

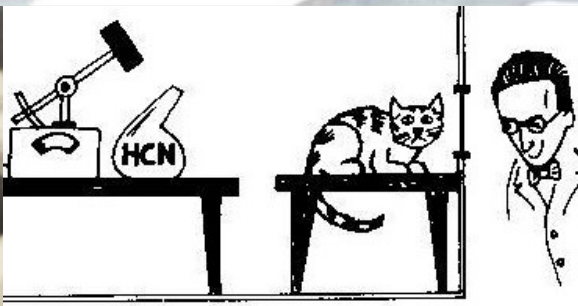
# ELEMENTE DER QUANTENPHYSIK

EIN ROTER FADEN FÜR  
GYMNASIASTINNEN UND GYMNASIASTEN

VON HANS PETER DREYER

WARNUNG VOR NEBENWIRKUNGEN:

DAS LERNEN VON QUANTENPHYSIK KANN IHRE WAHRNEHMUNG DER UMGEBUNG  
UND IHR VERSTÄNDNIS FÜR DIE WELT UMFASSEND UND DAUERND VERÄNDERN



[hp.dreyer@thurweb.ch](mailto:hp.dreyer@thurweb.ch)

Version 1.1 – Oktober 2024



Universität  
Zürich<sup>UZH</sup>



## QUANTENPHYSIK?

Quantenphysik ist eine neue Stufe der Physik, nicht bloss ein neues Kapitel wie etwa die Akustik. Wenn das winzige ( $6.6 \cdot 10^{-34}$  Js) Wirkungsquantum  $h$  eine Rolle spielt, sieht die Welt anders aus. Ein bekanntes Produkt der Quantenphysik ist der Laser. Man trifft ihn überall: im Unterricht als Laserpointer, in der Disco als Lasershow, bei der Augenärztin als Operationsinstrument, in der Präzisionswerkstätte zum Schneiden von komplizierten Formen ...



Die frühe, einfache Quantenphysik des Lichts steht im Mittelpunkt von Modul 1.

## ÜBERALL QUANTENPHYSIK

Quantenphysik (QP) ist überall. Sie beeinflusst unseren Alltag auch dort, wo wir es nicht vermuten, beispielsweise wenn die Achillessehne angerissen ist. Mit Röntgenstrahlen kann man zwar die Knochen sichtbar machen, aber nicht andere Gewebe, z. B. Sehnen. Diese enthalten immer viel Wasserstoff in verschiedenen Verbindungen. Den Wasserstoff bringt das MRI (magnetic resonance imaging) zum Leuchten, nicht sichtbar, sondern im unsichtbaren, unproblematischen Radiofrequenzbereich. Der Kern des Wasserstoffs ist ein kleines Magnetchen (QP). Beim MRI richtet man es im starken Feld eines supraleitenden



(QP) Magneten aus und bringt es anschliessend mit Radiostrahlung kurz zum Kreiseln (QP). Wenn es damit aufhört, sendet es ein Signal aus (QP) mit der Information, in welchem Gewebe es steckt. Eine Antenne fängt das Signal auf (QP) und verwandelt es in einen elektrischen Stromstoss. Dieser wird im Computer (mit viel QP, auch wenn es kein Quantencomputer ist!) analysiert und zu einem Bild zusammengefügt. Dieses wird auf dem Bildschirm (QP) sichtbar gemacht, farbig ausgedruckt (QP) oder blitzschnell über das Internet (QP) der Hausärztin für die Diagnose zugestellt ...



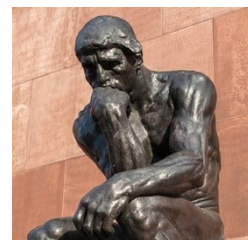
Atomphysik ist Quantenmechanik. Sie steht im Mittelpunkt von Modul 2.

## FACETTEN DER QUANTENPHYSIK – SEITENBLICKE IN DIE KLIMAPHYSIK

«Physik hat viele Facetten», schreibt Roman Sexl, der Herausgeber der Buchserie «Facetten der



Physik», und findet «historische, technische, soziale, kulturelle, philosophische und amüsante Facetten». Physik besteht nicht einfach aus den Experimenten, Formeln und technischen Anwendungen, die am Ende einer Entwicklung in den Lehrbüchern weitergegeben werden. Physik wird geschaffen, wie Kunst. Man kann natürlich Auguste Rodins «Denker» im Kunstmuseum bewundern oder analysieren. Man erhält aber einen anderen, umfassenderen Zugang zum Kunstwerk, wenn man auch etwas über seinen Schöpfer weiss. Auf dem Schwarz-Weiss-Foto steht er in seiner Werkstatt unter der Version des Denkers, die sein Grab zieren wird.



In den FACETTEN werden wir dem entsprechend immer wieder versuchen, einen Einblick in die «Werkstatt» der Physiker und der wenigen Physikerinnen zu erhalten.

Auch diese schöpferischen Menschen, die in der erstaunlich kurzen Zeitspanne zwischen 1900 und 1930 mit der Quantenphysik unsere Sicht auf die Dinge komplett auf den Kopf gestellt haben, sollen sichtbar werden.

Gelegentlich eröffnen sich aus der Quantenphysik Blicke in die Klimaphysik, einem interdisziplinären Gebiet, das sich mit dem drängendsten Problem der Menschheit beschäftigt.

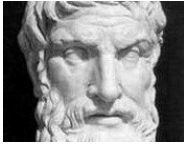



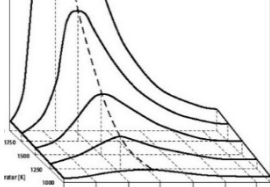







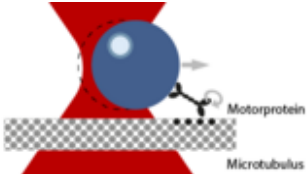


## 1. WAS IST LICHT?

DER QUANTENPHYSIKER RICHARD FEYNMAN MEINT:

«I THINK NATURE'S IMAGINATION IS SO MUCH GREATER THAN MAN'S, SHE'S NEVER GOING TO LET US RELAX».

Schon Epikur von Samos beschäftigte sich mit der Wechselwirkung von Materie und Strahlung. Er schrieb: *Denn der Abfluss [des Lichts] von der Oberfläche der Körper ist ununterbrochen, ohne dass der Verlust sichtbar wird.* – Wir nähern uns schrittweise dem heutigen Kenntnisstand und starten bei der Wellenvorstellung, die um 1900 das Wissen über das Licht dominierte.

Menschen haben neue Ideen	Vorstellung vom Licht	Experimente und / oder Anwendungen
	Epikur von Samos 300 v. Chr.  Licht fließt.	Denkt nach:  Physik ist Philosophieren über die Natur.
	Heinrich Hertz 1885:  Licht ist eine elektromagnetische Welle mit $c$ und $f$ und $\lambda$ .	
	Max Planck 1900:  Die Oszillatoren, die Wärmestrahlung erzeugen, nehmen Energie in Portionen $hf$ auf.	
	Albert Einstein 1905:  Bei der Erzeugung und Verwandlung zeigt sich Licht in Lichtquanten $hf$ portioniert.	
	Albert Einstein 1910:  Licht zeigt Dualität. Eine zukünftige Theorie wird beide Aspekte vereinigen.	
	Richard Feynman 1950:  Licht ist ein Objekt der QED. Es erscheint uns paradox, weil sein Verhalten uns fremd ist.	
	Donna Strickland 2018: Sie teilt den Nobelpreis für die laseroptische Pinzette mit Arthur Ashkin und Gérard Mourou.	

Die Antwort auf die Frage «Was ist Licht?» wird abstrakt sein. Wenn wir uns Bilder des Lichts zu machen versuchen, werden diese uns paradox erscheinen. Wir dürfen uns von der Natur überraschen lassen.

### 1.1 Was ist Licht? – Um 1900 meinte man, diese Frage endgültig beantworten zu können.

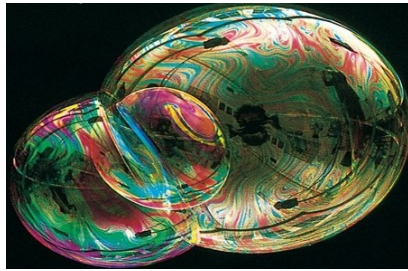
Um 1900, noch steckte man im Zeitalter der Kaiser, Zaren und Sultane, wusste man bereits viel über das Licht, das heute noch stimmt, aber nicht die ganze Wahrheit ist:

(1) Licht ist nicht einfach da, sondern kommt hierher. Licht ist kein Zustand, sondern ein gerichteter Prozess. Licht transportiert Energie von der Quelle (Sonne, Kerze...) zum «Empfänger» (Auge, Fotoapparat...). Licht ist nicht unendlich schnell, sondern braucht gut 8 Minuten um von der Sonne zur Erde zu gelangen. Die Geschwindigkeit des Lichts beträgt im leeren Raum  $c = 3.0 \cdot 10^8$  m/s.



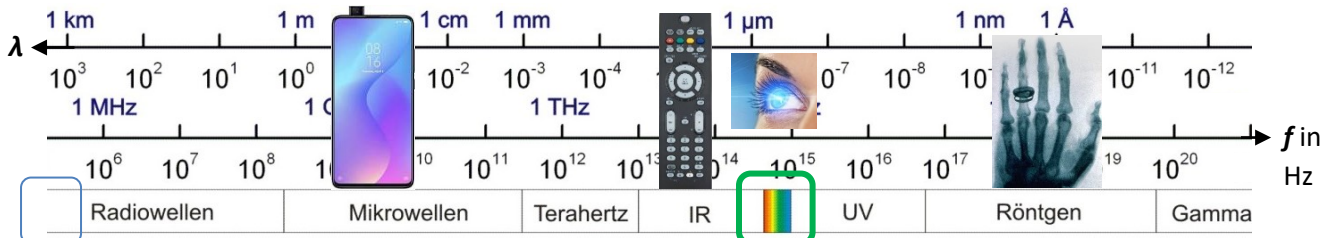
KAISER FRANZ JOSEPH UND ELISABETH (SISI)

(2) Schon seit 100 Jahren kann man die Strahlen einer Lampe, die man durch einen Regenschirm oder die Augenwimpern beobachtet, die Farben bei Seifenblasen, usw. mit dem **Wellenmodell des Lichts** verstehen:



Licht zeigt eine räumlich regelmässige Struktur, die **Wellenlänge**  $\lambda$ . Sie beträgt beim sichtbaren Licht etwa  $\frac{1}{2}$  Tausendstelmillimeter = 0.5 Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) = 500 Nanometer (nm). Beim roten Licht ist sie grösser, beim violetten Licht ist sie kleiner. Im **Spektrum** (vom lateinischen *spectare* = schauen) gehört zu jeder Farbe eine bestimmte Wellenlänge.

