

“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:

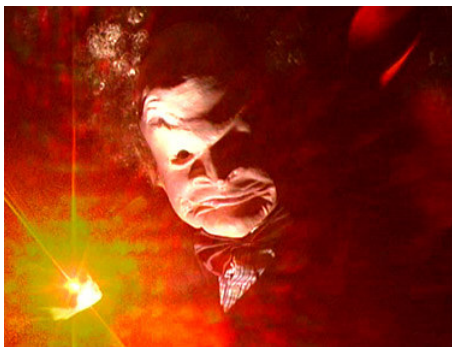
Stefan Heusler

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 3

2

Titel der Szene:

Elektromagnetische Felder

Videoclip oder Foto:

Kapitel 3, Künstlerischer Teil

Zeitintervall:

ab 4:20 bis zum Ende der Szene

Autor:

Stefan Heusler, Annette Lorke

Editor:

Stefan Heusler

Wissenschaftliche Schlagwörter:

Elektrisches Feld, Magnetisches Feld, Lorentz-Kraft, Coulomb-Kraft, spezielle Relativitätstheorie

Beschreibung der Szene:

Prof. Schwerelos und Nick demonstrieren ein Gasentladungsexperiment. Eine Metallspitze befindet sich in einem Gas, zum Beispiel in normaler Luft. Wenn eine Spannung angelegt wird, entsteht ein elektrisches Feld, das an der Metallspitze am größten ist. Die Ladungen in den Luftmolekülen werden von der Coulomb-Kraft angezogen, die durch das elektrische Feld im Raum entsteht. Einige Luftmoleküle brechen auseinander und führen zu einer Gasentladung durch einen kurzen elektrischen Strom, den wir als Blitz wahrnehmen. Die stark geladene Metallspitze entlädt sich dadurch und neutralisiert sich durch die umgebende Luft. Ein Blitzableiter funktioniert nach demselben Prinzip (allerdings in umgekehrter Richtung, hier ist zunächst die Metallspitze ungeladen und die Wolke stark geladen).

Als nächstes verwendet Nick Eisenspäne, um ein Magnetfeld zu visualisieren. Die magnetischen Feldlinien haben kein Anfang und kein Ende, sondern verlaufen immer im Kreis.



Nach der experimentellen Einführung von elektrischen und magnetischen Feldern präsentiert Prof. Schwerelos sein Modell für Felder: Eine Berglandschaft. Am Berg zieht eine Kraft einen Schneeball nach unten. Die Richtung, in die der Schneeball rollt, definiert die Richtung des Gradientenfeldes. Das (statische) elektrische Feld ist ein Gradientenfeld, das von der Bergspitze ins Tal zeigt. Im Gegensatz zum Gradientenfeld windet sich das Wirbelfeld entlang der Höhenlinien um den Berg. Magnetische Felder sind

Wirbelfelder. Magnetfelder entstehen nur, wenn Ladungen sich *bewegen*.

Prof. Schwerelos und Nick stellen abschließend die Lorentzkraft vor. Ein Strom fließt durch eine Leiterschaukel, die sich in einem statischen magnetischen Feld befindet. Nur bewegte Ladungen (= ein elektrischer Strom) spüren eine Kraft im Magnetfeld. Hierbei kommt Nick auf eine grandiose Idee: Bewegung ist relativ. Ein bewegtes

EXPLANATION

Basic

Advanced

Scientific

Movie

Movie Clip

Director

Film Studio

Elektron wird zu einem statischen Elektron, wenn man mit ihm mitfliegt. Dieses Gedankenexperiment führt zu der Schlussfolgerung, dass (statische) elektrische und magnetische Felder zwei Seiten derselben Medaille sind, da das eine Feld in das andere durch einen Wechsel des Standpunktes transformiert wird. Die Theorie über elektrische und magnetische Felder wurde im 19. Jahrhundert von Maxwell vereinheitlicht und heißt Elektromagnetismus.

3



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

4

Film: QED – Materie, Licht und das Nichts
Filmszene: Kapitel 3, Künstlerischer Teil
Regisseur: Stefan Heusler
Film Studio: Sciencemotion, www.sciencemotion.de

Einfaches Niveau

Stell Dir vor, dass Du auf der Autobahn in einem Auto fährst. Während das Auto fährt, kannst Du Dir die anderen Autos auf der Autobahn anschauen. Vor Dir fährt gerade ein rotes Auto. Drei verschiedene Dinge können jetzt passieren:

- 1) Dein Auto kommt immer näher an das rote Auto heran. Dann ist Dein Auto schneller als das rote Auto.
- 2) Das rote Auto entfernt sich von Deinem Auto. Dann ist das rote Auto schneller als Dein Auto.
- 3) Der Abstand zwischen Deinem Auto und dem roten Auto ändert sich nicht. Das bedeutet, dass beide Autos genau dieselbe Geschwindigkeit haben. Daher ist von Deinem Standpunkt aus gemessen die Geschwindigkeit des roten Autos gleich null.

