wir zeigen in dem Film zwei Experimente, die die Absorption und Emission von Photonen behandeln: Im so genannten photoelektrischen Effekt wird Licht von Elektronen in einer Metallplatte absorbiert. Nur wenn die Energie eines *einzelnen* Photons groß genug ist, gewinnt das Elektron genügend Energie, um von der Metallplatte in die umgebende Luft zu entweichen. Wenn in einem Toaster der Metalldraht glüht, passiert der umgekehrte Prozess. Die erhitzten Elektronen geben Photonen ab und verlieren so Energie. Die meisten Photonen sind unsichtbar, weil unser Auge nur einen sehr kleinen Energiebereich der Photonen als sichtbares Licht wahrnehmen kann. Wenn die Energie zu hoch ist (z.B. bei ultravioletter Strahlung) oder zu niedrig (z.B. bei infraroter Strahlung), ist sie für das Auge unsichtbar. Du kannst die Infrarotstrahlung, die der Toaster emittiert, aber als Wärmestrahlung auf Deiner Haut fühlen. Die ultraviolette Strahlung ist für den photoelektrischen Effekt wichtig, weil sie die höchsten Sprünge der Elektronen verursacht, so dass die Elektronen aus dem Metall herausgelöst werden können. Ultraviolette Strahlung kann von uns weder gesehen noch gefühlt werden, aber ihre Wirkung ist sichtbar, da sie Sonnenbrand verursacht.

Du kennst sicherlich noch viele weitere Beispiele für Absorption und Emission von Photonen (eine Radioantenne, eine Glühbirne, etc). Es ist fast unmöglich, irgendeinen Ort ohne Absorption und Emission von Photonen auf dieser Welt zu finden.

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

4

**Film:** QED – Materie, Licht und das Nichts  
**Filmszene:** Kapitel 2, Künstlerischer Teil  
**Regisseur:** Stefan Heusler  
**Film Studio:** Sciencemotion, [www.sciencemotion.de](http://www.sciencemotion.de)

### Fortgeschrittenes Niveau

Wie viele Photonen werden von einer 100 Watt Glühbirne in einer Sekunde ausgestrahlt? Nehmen wir der Einfachheit halber an, dass nur rotes Licht ausgestrahlt wird. Bei einer echten Glühbirne ist die meiste Strahlung Infrarotstrahlung, also Wärmestrahlung. Wie viele Photonen strahlt die „rote“ Glühbirne pro Sekunde aus? Die Energie  $E = h \cdot \nu$  eines Photons von rotem Licht mit der Wellenlänge  $\lambda = 750 \text{ nm}$  und der Frequenz  $\nu = c / \lambda = (3 \cdot 10^8 \text{ m/s}) / (7,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}) = 4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$  ist  $E = h \cdot \nu = (6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Joule} \cdot \text{s}) \cdot (4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}) = 2,65 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$ . In einer Sekunde emittiert die Glühbirne mit 100 Watt Leistung die Energie 100 Joule. Das entspricht der gigantischen Zahl von  $2,65 \cdot 10^{21}$  Photonen der Wellenlänge  $\lambda = 750 \text{ nm}$ .

Bei dem photoelektrischen Effekt werden Photonen von Leitungselektronen in einer Metallplatte absorbiert. Im Metall lösen sich die Valenzelektronen komplett von ihren Atomrümpfen und können sich innerhalb des Metalls frei bewegen. Durch die Absorption von Photonen gewinnen die Elektronen sowohl potentielle als auch kinetische Energie. Wie in Kapitel 2a näher erläutert wird, hat Albert Einstein aus diesem einfachen Experiment eine erstaunliche Schlussfolgerung gezogen: Licht besteht aus einzelnen Energiequanten, den Photonen. Weil Licht quantisiert ist, sind Absorption und Emission von Licht abzählbare, elementare Prozesse. Absorbiert ein Elektron ein Photon, hängt das nur von der Energie dieses einzelnen Photons ab, nicht von den Eigenschaften der anderen Photonen.

In gewisser Weise ist das „Toaster-Experiment“ die Umkehrung des Photoeffekts. Statt Photonen zu absorbieren, emittieren die Elektronen Photonen und verlieren Energie. In den dünnen Drähten des Toasters fließt ein Strom, wenn eine äußere Spannung anliegt. Die Driftgeschwindigkeit der Elektronen ist langsam. Zum Beispiel ist die Driftgeschwindigkeit der Elektronen in einem Kupferdraht mit einem Querschnitt von  $0,5 \text{ mm}^2$  ca.  $1 \text{ mm}$  pro Sekunde bei einem Strom von 5 Ampere und Raumtemperatur. Für den Menschen sind übrigens schon Stromstärken von etwa  $50 \text{ mA} = 0,05 \text{ A}$  tödlich! Die Leitungselektronen im Draht stoßen ständig mit den Atomrümpfen zusammen und emittieren Photonen, die sozusagen die „Bremsspur“ der Elektronen auf ihrem kollisionsreichen Weg durch den Draht sind.

#### Internetseiten über Metallelektronen und elektrischen Strom:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Free-Electron\\_Model\\_of\\_Metals](http://en.wikipedia.org/wiki/Free-Electron_Model_of_Metals)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_current](http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_current)

#### Internetseiten über den Photoeffekt und die Glühbirne:

[http://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric\\_effect](http://en.wikipedia.org/wiki/Photoelectric_effect)

[http://en.wikipedia.org/wiki/Light\\_bulb](http://en.wikipedia.org/wiki/Light_bulb)

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

5

**Film:** QED – Materie, Licht und das Nichts  
**Filmszene:** Kapitel 2, Künstlerischer Teil  
**Regisseur:** Stefan Heusler  
**Film Studio:** Sciencemotion, [www.sciencemotion.de](http://www.sciencemotion.de)

### Weiterführende Informationen

Photonen koppeln an alle elektrisch geladenen Teilchen. Die wichtigsten sind Elektronen und Protonen.

Im Gegensatz zu Elektronen sind Protonen keine Elementarteilchen. Protonen bestehen aus einer komplizierten Mischung aus Quarks und Gluonen. In erster Näherung besteht das Proton aus drei Quarks („Valenzquarks“): Zwei up quarks (elektrische Ladung  $+2/3$ ) und ein down quark (elektrische Ladung  $-1/3$ ). Die Gesamtladung des Protons ist die Summe der Ladungen der drei Quarks,  $4/3 - 1/3 = 1$ . Neutronen bestehen aus einem up quark und zwei down quarks. Das Neutron ist elektrisch neutral,  $2/3 - 2/3 = 0$ . Photonen koppeln daher nicht an Neutronen.

Protonen können ebenso wie Elektronen Photonen absorbieren und emittieren. Ein Beispiel aus der Kernphysik ist die Röntgenstrahlung, die angeregte Atomkerne aussendet. Die Energie der Photonen von solchen Kernspektren ist um ein Vielfaches höher als die Energie der von den Elektronen im Atom ausgehenden Strahlung.

Extrem hohe Photonenergien werden bei so genannten „Gammablitz“ (gamma ray bursts) frei, die Teil der kosmischen Strahlung sind. Solche Strahlung wird bei Sternexplosionen (supernovae) freigesetzt, z.B. bei dem berühmten Krebsnebel. Im Zentrum unserer Galaxis befindet sich vermutlich ein schwarzes Loch. In der Nähe dieses schwarzen Loches entstehen ebenfalls viele Gammablitz. Auf der Erde können Gammablitz indirekt als so genanntes Tscherenkow Licht beobachtet werden.

### Die höchsten bisher beobachteten Energien von Photonen: Gamma Ray bursts

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

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