(3) Es gibt auch Licht, das wir Menschen nicht sehen können: jenseits des Violett das UV und jenseits des Rot das Infrarot. Manche Schlangen können **IR-Strahlung** mit einem besonderen «Auge» «sehen». Das legt nahe, den Begriff «Licht» weiter zu fassen und auch die Röntgenstrahlung und die Gammastrahlung, die beide um 1900 entdeckt wurden, als Licht zu bezeichnen. In Figur 1.1 sind sie zusammen mit IR, sichtbarem Licht (grün umrahmt) und UV auf einer Wellenlängenskala dargestellt. Nach rechts nimmt die Wellenlänge ab und die Frequenz zu.



FIGUR 1.1: SPEKTRUM DER ELEKTROMAGNETISCHEN STRAHUNG. DIE SKALA MIT DER WELLENLÄNGE  $\lambda$  STEIGT NACH LINKS, DIEJENIGE MIT DER FREQUENZ  $f$  WÄCHST NACH RECHTS OHNE ENDE. HINWEIS:  $1 \text{ \AA} = 1 \text{ ANGSTRÖM} = 10^{-10} \text{ m}$

(4) Alle Strahlenarten können mit geeigneten, d.h. der Wellenlänge angepassten, Spiegeln reflektiert werden, wie es beispielsweise die Grundlage aller Spiegelteleskope ist. Mit allen Strahlenarten kann man auch Interferenzerscheinungen am Doppelspalt zeigen. Der Doppelspalt muss «einfach» eine passende Grösse aufweisen: etwa 100 m bei Radiowellen, einige cm bei Mikrowellen, einige Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ) bei sichtbarem Licht und einige Nanometer (nm) bei Röntgenstrahlung.

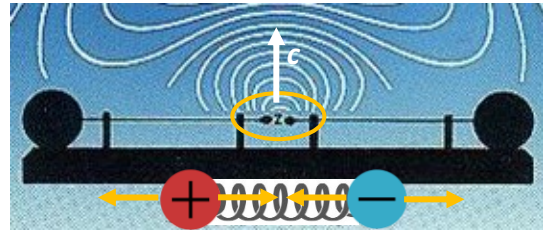
Erzeugung von Wasserwellen ist einfach, wie das Bild zeigt: Ein mit der Frequenz  $f$  schwingender Ball drückt in die Oberfläche. Die Wellenlänge ergibt sich automatisch. Ein gleicher Ball weist die Welle anderswo nach, wenn er dort später mit der gleichen Frequenz zu schwingen anfängt. Ähnlich ist es beim Erzeugen von mechanischen Wellen allgemein oder Schallwellen im Besonderen: Mit etwas Energie bringt man eine Stimmgabel oder eine Saite zum klingen. Und der Nachweis erfolgt, indem eine entfernte Stimmgabel oder eine Klaviersaite zur Resonanz (= Mitschwingen) kommt.

Erzeugt man mit zwei Bällen Wellen, dann überlagern sich die Wellen. An gewissen Stellen löschen sich Berge und Täler regelmässig aus: destruktive **Interferenz**; an anderen Stellen verstärken sie sich: konstruktive Interferenz.



(5) Nicht so einfach ist es, die um 1850 vorhergesagten elektromagnetischen Wellen zu erzeugen. Es sollte mit beschleunigten, schwingenden Ladungen gehen. Heinrich Hertz gelang das 1886 mit den bescheidenen Mitteln von Figur 1.2. Hertz konnte die Strahlung reflektieren und in wenigen Metern Entfernung nachweisen.

- Eine **ruhende** elektrische Ladung erzeugt nur ein ruhendes, elektrisches Kraftfeld (Knistern im Haar).
- Eine gleichförmig **bewegte** elektrische Ladung (Strom) erzeugt ein magnetisches Kraftfeld (Strom lenkt Kompassnadel ab).
- Eine **schwingende** Ladung aber erzeugt ein elektromagnetisches Strahlungsfeld, das von der Quelle mit  $c$  wegströmt.



FIGUR 1.2: HERTZ-SENDER MIT FUNKENSTRECKE

In Figur 1.2 sind symbolisch die in der Funkenstrecke schwingenden Ladungen vergrößert hinzugefügt.

Der elektrische Anteil des Strahlungsfelds übt Kräfte auf Ladungen in seiner Nähe aus. Damit gelingt der Nachweis der Strahlung. Hertz benützte dazu den Kohärer, ein Glasröhrchen, in dem zwischen Eisenspänen in der Mitte Funken entstehen, also wiederum schwingende Ladungen.



Kohärer

Wenn Sie bei einem Gewitter einen transportablen Radioempfänger einschalten, hören Sie auf fast allen Kanälen wie «es funkt». Das macht deutlich, wieso «Radio» und «Rundfunk» Synonyme sind.

Hertz ahnte früh den möglichen Nutzen: *Eine weitere Anwendung (...) dürfte erst dann nutzbringend sein, wenn es gelingen sollte, auf irgend eine Weise die Schwingungsdauer direct zu messen.*

Heute wissen wir, dass die Schwingungsdauer  $T$  von Hertz's Sender etwa  $3 \cdot 10^{-9}$  s betragen hat. Die Frequenz  $f = 1/T$  lag bei  $300 \text{ MHz} = 3 \cdot 10^8 \text{ Hz}$  und die Wellenlänge war  $\lambda = c/f = 1 \text{ m}$ . Die Größenordnung ein Meter ist nur wenig mehr als die Wellenlänge der Strahlung beim modernen Handy. Siehe Figur 1.1.

#### Antworten der Physik um 1900 auf die Frage 'Was ist Licht?':

Licht ist elektromagnetische Strahlung, «wellig-wolkig», mit Wellenlänge  $\lambda$  und Frequenz  $f$ , die sich im Raum mit  $c$  ausbreitet und Energie transportiert.

Für alle Wellen gilt die Beziehung  $c = \lambda \cdot f$ .

Bei elektromagnetischen Wellen ist  $c$  die Lichtgeschwindigkeit.

#### HINWEISE UND ERGÄNZUNGEN:

(1) Um 1900 war in der Physik vieles im Umbruch: Die Röntgenstrahlen und die natürliche Radioaktivität waren eben erst entdeckt worden. Die Frage, ob die elektromagnetische Strahlung einen Träger brauche wie der Schall, wurde mehrheitlich bejaht. Das ominöse Trägermedium hiess Äther. Schon bald sollte ihn die Relativitätstheorie überflüssig machen.

(2) Alle Antworten auf die Frage «Was ist Licht?», von (1) bis (5), waren um 1900 korrekt. Und sind es auch heute noch. Aber sie sind nur die halbe Wahrheit. Die Quantenphysik erkennt, dass sich Licht *auch* «körnig-kompakt» zeigen kann. Die unerwartete Geburt der Quantenphysik ist Thema von 1.2.

(3) Funktechnik: Die von Hertz vermutete *nutzbringende Anwendung* gelang in der Funktechnik bald. Die Distanz zwischen Sender und Empfänger vergrößerte sich dank der Antenne von Guglielmo Marconi. Im Wallis glückte es ihm, ein Signal in eine Entfernung von 1.5 km zu übertragen. Das Signal bestand zwar nur aus dem Unterschied zwischen «Rauschen» und «kein Rauschen». Doch das genügte für den Funkverkehr mit Morse-Signalen. Beim Untergang der TITANIC war Marconis System bereits Standard. Der Bordfunker sendete aus der abgebildeten Kabine den Hilferuf SOS auf der Notfrequenz 500 kHz.



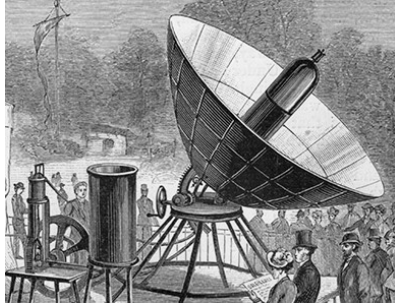
Im Funkraum der TITANIC

Elektromagnetische Strahlung war nun nicht mehr Thema der Forschung, sondern rief die CARPATHIA herbei und half, mehr als 700 Menschenleben zu retten.

Wenn wir übungshalber einen Punkt des «S» von SOS als 1 ms lang dauernd annehmen, dann enthielt er 500 elektromagnetischen Wellen mit der Wellenlänge 600 m (blau umrahmt in Figur 1.1). Der Punkt wurde demnach repräsentiert durch eine elektromagnetische «Wolke» von 300 km Länge, die sich mit Lichtgeschwindigkeit von der TITANIC in alle Richtungen ausbreitete, auch zur CARPATHIA.

### UMWELT UND KLIMA UM 1900:

Die Zeit vor dem ersten Weltkrieg war – passend zur Expansion der Weltreiche – optimistisch gestimmt. Das zeigte sich auch in den Neuerungen der Weltausstellung von 1878 in Paris, namentlich beim elektrischen Licht.



Der Franzose Augustin Mouchot, ein Gymnasiallehrer, zeigte den Nutzen der Energie, die uns die Sonne gratis liefert. Er konzentrierte sie mit einem Hohlspiegel für den Antrieb eines geräusch- und abgaslosen Solarmotors. Obwohl dieser Motor eine Druckerpresse betreiben konnte, fand er keinen Absatz, denn die Sonne leuchtet nicht immer. Augustin Mouchot musste wieder Mathematik und Physik unterrichten.