Ein Polizist, der am Straßenrand steht, würde mit Dir einig sein, dass beide Autos dieselbe Geschwindigkeit haben. Allerdings im Vergleich zum dritten Beispiel ist die Geschwindigkeit des roten Autos von seinem Standpunkt aus gesehen nicht null, sondern z.B. 100 Kilometer pro Stunde. Bewegung ist also relativ. Sie hängt vom Standpunkt des Beobachters ab.

Im Film zeigen wir dieses Phänomen, indem viele Raketen mit derselben Geschwindigkeit in dieselbe Richtung fliegen. Aus der Sicht einer dieser Raketen ist die Geschwindigkeit der anderen Raketen gleich *null*. Für einen außen stehenden Beobachter bewegen sich alle Raketen mit derselben Geschwindigkeit.

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

5

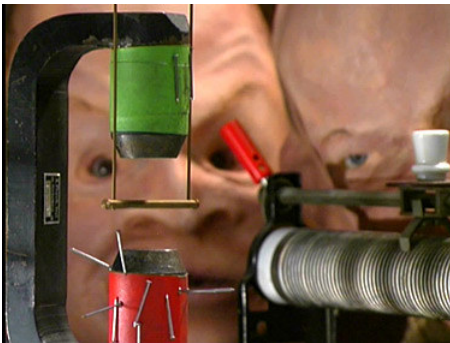
Film: QED – Materie, Licht und das Nichts
Filmszene: Kapitel 3, Künstlerischer Teil
Regisseur: Stefan Heusler
Film Studio: Sciencemotion, www.sciencemotion.de

Fortgeschrittenes Niveau

Im 19. Jahrhundert deckten eine Vielzahl von Experimenten immer mehr Eigenschaften des Elektromagnetismus auf. Zwei wichtige Entdeckungen sind:

- 1) Die Protonen und Elektronen im Atom sind elektrisch geladen. Die Ladungen kompensieren einander genau. Das ist gar nicht so selbstverständlich. Das Elektron ist ein punktförmiges Elementarteilchen. Das Proton ist kein Elementarteilchen, sondern besteht aus drei Quarks. Trotzdem ist die elektrische Ladung des Protons bis auf das Vorzeichen exakt gleich groß wie die des Elektrons.
- 2) Die Wechselwirkung zwischen geladenen Teilchen wird durch Photonen vermittelt. Die Photonen koppeln an elektrisch geladene Teilchen, z.B. an das Elektron, Positron und das Proton. Photonen sind quantisierte elektromagnetische Wellen. „Quantisiert“ bedeutet, dass einem Photon eine bestimmte Energieportion entspricht, $E = h \cdot \nu$ (h ist die Planck'sche Konstante, ν die Frequenz des Photons). Das Photon ist eine elektromagnetische Welle, weil es mit einer bestimmten Frequenz ν zwischen elektrischer und magnetischer Feldstärke oszilliert, während es sich im Raum fortbewegt.

Schauen wir uns nun das Experiment mit der Leiterschaukel im konstanten Magnetfeld etwas genauer an.



Nur bewegte Ladungen (= ein Strom, der durch die Leiterschaukel fließt) spüren eine Kraft im Magnetfeld. Wenn nun ein Strom von Elektronen durch die Leiterschaukel fließt, erfahren die Elektronen eine Kraft in diesem Feld, die so genannte Lorentz-Kraft.

Aus der Sicht eines Beobachters, der sich mit derselben Geschwindigkeit wie ein bestimmtes Elektron durch den Draht bewegt, ist die Geschwindigkeit des Elektrons gleich null. Somit verschwindet

aus seiner Sicht auch die Lorentz-Kraft. Trotzdem spürt das Elektron eine Kraft, weil die Gesetze der Physik unabhängig vom Standpunkt des Beobachters sein müssen. Durch den Wechsel des Standpunktes transformiert die Lorentz-Kraft in die Coulomb-Kraft (elektrischer Kraft).

Aus diesem Grund sind die Coulomb- und die Lorentz-Kraft zwei Seiten derselben Medaille. Es hängt vom Standpunkt des Beobachters ab, ob die Kraft als elektrische oder magnetische Kraft wahrgenommen wird.

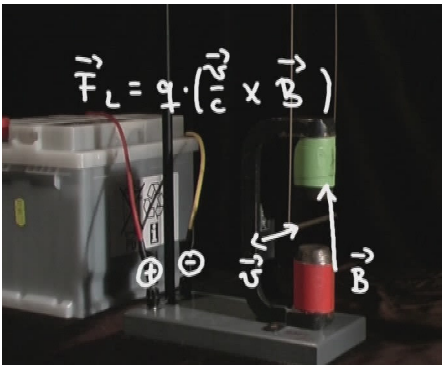
Autor: Stefan Heusler, Annette Lorke
E-Mail: sciencemotion@web.de

6

Film: QED – Materie, Licht und das Nichts
Filmszene: Kapitel 3, Künstlerischer Teil
Regisseur: Stefan Heusler
Film Studio: Sciencemotion, www.sciencemotion.de

Weiterführende Informationen

Wir diskutieren den Zusammenhang zwischen den folgenden experimentellen Beobachtungen:



1. Ein Strom von bewegten Elektronen erzeugt ein magnetisches Feld.
2. Bewegte Testladungen in einem magnetischen Feld spüren die Lorentz-Kraft.
3. Statische Elektronen erzeugen ein elektrisches Feld.
4. Statische Testladungen in einem elektrischen Feld spüren die Coulomb-Kraft.