Aus heutiger Sicht überraschend ist der Boom der Elektroautos um die Jahrhundertwende. Beim abgebildeten österreichisch-deutschen Modell LOHNER-PORSCHER von 1900 erkennt man die in jedem Rad eingebauten Elektromotoren gut, ebenso den Platz für die fast zwei Tonnen schwere Bleibatterie. In den USA waren damals 40 % der Automobile elektrisch angetrieben, doppelt so viele wie mit Benzinmotoren. Der Vorteil für die Umwelt wurde aber ab etwa 1910 aufgegeben zugunsten der billigeren und schnelleren Benzinautos, die bei FORD vom Fließband strömten und die bis heute einen nennenswerten Beitrag zum CO<sub>2</sub>-Ausstoss der technischen Zivilisation beitragen.



**Reflexion:** Der Satz «Das Licht geht aus.» kann falsche Vorstellungen wecken. – Diskutieren Sie in einer kleinen Gruppe, welche es sein könnten?

**Reflexion:** Wo müssten Sie wirtschaftliche Opfer erbringen, wenn Sie mehr für Umwelt und Klima tun möchten?

### AKTIVITÄTEN ZU 1.1

#### AUFGABEN:

MINT-Ergänzung: M1.1) TITANIC I (Wellen)

#### EXPERIMENTE:

Ergänzung: Nachweis von IR und UV

Ergänzung: Radio-Sender

Ergänzung: Doppelspaltexperiment mit Mikrowellensender

#### PANORAMA 1900:

Neubeginn nach dem Zusammenbruch

#### BIOGRAPHIE:

Marie Curie



## 1.2 Auftritt der Quantenphysik

### 1.2.1 Heisse Körper strahlen – Plancks Strahlungsgesetz

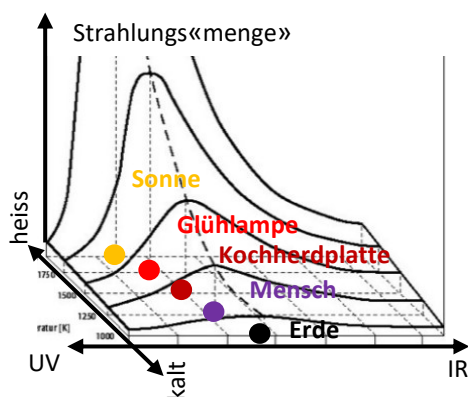
Früher musste man Fieber mit einem Thermometer in Körperkontakt messen. Heute geht es kontaktlos mit einem Gerät, das die Körperstrahlung erfasst. Unser Körper sendet ein Gemisch von elektromagnetischen Strahlen aus. Aber nicht nur wir, sondern alle Körper besitzen eine gewisse Temperatur und senden eine dieser Temperatur entsprechende Strahlung aus: Sonne, Glühlampe, Kochherdplatte usw.

Das genaue Gesetz dieses universellen Sachverhalts formulierte Max Planck 1900 nach Vorarbeiten von Willi Wien und anderen. Wir verzichten auf Mathematik und verschaffen uns mit der Figur 1.3a einen grafischen Überblick über über das Gesetz der Wärmestrahlung:



Nach oben ist die Strahlungsmenge aufgetragen, die von zwei Variablen abhängt:

(1) von der Temperatur des Strahlers, die nach hinten zunimmt. Anstelle einer Skala sind Beispiele mit



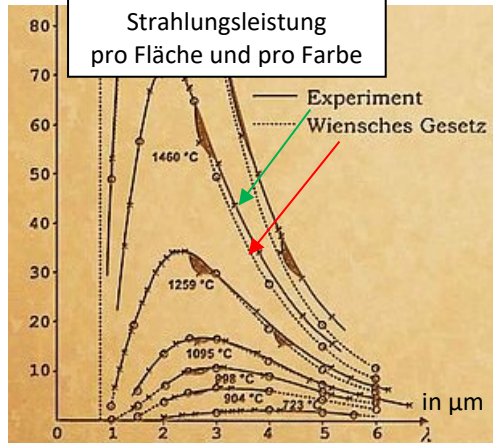
FIGUR 1.3a: STRALUNGSGESETZ

wachsender Temperatur angegeben: Erde, Mensch usw. Mit zunehmender Temperatur wächst die Strahlungsmenge, wie die gestrichelte Kurve zeigt. Das stimmt mit der Anschauung überein.

Die Variable (2) ist die Strahlungsart, variierend von kurzwellig (links, UV) nach langwellig (rechts, IR). Jeder Körper strahlt alle Arten ab, aber zu jeder Temperatur gehört eine Strahlenart mit der höchsten Strahlungsmenge. Bei der Erde und dem Menschen liegt sie im IR, bei der Glühlampe und der Sonne verschiebt sie sich über rot zu noch kürzeren Wellenlängen. Die farbigen Punkte zeigen die Lage des Maximums.

Heute funktioniert beispielsweise das Strahlungs-Fieberthermometer mit Plancks Gesetz. Für Glühlampen war es schon um 1900 technisch und wirtschaftlich bedeutsam. Edison liess in seinem New Yorker Privatlabor immer dauerhaftere Birnen mit immer besserer Lichtausbeute bauen. Werner von Siemens, sein Konkurrent in Berlin, überzeugte daher Kaiser Wilhelm II vom Nutzen einer staatlichen «Physikalisch-Technischen Reichsanstalt» (PTR). Diese weltweit erste Institution für angewandte Physik sollte unter anderem die Leuchtkraft verschiedener Lichtquellen messend genau vergleichen.

Die Experimentatoren in der PTR stülpten quasi die Sonne nach innen und bauten einen Ofen, dessen Temperatur sie gut einstellen konnten. Sie fanden, dass es



FIGUR 1.3b: DATEN ZUM STRALUNGSGESETZ

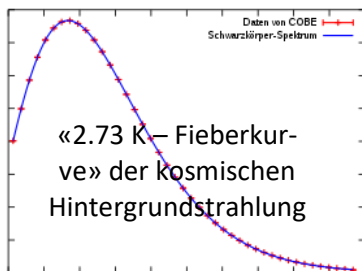
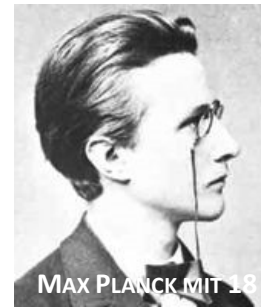
egal war, ob die Glühdrähte aus Wolfram oder anderen Materialien bestanden. Menge und Farbe des abgestrahlten Lichts wurden praktisch nur von der Temperatur bestimmt. Deshalb bezeichnete man solches Licht einfach als «Wärmestrahlung». Ihre Quantität und Qualität (= Wellenlänge  $\lambda$ ) hat man an der PTR auch **im IR sehr genau** gemessen. In Figur 1.3b sind die damaligen Daten bei verschiedenen Temperaturen aufgetragen. Die oberste Kurve wurde bei 1650°C gemessen, die unterste bei 723°C. Im Sommer 1900 tauchte ein ernsthaftes Problem auf: Die genauen Messwerte (grüner Pfeil) passten nur teilweise zu den Vorhersagen der Theorie von Wien (roter Pfeil). Diese musste halbwegs korrekt sein, konnte aber nicht vollständig stimmen.

Nun musste Max Planck, Professor für theoretische Physik an der Universität Berlin, arbeiten. Es gelang ihm, wie er selbst sagte, eine *Krücke zu konstruieren*. Für das neue **Strahlungsgesetz** verband er ein Gesetz für kurze und eines für grosse Wellenlängen, zu einer *glücklich erratenen Interpolationsformel*. (Latein *inter* + *polus* = zwischen zwei Punkten bestimmen).

**HINWEISE UND ERGÄNZUNGEN:**

(1) Die bisherigen und die folgenden Einzelheiten der Entdeckungsgeschichte sind einzeln belanglos. Es ist nicht wichtig, wie der Ofen der PTR funktionierte, wenn man sich nicht für Brennöfen interessiert, und es ist nicht wichtig, wie Plancks Rechnungen verliefen, wenn man nicht Physik studiert. Es ist aber wichtig mitzunehmen, dass in diesem bedeutsamen Fall ein Wechselspiel zwischen Theorie und Experiment gelaufen ist.

(2) Aus Figur 1.3a wird deutlich, welche Rolle das Strahlungsgesetz für die kontaktlose Temperaturmessung in der **Astronomie** bedeutet. Nur dank des Gesetzes wissen wir, dass Sirius, der hellste Stern am Nordhimmel, etwa 10'000 Grad heiss ist. Der Rote Riese Aldebaran hingegen ist nur etwa 4000 Grad warm, wesentlich kühler als unsere Sonne mit 6000 Grad.



Das Strahlungsgesetz gilt auch für das Universum als Ganzes: Vor 13.7 Mia. Jahre, kurz nach seiner Entstehung, entkoppelten sich bei unerhörter Hitze Materie und Strahlung. Diese verteilt sich seither mit der Ausdehnung des Universums auf ein wachsendes Volumen. Sie kühlt sich laufend ab und besitzt heute noch eine Temperatur von 2.73 K. Die «2.73 K-Fieberkurve», die u. a. mit dem Satelliten PLANCK gemessen wird, besitzt die gleiche Form wie die Kurven in den Figuren 1.3

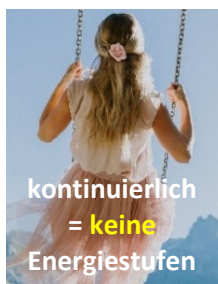
(3) Plancks Strahlungsgesetz gilt auch für den «Patienten Erde». Damit seine Temperatur konstant bleibt, muss er dauernd die von der Sonne erhaltene Energie abstrahlen können. Dies geschieht überwiegend mit IR-Strahlung. Menschgemachte Treibhausgase stören das natürliche Gleichgewicht und verursachen den **anthropogenen Treibhauseffekt**. Genauer dazu in → 1.6.

**1.2.2 Die nicht erwartete Geburt des Wirkungsquantums  $h$** 

Nachdem Max Planck die Formel gefunden hatte, welche die Daten von Figur 1.3b perfekt erfasste, stellte sich ihm die schwierige Aufgabe, eine **theoretische Begründung** für diese Formel zu liefern.

Planck erklärte seine Formel etwa so: Die Wärmestrahlung stammt ursprünglich von den Atomen des Ofens, der Sonne usw. Von den Atomen wusste man damals nur, dass sie aus negativ geladenen Elektronen und irgendeinem positiven Rest bestehen. In den Atomen müssen die Ladungen nach dem Vorbild von Hertz schwingen und dabei strahlen. Für jede Wellenlänge  $\lambda$  im Strahlungsgesetz braucht es einen eigenen Strahler mit der entsprechenden Frequenz  $f = c/\lambda$ . Anschaulich gesprochen, braucht es unendlich viele strahlende Oszillatoren mit je entsprechender Federhärte. Diese Strahler erhalten die für die Strahlung nötige Energie von der Heizung, also elektrisch beim Ofen oder durch Kernfusion in der Sonne. So weit, so gut. Doch benötigen unendlich viele Strahler nicht unendlich viel Energie?

In einem Akt der Verzweiflung nimmt Max Planck an, dass die Strahlung seiner fiktiven Oszillatoren Energie nur in ganz **bestimmten**



**Portionen**, den **Energiequanten**, von der Heizung aufnehmen und als Strahlung abgeben dürfen. Das ist vollständig im Widerspruch zur damaligen Physik. Diese nahm alle Größen (Länge, Zeit, Temperatur ...) als kontinuierlich, als beliebig fein teilbar, an. – Würden nicht auch Sie denken, dass Sie beim Schaukeln die Energie beliebig fein dosieren können? Schaukeln hat doch nicht die Bedingung des Schanzenspringens, wo die Startposition in der Anlaufbahn nur **stufenweise** in die Höhe geht!





Nach Plancks Modell sollte jedoch genau dies der Fall sein. Die Energie der Oszillatoren sollte **«körnig»** sein, gestuft, fix unterteilt, wie Geld in Rappen oder Cent!

Allerdings müsste jeder Oszillator seine eigene Währung haben: Seine Energieportionen  $E$  müssten mit seiner Frequenz  $f$  nach der Formel  $E = h \cdot f$  durch **eine neue Naturkonstante, dem Wirkungsquantum  $h$** , verknüpft sein. Andere Naturkonstanten sind  $c$  und die Elektronenladung  $e$ .

Max Planck war noch sehr vorsichtig und sagte: *Ob diese Hypothese in der Natur wirklich zutrifft, kann in letzter Linie nur durch die Erfahrung geprüft werden.*

Viele Experimente bestätigten Planck und sein Wirkungsquantum! Aus den Messwerten von Figur 1.3b fand Planck den Zahlenwert von  $h$ , der uns durch die ganze Quantenphysik begleiten wird, und zwar in erstaunlich unterschiedlichen Zusammenhängen:

Max Planck 1900:	Das <b>Wirkungsquantum <math>h</math></b> hat den Wert:	<b><math>h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}</math></b>	<b>(1.1)</b>
------------------	---	--	--------------

Beachten Sie die Masseinheiten: Aus  $E = h \cdot f$  ergibt sich  $h = E/f$  und daraus  $\text{J/Hz} = \text{J}/(1/\text{s}) = \text{J} \cdot \text{s}$ . Die Masseinheit der Wirkung  $\text{J} \cdot \text{s}$  darf man nicht verwechseln mit  $\text{J/s} = \text{Watt}$ , der Masseinheit für Leistung. Mit  $h$  fand Max Planck eine Konstante, die gleich wichtig ist wie die Lichtgeschwindigkeit  $c$ . Doch  $h$  ist leider eine unanschauliche Konstante. Sie beschreibt ein Ding mit der Masseinheit *Energie pro Frequenz*. Aus historischen Gründen nennt man eine solche Grösse **Wirkung** (engl. *action*).

Das Wirkungsquantum  $h$  ist zwar winzig klein, aber nicht 0 ( $h \neq 0$ ). Wäre  $h$  genau 0, gäbe es keine «Körnigkeit» in der Natur und kein Kapitel «Quantenphysik». Wir könnten hier abbrechen!

<b>Quantenphysik</b> ist die Physik, bei der das Wirkungsquantum $h$ eine Rolle spielt.
---

#### HINWEISE UND ERGÄNZUNGEN:

(4) «Quantenphysik» bedeutet «Physik mit kleinsten Portionen»: Energieportionen, Lichtportionen, Drehbewegungs-Portionen ... Das Wort «Portion» stammt vom lateinischen «Anteil» und könnte als «beliebiger Anteil» aufgefasst werden. Das Wort «Quant» hingegen geht auf das lateinische «wie gross?» zurück und muss in der Physik als «minimal gross» verstanden werden.

(5) Wir versuchen, das «minimal grosse», winzig kleine Wirkungsquantum zu veranschaulichen, indem wir die Energie des Sonnenlichts ( $1000 \text{ J pro Sekunde pro m}^2$  bei klarem Himmel) durch einen Schauer von Energieportionen  $hf$  aus sichtbarem Licht ersetzen. Das gäbe etwa  $10^{22}$  Portionen pro Sekunde auf jeden  $\text{m}^2$ . Diese Zahl entspricht etwa der Anzahl Moleküle in einem Atemzug. Diese riesige Zahl veranschaulichen wir, indem wir uns jede Portion als Stäubchen von nur  $1/1000 \text{ mm}$  Kantenlänge denken. Insgesamt gäbe das ein Volumen von  $10^4 \text{ m}^3$ , entsprechend einem Quader von  $10 \text{ km}$  Höhe, auf jedem  $\text{m}^2$ , in jeder Sekunde. Das ist so viel, weil das Wirkungsquantum so winzig ist!

(6) Max Planck erkannte, dass das Strahlungsgesetz grundlegend ist, denn es hängt nur von  $T$  ab:  $1000^\circ$  heisses Gold strahlt gleich wie  $1000^\circ$  heisses Eisen. Das rechtfertigte seinen *Akt der Verzweiflung*, der ihm den Nobelpreis einbrachte. Trotzdem suchte er später erfolglos nach einer Physik ohne Quantenphysik.

#### AKTIVITÄTEN ZU 1.2

##### AUFGABEN:

M1.2) TITANIC II (zur Quantenphysik)

M1.3) Ein Mikrowellenofen als Raketentriebwerk

##### EXPERIMENTE:

Strahlungsgesetz mit Bolometer nachmessen

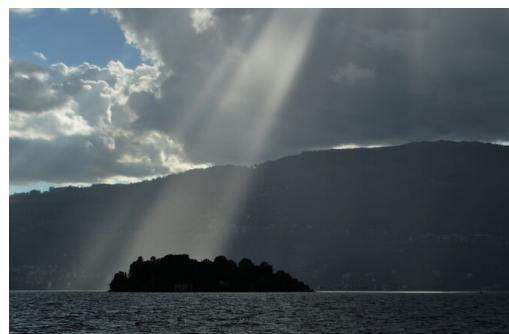
##### NACHDENKEN ÜBER PHYSIK:

Physik und Technik

PANORAMA 1900: Neubeginn nach dem Zusammenbruch

##### BIOGRAPHIE:

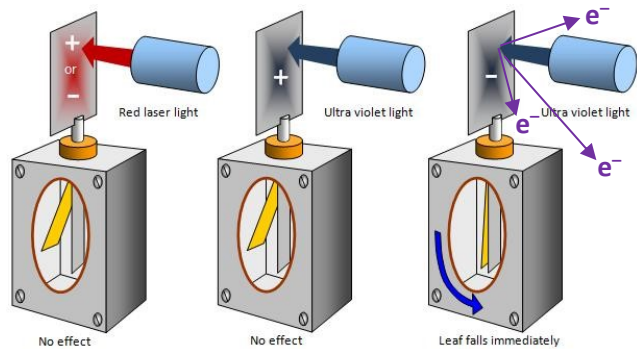
Max Planck



### 1.3 Auftritt der Lichtquanten

#### 1.3.1 Einstein erfindet Lichtquanten und schiesst übers Ziel hinaus.

Licht kann interessante Wirkungen erzeugen. Die erste Fotografie ist kurz nach der Französischen Revolution entstanden. Sie führte zum **photoelektrischen Effekt**. Das ist die Erscheinung, dass Licht Elektronen freizusetzen vermag. In Figur 1.4a zeigt ein Schalexperiment das Prinzip: Leuchtet man mit UV auf die Zn-Platte des negativ geladenen Elektroskops, entlädt es sich: **Elektronen**  $e^-$  werden **frei** und können wegfliegen (Fig. 1.4a rechts). Positive Ladung auf dem Elektroskop (mitte) hingegen hält die Elektronen zurück. Sichtbares oder IR-Licht bewirkt überhaupt keinen Photoeffekt, wenn die Platte aus Zink besteht (Fig. 1.4a links).



FIGUR 1.4a: BEDINGUNGEN FÜR DEN PHOTOEFFEKT

Philipp Lenard bremste die herausgeschlagenen Elektronen elektrisch und mass, so gut es ging, ihre Bewegungsenergie. Er fand, dass das Material eine Rolle spielt: Bei manchen Materialien genügte sichtbares Licht; bei Cäsium gelang der Photoeffekt sogar mit rotem Licht. Lenard fand zu seiner Überraschung, dass die Bewegungsenergie der Elektronen nicht von der Lichtmenge, wohl aber von der Licht**qualität**, der Frequenz oder Wellenlänge, beeinflusst wurde. – Wie kann es sein, dass beim Photoeffekt nur die Art, nicht aber die Menge des Lichts bedeutsam ist? Es braucht eine **hohe** Welle um ein Boot loszureissen, und nicht eine Welle mit **hoher Frequenz** respektive kurzer Wellenlänge!

Doch Licht ist nicht Wasser. Und das Elektron im Atom darf nicht mit einem Boot am Steg gleichgesetzt werden. Zur Erklärung des Photoeffekts braucht es eine genial neue Idee. Diese hat der junge Physiker Albert Einstein. Weil er an der ETH oft Laborarbeit geschwänzt hat, erhält er dort keine Doktoranden-Stelle und ist als frischgebackener Familienvater am Patentamt in Bern als Prüfer tätig.