Im klassischen Elektromagnetismus werden Ladungen, die ein Feld erzeugen, formal von Testladungen unterschieden, die eine Kraft in diesem Feld spüren. Die erzeugende Ladung spürt niemals ihr „eigenes“ Feld in Maxwells Theorie.

Wir betrachten einen Draht, in dem ein elektrischer Strom fließt. Im einfachsten Fall würden sich alle Elektronen mit derselben Geschwindigkeit w bewegen, und die Atomrümpfe hätten alle denselben Abstand l zueinander. Im Laborsystem neutralisieren sich die Ladungen der Atomrümpfe und der bewegten Elektronen, so dass der Draht neutral ist. Daher ist das elektrische Feld außerhalb des Drahtes gleich null. Außerhalb des Drahtes entsteht allerdings ein magnetisches Wirbelfeld aufgrund der bewegten Elektronen.

Nun nehmen wir an, dass außerhalb des Drahtes sich eine Testladung q mit einer Geschwindigkeit v parallel zum Draht bewegt. Diese Testladung spürt keine Coulomb-Kraft, da der Draht elektrisch neutral ist. Aber die Testladung spürt die Lorentz-Kraft in radialer Richtung. Dies ist die Beschreibung der Szene aus Sicht des Beobachters im Laborsystem.

Wir wechseln nun den Standpunkt und bewegen uns zusammen mit einem Elektron durch den Draht. Aus der Sicht des Elektrons bewegen sich die positiv geladenen Atomrümpfe in die umgekehrte Richtung. Daher entsteht auch aus der Sicht des Elektrons ein magnetisches Feld außerhalb des Drahtes.

Aber was passiert nun mit der Testladung? Betrachten wir den Fall, dass die Geschwindigkeit der Testladung gleich der der Elektronen im Draht ist, $v = w$. Aus der Sicht eines Elektrons ruht dann die Testladung. Die Testladung spürt keine Kraft im Magnetfeld, weil die Lorentz-Kraft für statische Ladungen verschwindet. Trotzdem wirkt noch die Kraft in radialer Richtung auf die Testladung q . Da diese Kraft nicht die magnetische sein kann, muss es die elektrische Kraft sein.

Es folgt, dass aus der Sicht des mitbewegten Beobachters der Draht nicht neutral, sondern elektrisch geladen. Aufgrund dieser Ladung wird die Testladung q in radialer Richtung beschleunigt.

Erstaunlicherweise entsteht dieses elektrische Feld aufgrund der Längenkontraktion, die aus der *speziellen Relativitätstheorie* folgt.

Da der Draht im Laborsystem elektrisch neutral ist, ist der Abstand $d_{\text{Atom}}(0)$ zwischen den statischen Atomrümpfen und der Abstand $d_{\text{Elek}}(w)$ zwischen den Elektronen, die sich alle mit der Geschwindigkeit w bewegen, gleich groß, $d_{\text{Atom}}(0) = d_{\text{Elek}}(w)$.

Wegen der Längenkontraktion ist der Abstand $d_{\text{Elek}}(w)$ der Elektronen, die sich mit der Geschwindigkeit w im Laborsystem bewegen, kleiner als der Abstand $d_{\text{Elek}}(0)$ im Ruhesystem der Elektronen:

$$d_{\text{Atom}}(0) = d_{\text{Elek}}(w) = \frac{d_{\text{Elek}}(0)}{\sqrt{1 - \left(\frac{w}{c}\right)^2}}$$

Sowohl aus der Sicht der Elektronen im Draht als auch der Testladung q bewegen sich die Atomrümpfe mit der Geschwindigkeit $-w$, und es folgt

$$d_{\text{Atom}}(-w) = \frac{d_{\text{Atom}}(0)}{\sqrt{1 - \left(\frac{w}{c}\right)^2}} = \frac{d_{\text{Elek}}(0)}{1 - \left(\frac{w}{c}\right)^2} \neq d_{\text{Elek}}(0)$$

Aus der Sicht eines mitbewegten Beobachters entsteht ein elektrisches Feld, da sich die positiven und negativen Ladungsdichten nicht exakt kompensieren. Dieses elektrische Feld wirkt auf die Testladung q genauso wie das magnetische Feld im Laborsystem. Beide Felder sind nur zwei Seiten derselben Medaille.

Internetseiten über Elektromagnetismus und spezielle Relativitätstheorie:

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

http://en.wikipedia.org/wiki/Relativistic_electromagnetism