ALBERT EINSTEIN  
IM PATENTAMT

In seinem kreativen «Wunderjahr» 1905 veröffentlicht er kurz nacheinander:

- (1) die Doktorarbeit zur Grösse der Moleküle, (2) die spezielle Relativitätstheorie, (3) die Theorie der Brownschen Bewegung, (4) den uns interessierenden Artikel

#### ÜBER EINEN DIE ERZEUGUNG UND VERWANDLUNG VON LICHT

##### BETREFFENDEN HEURISTISCHEN GESICHTSPUNKT

Darin untersucht er eine ganze Gruppe von Erscheinungen, die mit dem Licht zu tun haben, unter anderem die Fluoreszenz und den Photoeffekt. Seine neue Idee ist, die Energie des Lichts selbst zu portionieren und nicht nur die Energie fiktiver Oszillatoren. Messwerte dazu bestätigen Plancks Konstante. Für Einstein ist am wichtigsten, dass er auf diese Weise Plancks Strahlungsgesetz ( $\rightarrow$  1.2) besser begründen kann.

Albert Einstein nimmt 1905 an, Lichtenergie sei auch «körnig-kompakt». Im Original:  
*Es scheint mir nun in der Tat, dass die (...) Erscheinungsgruppen besser verständlich erscheinen unter der **Annahme**, dass die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei.*

«Diskontinuierlich» bedeutet «ungleichmässig» verteilt oder anders gesagt «in Lichtquanten konzentriert». Zu den «Erscheinungsgruppen» gehören die Wärmestrahlung mit ihrem komplizierten Gesetz, sowie der Photoeffekt: Erst UV-Quanten besitzen die Energie, um Elektronen aus dem Zn zu reissen.

Bemerkenswert ist, dass Einstein seine Idee als «Annahme» bezeichnete. Sie ist für ihn kein «Gesetz», sondern eine mögliche Sichtweise, ein **heuristischer Gesichtspunkt**. «Heuristik» ist die Kunst, mit begrenztem Wissen und wenig Zeit zu guten Lösungen zu kommen. In der Tat ist Einsteins Basis begrenzt, denn er hat nur wenig experimentelle Fakten. Aber seine Lösung ist sowohl gut als auch einfach: Er überträgt die Energiequanten von Max Plancks fiktiven Oszillatoren auf das reale Licht und nimmt an, die Energie des Lichts sei punktförmig konzentriert, daher die Formulierung «Lichtenergiequanten».

Einstein schreibt weiter im Original [Hervorhebungen und Hinweise von HPD]:

*Nach der **Auffassung**, dass das erregende Licht aus **Energiequanten** von der Energie  $hf$  [1] besteht, lässt sich die Erzeugung von Kathodenstrahlen [2] aus Licht folgendermassen auffassen. In die oberflächliche Schicht des Körpers dringen Energiequanten ein, und deren Energie verwandelt sich wenigstens zum Teil [3] in die kinetische Energie von Elektronen.*

[1] So schreiben wir heute. Einstein benutzt noch andere Symbole.

[2] Kathodenstrahlen sind die beim Photoeffekt wegfliegenden Elektronen.

[3] Zuerst wird das Elektron gegen die elektrische Anziehung der Atomrümpfe aus dem Metall gelöst. Das braucht Arbeit, die sogenannte Austrittsarbeit. Sie hängt vom beleuchteten Material ab. Nur aus der restlichen Energie wird Bewegungsenergie, kinetische Energie. Ist die Energie des Quants zu klein, vermag sie die Austrittsarbeit nicht zu leisten. Es geschieht nichts, wie im Zn bei rotem Licht.

Einstein spricht von *Energiequanten* oder *Lichtenergiequanten*; heute spricht man von **Lichtquanten**.



Ihre Existenz kann nicht bewiesen, sondern bloss experimentell bestätigt werden. Einstein führte als weitere Argumente zugunsten von Lichtquanten die Ionisationsenergie von Gasen (Energie zum Entfernen eines Elektrons) sowie das Grundgesetz der Fluoreszenz an: Die Frequenz, die fluoreszierende Kristalle aussenden, ist stets kleiner als die Frequenz des anregenden Lichts, denn die Energie der weggehenden Quanten ist kleiner als die der ankommenden, weil der Kristall etwas Energie aufnimmt.

Beachten Sie, wie vorsichtig Einstein formuliert. *Es scheint mir ... Unter der Annahme ... Nach der Auffassung ...* Er ist sich sehr wohl bewusst, dass er eine Revolution einleitet. Das Licht, dessen Wellencharakter, von vielen Experimenten gestützt, ein für alle Mal festgelegt scheint, soll zusätzlich oder gar ausschliesslich Teilchencharakter besitzen? Einstein kann seine derart kühne Behauptung nur mit wenigen experimentellen Fakten und Argumenten stützen.

Da erstaunt es nicht, dass im etablierten Physikbetrieb das Echo auf Einsteins Idee lange gering ausfiel. Lichtquanten interessierten ausser Planck kaum jemanden. Einstein wurde aber dank der Relativitätstheorie bald berühmt und Professor an der ETH Zürich. Max Planck wollte ihn nun nach Berlin holen und schrieb im Empfehlungsschreiben an die Behörden: *Dass Einstein in seinen Spekulationen gelegentlich auch einmal über das Ziel hinausgeschossen haben mag, wie z. B. in seiner Hypothese der Lichtquanten, darf man ihm nicht allzu schwer anrechnen; denn ohne einmal ein Risiko zu wagen, lässt sich auch in der exaktesten Naturwissenschaft keine wirkliche Neuerung einführen.*

**Bei Erzeugung und Verwandlung von Licht erscheint seine Energie «körnig».**

Die Energie eines **Lichtquants** der Frequenz  $f$  und der Wellenlänge  $\lambda$  beträgt:  $E = h \cdot f = hc/\lambda$  (1.2)

Erst 1922 – rückwirkend für 1921 – erhielt Einstein den Nobelpreis *für seine Verdienste um die Theoretische Physik und besonders für seine Entdeckung des Gesetzes des photoelektrischen Effekts*. Einstein erhielt den Nobelpreis also für die Gleichung (1.2) nicht für die Relativitätstheorie, durch die er schon früh zur öffentlichen Person geworden war, und für die er heute noch berühmt ist.

Vielleicht erscheint Ihnen der Photoeffekt als etwas, das nur Physiker im Labor interessieren müsse. Das ist keinesfalls so! Auch Sie erleben den Photoeffekt: Ihre Haut übernimmt die Rolle der Zinkplatte und die Sonne liefert gratis die Mischung verschiedener Strahlung. Wenn Sie hinter einer Fensterscheibe sitzen, die kein UV durchlässt, werden Sie nicht braun. Es geschieht nichts, wie in Figur 1.4a links, obwohl Ihnen heiss wird, weil noch Energie durchs Glas fliesst.

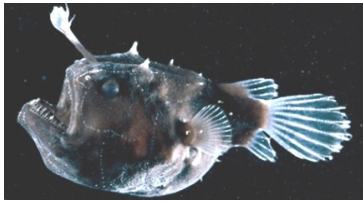
Wenn aber auch der **UV**-Anteil mit den **energiereichen** Quanten auf Ihre Haut trifft, wandern Elektronen durch die Moleküle der Haut. Idealerweise wird dabei Ihre Haut zur Bildung des dunklen Pigments Melanin angeregt. Die UV-Quanten können aber auch Elektronen aus der DNA heraus schlagen und einen genetischen Schaden in der Zelle anrichten. Jahrzehnte nach schutzlosem Sonnenbaden kann so ein Melanom, schwarzer Hautkrebs, entstehen.



FIGUR 1.4b: PHOTOEFFEKT IM ALLTAG

### 1.3.2 Erzeugung von Licht

Feuer und Blitz, Hitze und Ionisation gab es in der Natur schon immer als Lichtquellen. Raffinierter sind Glühwürmchen oder Laternenfische. Sie können in komplexen Stoffwechselreaktionen direkt Licht erzeugen, und zwar mit einem Wirkungsgrad von gegen 90%. In der Technik haben Glühlampen mit ihrem mageren Wirkungsgrad von 3% lange bei der Erzeugung von Licht durch Elektrizität dominiert.



Bereits 1906 hatte Einstein über die Umkehrung des photoelektrischen Effekts zwecks Lichterzeugung nachgedacht. Doch er konnte die Revolution der Halbleiter und damit die Veränderungen des Beleuchtungswesens, die heute immer noch im Gang ist, nicht vorhersehen. Eine **LED, light emitting diode**, vermag bereits mit Batteriespannung Licht in allen möglichen Farben zu erzeugen. Dabei benötigen die energiereichen Quanten des blauen Lichts eine höhere Spannung als des roten. Die LED revolutioniert das Beleuchtungswesen heute ebenso wie Edisons Glühlampe die Welt vor 100 Jahren verändert hat.

LEDs gibt es grossformatig für Scheinwerfer und sehr klein in den einzelnen Pixeln der Flachbild-



schirme. Die Brillanz eines Handy-Bildschirms wird erzielt durch das von vielen Quanten erzeugte Licht, das aus den mindestens 3 mal 1000 LEDs pro Zeile herausströmt und in unseren Augen viele «Elementarprozesse» bewirkt. (Es braucht je eine pro Grundfarbe, also total 3: Rot, Grün, Blau = RGB). IR-Leuchtdioden wirken unsichtbar in der Fernbedienung. Kurzwelliges Licht mit LED

herzustellen ist anspruchsvoller, deshalb gab es einen Nobelpreis für die blaue LED. Leuchtdioden können auch als Laser gebaut werden für Anwendungen im Laser-Pointer, im CD-Player, als Verstärker für die IR-Glasfaserkabel-Signale usw. Für die Laserlicht-Pinzette gab es 2018 wieder Nobelpreise.



### 1.3.3 Verwandlung von Licht

Die Verwandlung von Licht in der **Photosynthese** ist die Grundlage für unser Dasein. Die moderne Biochemie entschlüsselt den vielstufigen Prozess im grünen Blatt immer genauer. Einsteins «Elementarprozesse» sind in der Natur viel komplizierter als im Zink. Aber die Wirkung des Lichts geschieht auch in der Natur immer in Portionen.

Die Bräunung unserer Haut erinnert uns an den Zusammenhang zwischen Wellenlänge oder Frequenz und Quantenenergie: Nur hochfrequentes UV-Licht vermag die Haut zu bräunen. Zu guten Sonnenbrillen gibt der Optiker ein Messdiagramm, das zeigt, wie gut das Glas die UV-Strahlung «verwandelt». UV ist nicht nur verantwortlich für das Ausbleichen von Möbeln und Tüchern, das Verspröden von Kunststoff-Spielzeugen und Gartenfolien, sondern auch für viele Hautschäden.

Die Verwandlung von Licht in den Augen ermöglicht unser **Sehen**. Lichtquanten erzeugen in der Netzhaut (Retina), der lichtempfindlichen Schicht, die elektrischen Signale, die am Anfang der Bildverarbeitung im Nervensystem stehen. Drei verschiedene Zapfenarten reagieren auf verschiedene Quanten und ermöglichen Farbsehen. Nachtaktive Schlangen können energiearme IR-Quanten in elektrische Signale verwandeln. Der photochemische Prozess in den Silberbromid-Körnchen des Films war um 1900 die wichtigste technische «Verwandlung von Licht». Bald ergänzten Helligkeitsmessgeräte die Fotoapparate. Einstein erlebte die Verdrängung des Films durch die Mega-Pixel-Kameras nicht mehr.



Dass riesige **Photovoltaik-Anlagen** einen wesentlichen Beitrag zur solaren Energieerzeugung liefern können, hätte ihn sicher gefreut.

Vielleicht freut es Sie zu wissen, dass Kunststoff-Zahnfüllungen mit dem Foto-Initiator Campher-Chinon funktionieren. Dieser härtet während der Behandlung aus durch die Bestrahlung mit energiereichen Quanten einer blauen LED: «Verwandlung von Licht» in der Zahnmedizin.



**EXPERIMENT:** Erzeugen und verwandeln Sie selbst Licht in LED-Experimenten. → Aktivitäten

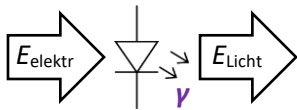
**1.3.4 Erzeugung und Verwandlung von Licht in der Atmosphäre**

Die Erdatmosphäre ist im Verhältnis zur Erde etwa gleich dick wie die Schale zum ganzen Apfel. Und doch ist sie zentral für unser Klima. Die sogenannten Treibhausgase (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O ...) und Wasserdampf in der Atmosphäre *verwandeln* Infrarotstrahlung, die von der Erde abgestrahlt wird, in innere Energie. Mit dieser Energie *erzeugen* sie anschliessend *IR-Strahlung*, die sie in irgendeine Richtung, auch zur Erde, wieder abgeben.



**1.3.5 Erzeugung und Verwandlung von Licht beschreiben und zeichnen**

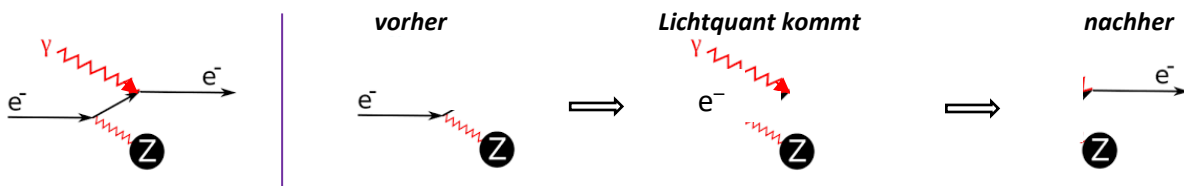
Energereiches Licht entsteht, wenn ein Nickelkern seine Überschussenergie\* als Gammastrahlungs-Quant abgibt. Weil Masse und Energie gleichwertig sind, schreibt man:  $^{60}\text{Ni}^* \rightarrow ^{60}\text{Ni} + \gamma$   
Wir werden alle Arten von **Lichtquanten** mit dem **Symbol  $\gamma$**  (Gamma) kennzeichnen.



Erzeugung und Verwandlung können als **Energieumwandlung** charakterisiert werden: Die Gleichung  $E = hf$  von links nach rechts gelesen passt zur LED, zum Glühwürmchen, zum Laser... Das Energiefluss-Schema mit dem Symbolbild der LED stellt das zeichnerisch dar.

Die umgekehrte Energieumwandlung geschieht in der Solarzelle, den AgBr-Körnchen des Films oder den Zapfen im Auge usw. Hier liest man die Gleichung  $hf = E$  heraus.

Den Photoeffekt zu **zeichnen ist heikel**, denn wir müssen Licht und Materie darstellen. Statt Licht und Atome als kleine Kügelchen zu zeichnen, bleiben wir **lieber abstrakt**. Vorbild ist die Chemie mit dem Strich «-» für die Elektronenpaarbindung H-H. In Figur 1.5 ist «die Verwandlung eines Lichtquants» links en bloc und rechts in 3 Schritten dargestellt. Wir zeichnen das Licht mit einer Wellenlinie plus ein  $\gamma$ . Wir zeichnen das Elektron mit einem Pfeil und einem  $e^-$ . Der Kreis mit Z symbolisiert den Atomrumpf mit Z Protonen; die feine Wellenlinie symbolisiert die Bindung, die aufgebrochen wird.



FIGUR 1.5: ZIEMLICH ABSTRAKTE ZEICHNUNG DES PHOTOEFFEKTS; LINKS «EN BLOC» UND RECHTS IN 3 ETAPPEN.

Das mit der Wellenlinie und dem  $\gamma$  gekennzeichnete Lichtquant wirkt auf das gebundene Elektron. Das Lichtquant überträgt seine Energie auf das  $e^-$  und existiert nicht mehr. Das energiereiche  $e^-$  geht weg.

**Self-Check:** Können Sie das umgekehrte Diagramm für den Elementarprozess in einer LED zeichnen?

**Reflexion:** Wo sehen Sie den Unterschied zwischen einem Beweis und einem Nachweis?

**AKTIVITÄTEN ZU 1.3**

AUFGABEN:

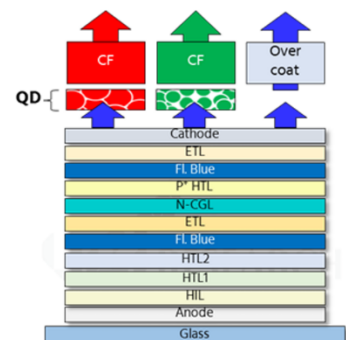
- 1.2) Fluoreszenz in der Natur
- 1.3) Halbe-Halbe-Lampe
- 1.4) Energiesparlampen
- 1.5) Abstrakte Darstellung des Experiments von Lenard
- 1.6) Quantenphysik in der Taschenlampe
- 1.7) Quantenphysik in der «Röhre»

EXPERIMENTE:

Die Experimente von Lenard und Millikan mit LEDs

BIOGRAPHIE:

Albert Einstein



AUFBAU EINES MODERNEN TV-BILDSCHIRMS

## 1.4 Auftritt der Welle-Teilchen-Dualität

### 1.4.1 Teilchen- und Wellenaspekt unverträglich nebeneinander

Derzeit ist die Quantentheorie im Wesentlichen eine Rechenregel, man darf wohl sagen eine Regel mit höchst wunderlichen, ja sogar grotesken Eigenschaften. Jedoch hat sie in den Händen von Planck und Einstein so reiche Frucht getragen, dass nun die wissenschaftliche Verpflichtung besteht, zu ihr Stellung zu nehmen und sie experimenteller Prüfung zu unterwerfen (...), meinte der Chemiker-Physiker Walther Nernst im Jahr 1910. Solche Prüfungen, nicht mehr bei Strahlung, sondern bei der Materie, erfolgten durch Albert Einstein am Diamanten und durch Niels Bohr am Wasserstoff-Atom (→ Modul 2).

Nernst gelang es, den Industriellen Ernest Solvay für die Sache der Quantenphysik zu interessieren. Dieser sponserte das Geld für die 1. Solvay-Konferenz 1911 im neutralen Brüssel. Sie war dem Thema **LA THÉORIE DU RAYONNEMENT ET LES QUANTA** gewidmet. Max Planck steht als zweiter von links nahe der Tafel mit seiner Formel. Auf dem «Gruppenbild mit Dame» ist Marie Curie, sitzend, die einzige Frau. Einstein, stehend, ist zweiter von rechts.



1. SOLVAY-KONFERENZ, BRÜSSEL 1911

Einstein ist der jüngste der 23 Herren, aber die Hauptperson. Er hält den Schlussvortrag und betont: *Ich bestehe auf dem provisorischen Charakter dieses Konzepts* [der anscheinend teilchenartigen Lichtquanten, HPD], *das mit den experimentell nachgewiesenen Konsequenzen der Wellentheorie nicht verträglich ist*. In der «grotesken» Phase der Quantenphysik stehen **Wellen- und Teilchenkonzept** des Lichts noch **unverträglich** nebeneinander. Aber man erkennt:

Links steht der **Teilchenaspekt E**

$$E = hf$$

rechts steht der **Wellenaspekt f**.

Bald beschäftigt sich Einstein erneut mit Strahlung und entdeckt, dass die Lichtquanten einen Impuls (= gerichtete Stosswirkung) mit sich tragen. Er fasst «Erzeugung und Verwandlung» zu «Elementarprozess» zusammen und schreibt an seinen Patentamt-Freund Michele Besso: *Es ist mir ein prächtiges Licht über die Absorption und Emission der Strahlung aufgegangen. In einem Elementarprozess (...) wird stets der Impuls  $hf/c$  auf das Molekül übertragen, und zwar bei Energieaufnahme in der Fortpflanzungsrichtung des Lichtbündels, bei der Energieabgabe in der entgegengesetzten Richtung.*

Einstein 1916: Bei einem Elementarprozess überträgt die Strahlung den Impuls  $p = hf/c = h/\lambda$  (1.3)

Die Stosswirkung des Lichts macht sich bei Röntgen- und Gammastrahlung gut bemerkbar. Trifft sie auf ein Elektron, verliert sie Energie und wird abgelenkt, wie Compton 1922 entdeckt hat. Die Auswertung seines Experiments bestätigt die teilchenartigen Energie- und Impulsportionen. Später entsteht der Begriff «Photon», der sich rasch verbreitet und das «Lichtquant» verdrängt.

Das Wort «Photon» verleitet zur Vorstellung, Licht sei ein Strom von gewöhnlichen Teilchen. Wenn das so wäre, wie entstünde dann der Wellenaspekt des Lichts, den die schillernden Seifenblasen zeigen? Einstein selber blieb vorsichtig und klagte am Lebensende seinem Freund Besso ernüchert: *Die ganzen fünfzig Jahre bewusster Grübeleien haben mich der Antwort der Frage ‚Was sind Lichtquanten?‘ nicht nähergebracht.*

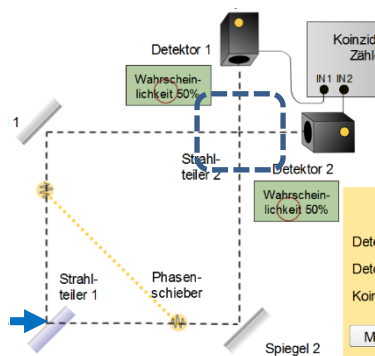


FIGUR 1.6: DIE «HALBE-HALBE-LAMPE» STELLT DIE WESENS-FRAGE.

Viele Physiker grübelten. Sie entwickelten zwischen 1925 und 1950 die Quanten-Elektrodynamik (QED), in der das Wellige und das Körnige des Lichts mathematisch verbunden sind. In ihr erhält das Photon eine durch den Zustand des elektromagnetischen Felds bestimmte Bedeutung. Folgerung:

Wir vermeiden möglichst den Begriff **Photonen** und sprechen vorsichtig von **Lichtquanten**.

Seit den 1960er Jahren erlebt die Physik durch die Erfindung des Lasers einen gewaltigen Aufschwung. Hat man 20'000 Franken, kann man mit Laserlicht und passenden Kristallen einzelne Photonen im Sinn der QED erzeugen, über weite Strecken schicken und manipulieren. Sie bilden die Grundlage für die Quantenkryptographie, den Quantencomputer und andere Dinge (→ MINT 1).



Hat man weniger Geld, muss man sich mit Simulationen zufriedengeben. Ein gutes Angebot ist QuVis (→ Aktivitäten: Simulationen). Im Einzelphotonen-Labor in Figur 1.7 kann man beobachten, wie ein Photon durch einen Strahlteiler läuft und als Ganzes im einen oder anderen Zähler ankommt. **Es gibt keine halben Photonen.**

Versucht man mit einem zweiten Strahlteiler auch den Wellenaspekt zu zeigen, verschwindet die 50:50 Verteilung. Auch im Realexperiment ist das so. Bei allen Versuchen, den Weg eines Photons zu beobachten, verschwindet sein Wellenaspekt und umgekehrt. Genaueres über das Mach-Zehnder-Interferometer bei WIKIPEDIA.

FIGUR 1.7: SIMULATION MIT EINZELNEN PHOTONEN ILLUSTRIEREN DEN TEILCHENASPEKT DES LICHTS

QuVis zeigt sehr eindrücklich die räumliche Ausdehnung des Photons. **Ein Photon ist** nicht nur ein «Lichtenergiekörnchen», sondern ebenso eine «wellige, elektromagnetische Wolke». Es ist **ein** ausgedehntes, eigentliches **«Quantensystem»**. Seine Grösse und weitere Eigenschaften hängen ganz von den «Produktionsbedingungen» und der Untersuchungsweise ab.

**Reflexion:** Im Brief an Michele Besso fährt Einstein weiter: «Heute glaubt zwar jeder Lump, er wisse es, aber er täuscht sich». – Was meint Einstein mit «es»? Täuschen auch Sie sich?

### 1.4.2 Die Doppelnatur des Lichts

Einsteins Einsichten gelten für kurzwellige und langwellige, hoch- und niederfrequente elektromagnetische Strahlung. Heute erzeugt und nutzt man alle elektromagnetischen Strahlenarten. Es ist bemerkenswert, welche Begriffe die Praktiker verwenden: Für die Strahlentherapeutin ist die Energie wesentlich. Sie spricht von den Energieportionen, den MeV-Gamma-**Quanten**, und nie von Femtometer-Wellen. Für den Elektroingenieur, der eine 5G-Antenne baut, sind nur Wellenlänge und Frequenz bedeutsam. Er spricht von Mikrowellen und nie von 2  $\mu\text{eV}$ -Quanten, die erzeugt werden. Die Physiker bringen beides zusammen und sprechen kurz von «Licht» statt umständlich von «elektromagnetischer Strahlung». Sie sprechen etwa von einer Synchrotron-**Lichtquelle**, in der Elektronen, von Magnetfeldern geführt, im Kreis herumlaufen und jedes Mal, wenn das Magnetfeld sie beschleunigt, **Röntgenlicht** abgeben, mit dem Materialforschung usw. möglich ist.

Die Tabelle in Figur 1.8 verbindet die Wellensicht und die Teilchensicht auf verschiedene Strahlungsarten. Hier wird deutlich, wie das «gewöhnliche» Licht im Schnittbereich beider Sprechweisen liegt.

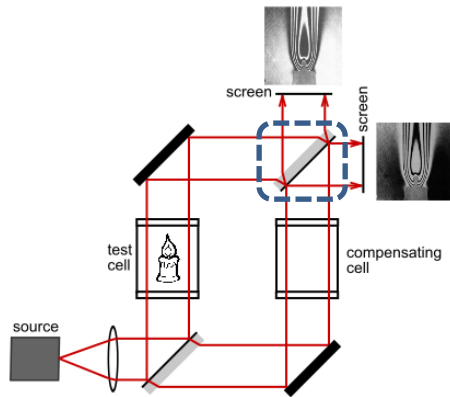
	WELLENASPEKT DOMINIERT			TEILCHENASPEKT DOMINIERT	
Strahlungsart/Quelle	Handy	IR/Radar	sichtbar. Licht	Röntgen	Gamma
Wellenlänge $\lambda$	500 mm	500 $\mu\text{m}$	500 nm	500 pm	500 fm
Grössenvergleich	Arm	Haar	Seifenhaut	Atom	Atomkern
Frequenz $f$	600 MHz	600 GHz	600 THz	600 PHz	600 EHz
Quanten-Energie $E$	2 $\mu\text{eV}$	2 meV	2 eV	2 keV	2 MeV

FIGUR 1.8: WELLE-TEILCHEN-DUALITÄT IM SPEKTRUM DER ELEKTROMAGNETISCHEN STRALUNG

### DREI BEISPIELE ZUR DOPPELNATUR

(1) Die Beschreibung der Verwandlung von sichtbarem Licht in der Photosynthese erfolgt meist mit dem Begriff «Teilchen». Allgemeiner: Schickt man elektromagnetische Strahlung auf einen zur Wellenlänge passenden Empfänger (grünes Blatt, Auge, Haut, Radioantenne, Fotoschicht, Röntgenplatte, Geiger-Müller-Zähler usw.), wird sie nach Einsteins Gleichung (1.2) verwandelt. Dabei gibt sie ihre Energie in Portionen als Lichtquanten ab. Sie kann nachgewiesen werden, etwas macht «klick», und die Strahlung verschwindet. Auch der Teilchenaspekt der Strahlung wird deutlich.

(2) Der Aufbau in der Simulation von Figur 1.7 ist ein Mach-Zehnder-Interferometer mit Fokus «Teilchen». Mit einer zweiten halbdurchlässigen Platte und Fotomaterial kann Interferenz gezeigt, also der Fokus auf den Aspekt «Welle» gelegt werden. In Figur 1.9 unterscheiden sich die zwei Lichtwege nur durch die optische Wirkung der Flamme. Beide Wege liefern je ein Interferenzbild dieser Erscheinung. Beachten Sie, dass sich die Bilder ergänzen: dort, wo das eine hell ist, ist das andere dunkel.



FIGUR 1.9: INTERFEROMETER MIT INTERFERENZ ALS «WELLENASPEKT»

(3) Astronominnen fangen z. B. mit Radioteleskopen verschiedene Strahlenarten auf. Diese können sie auf einen Doppelspalt geeigneter Grösse und/oder auf einen genügend schnellen Frequenzzähler leiten. Dann messen sie  $\lambda$  oder  $f$  und zeigen den **Wellenaspekt** der Strahlung. Sie können aber auch Einzelphotonendetektoren einbauen und registrieren dann den **Teilchenaspekt**.

Das in den Beispielen (1), (2) und (3) erläuterte merkwürdige, zweifache Verhalten von Licht führt zu den Formulierungen «zeigen» und «Aspekt»:

Elektromagnetische Strahlung (kurz: Licht) äussert ihre Doppelnatur in verschiedenen Experimenten. Das ganze elektromagnetische Spektrum **zeigt** sowohl **Wellenaspekt** als auch **Teilchenaspekt**.

Wir benützen bewusst den Begriff **Aspekt** (vom lateinischen *aspectus* = Anblick). Wir sagen «Licht **zeigt** Wellenaspekt», wenn wir ein Doppelspaltexperiment durchführen, oder «Licht **zeigt** Teilchenaspekt», wenn wir im Experiment Licht erzeugen oder verwandeln. Wir sagen **nicht** mehr, «Licht **ist** ...».

Der Fachausdruck für «Doppelnatur» ist **Dualität** (vom lateinischen *duo* = zwei). Das Konzept findet man beim doppelköpfigen Gott Janus oder der hell-dunkel-Dualität. In diesen Fällen geht es um eine entweder-oder-Dualität. Die quantenphysikalische Dualität aber ist etwas Anderes, nämlich eine **sowohl-als-auch-Dualität**.

**Die quantenphysikalische Dualität** ermöglicht uns, mit den alltäglichen Wörtern «Teilchen» und «Welle» über das Verhalten des Quantenobjekts «Licht» **zu sprechen**.

### 1.4.3 Lange zweifelten die Physiker an der Existenz des Lichtquants

Das Foto mit den drei älteren Herren beim Tee fasst ein Stück Wissenschaftsgeschichte zusammen: Albert Einstein scheint selbstzufrieden, denn er hat Recht behalten. Schon 1905 hat er an die Quantisierung der Licht-Energie geglaubt und den «heuristischen Gesichtspunkt» zur Erklärung des Photoeffekts herangezogen. Später untersuchte er Plancks Strahlungsgesetz und stiess auf das Konzept der Dualität. Licht zeigt eine Doppelnatur.

Max Planck, der überzeugt war, Einstein habe mit den Lichtquanten «übers Ziel hinausgeschossen», blickt noch 1928 skeptisch in die Welt. Er hätte lieber eine Welt ohne Quanten.

Die Rolle des Amerikaners Robert Andrew Millikan, der anscheinend Planck zu überzeugen versucht, ist besonders bemerkenswert. Millikan hatte mit seinen Öltröpfchen-Experimenten die Quantisierung der elektrischen Ladung gezeigt und man würde meinen, er hätte die Lichtquantenhypothese unterstützt. Effektiv publizierte er 1916 die Ergebnisse seiner langen Serie von sorgfältigen Messungen des Photoeffekts bei verschiedenen Metallen (→ 1.4.4) mit der Schlussfolgerung: *Yet the semi-corpuscular theory by which Einstein arrived at his equation seems at present to be wholly untenable.*

Erst einige Jahre später brachte das Experiment des Amerikaners Arthur Holy Compton (→ 1.4.5) die Physik-Welt zum Umdenken. Seine Analyse der Wechselwirkung eines Lichtquants mit einem Elektron unter Benützung der Energie-Portion  $hf$  und der Impuls-Portion  $hf/c$  des Lichts überzeugte nun die Skeptiker vom Teilchenaspekt des Lichts.

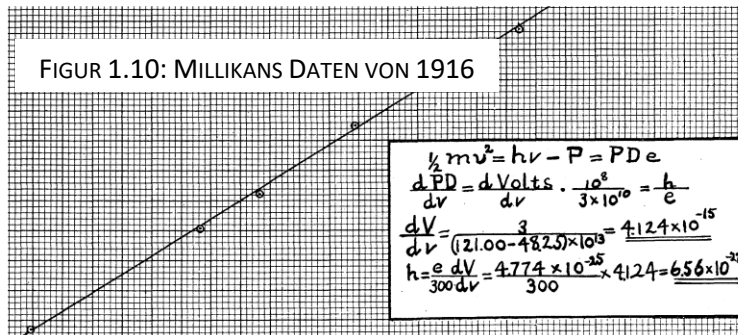




**1.4.4 Wechselwirkung von Strahlung und Materie: Millikans Experimente**

(Ergänzung)

Während sich Millikan in seiner Schlussfolgerung ( $\rightarrow$  1.4.3) irrte, waren seine Messdaten überzeugend. Er ging vom Grundprinzip aus, das schon lange bekannt war ( $\rightarrow$  1.3.1). Er setzte jedoch die ganze Apparatur in ein Vakuum, damit die Umgebung nicht ständig die Oberflächen seiner Li-, Na- und K-Proben verschmutzte – alles hochentzündliche Alkalimetalle. Er beobachtete nicht bloss ob Elektronen austraten, sondern mass deren Geschwindigkeit mit der sogenannten Gegenfeldmethode: Er liess sie



gegen eine Spannung  $U$  anlaufen, so dass  $E_{\text{elektr.}} = qU = E_{\text{kinet.}} = \frac{1}{2}mv^2$  gemessen werden konnte. Im Originaldokument ist gegen unten  $U$  in Volt aufgetragen. Gegen rechts ist die Frequenz der fünf benutzten Lichtsorten in der Einheit  $20 \cdot 10^{13}$  Hz aufgetragen. Die Auswertung zeigt den Ansatz: Bewegungsenergie  $\frac{1}{2}mv^2 =$  Lichtquantenenergie  $hf -$  Austrittsarbeit  $P$ .

Die Frequenz heisst hier  $\nu$  anstatt  $f$ .  $P$  ist die Energie, die ein Elektron benötigt, um gegen die anziehende Kraft der Protonen im Metallinnern auszutreten, die vom Material abhängt. Millikan findet sehr genau den Wert von  $h$ , allerdings in altmodischen Einheiten, daher die Potenz  $10^{-27}$ .

Millikan bestätigt Einsteins Beziehung für den Photoeffekt:  $hf = \text{Austrittsarbeit} + \frac{1}{2}mv^2$  (1.4)

**1.4.5 Wechselwirkung von Strahlung und Materie: Das Compton Experiment**

(Ergänzung)

A. H. Compton beschoss Paraffin mit Röntgenstrahlung, deren Energie viel grösser ist als die Bindungsenergie der Elektronen. Nach diesem sogenannten Streuprozess besitzt die Röntgenstrahlung weniger



Energie, also eine grössere Wellenlänge. Compton berechnete die Wellenlängenzunahme der durch ein freies Elektron abgelenkten Röntgenstrahlung. Er stützte sich dabei auf Energie- und Impulssatz, arbeitete also mit dem Teilchenaspekt beim Elektron und beim Licht.

Bei Comptons Experiment ( $\rightarrow$  Figur 1.11) kommt das Röntgen-Lichtquant von links und trifft auf ein an ein H-Atom gebundenes Elektron, das hier als Wolke dargestellt wird. Es kann praktisch als ruhend angenommen werden und erhält durch das Lichtquant einen Impuls  $-\vec{p}_e$  und eine gewisse Energie. Dabei übergibt es nach dem Wechselwirkungsprinzip dem Lichtquant den entgegengesetzten Impuls  $+\vec{p}_e$  und lenkt dieses damit aus  $\vec{p}_\gamma$  in eine neue Richtung  $\vec{p}'_\gamma$ .

Die mathematische Darstellung der Impulserhaltung geschieht mit dem Kosinussatz. Die mathematische Erfassung der Energie muss relativistisch erfolgen, denn das Lichtquant bewegt sich mit  $c$ . Die Energie des Elektrons vor dem Prozess ist nicht  $= 0$ , sondern  $E_e = mc^2$ . Nach dem Stoss ist sie nicht  $\frac{1}{2}mv^2$ , sondern es gilt relativistisch  $E_e'^2 = m^2c^4 + p'^2c^2$ .

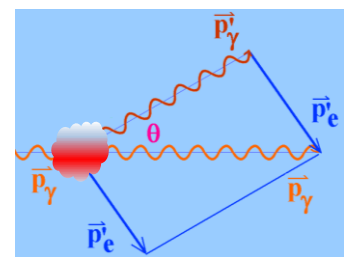
In der länglichen Rechnung sind im Weiteren zu berücksichtigen:

$$E_\gamma = p_\gamma c \text{ und } E_\gamma' = p_\gamma' c \text{ sowie } p_\gamma = hc/\lambda \text{ und } p_\gamma' = hc/\lambda'$$

Kombiniert man diese vielen Beziehungen in geschickter Weise, resultiert Comptons Gesetz:

$$\text{Compton 1923: Wellenlängenzunahme bei Streuung am Objekt mit } m: \Delta\lambda = \frac{h}{mc} \cdot [1 - \cos(\vartheta)] \quad (1.5)$$

$$\frac{h}{mc} = 386 \text{ fm} = \text{Compton-Wellenlänge des Elektrons}$$



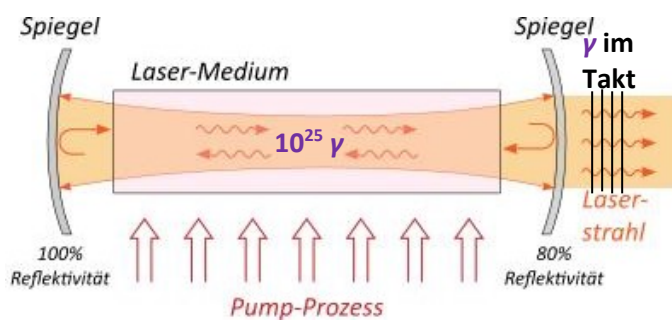
FIGUR 1.11:  
IMPULSERHALTUNG BEIM  
COMPTON-EFFEKT

Der Compton-Effekt spielt eine zentrale Rolle bei der biologischen Wirkung von Gamma- und Röntgenstrahlung. Er lässt sich hingegen mit sichtbarem Licht und solchem von noch grösserer Wellenlänge schlecht nachweisen, denn die Compton-Wellenlänge hat beim Elektron einen festen, winzigen Wert. Übrigens hat Nobelpreisträger Niels Bohr praktisch gleichzeitig noch an der Gültigkeit der Energieerhaltung in der Quantenphysik gezweifelt!

### 1.4.6 Dualität beim Laser

(Ergänzung)

Laser ist ein Kunstwort: **LASER** = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Das Laser-Prinzip wird in Figur 1.12 deutlich: In einem



FIGUR 1.12: PRINZIP DES LASERS.  
ERZEUGUNG VON KOHÄRENTEM LICHT.

gasförmigen (z. B. CO<sub>2</sub> für IR) oder festen (z. B. Rubidium für rot) Laser-Medium gibt es Atome, die durch einen Pump-Prozess in einen angeregten Zustand gebracht worden sind: «Verwandlung von Licht». Etwas später geben erste Atome ihren Energieüberschuss gemäß  $\Delta E = hf$  wieder ab: «Erzeugung von Licht». Diese «Wiederausendung» von Licht erfolgt **spontan** in Form einer riesigen Anzahl **Lichtquanten  $\gamma$** . Eine typische Anzahl ist  $10^{25}$  Lichtquanten.

Ein Teil des Lichts hat eine passende Richtung und pendelt konstruktiv zwischen den zwei Spiegeln hin und her. Ihr Abstand ist auf die Wellenlänge des Lichts abgestimmt. Die anfänglich wenigen hin- und herpendelnden Lichtquanten regen die vielen Atome an, ihre Überschussenergie ebenfalls abzustrahlen: **stimulierte** Emission (angeregte Aussendung). 1954 konnte erstmals diese Verstärkung nachgewiesen werden, und zwar mit Mikrowellen: MASER = Mikrowellen-Laser (vgl. Figur 1.1). 1960 gelang es, Lichtverstärkung in einem Rubinkristall und bald auch in einem He-Ne-Gasgemisch zu erzeugen. Nach 1980 gelang es, winzige Diodenlaser herzustellen, die IR-Licht für DVD-Geräte und Glasfaserkabel-Übertragung lieferten.

Einer der beiden Laser-Spiegel reflektiert weniger als 100%. Dort tritt ein Teil des Lichts als Laserstrahl mit vielen Quanten  $\gamma$  aus. Sie zeigen auch Wellenaspekt: Alle ihre Wellenberge und Wellentäler sind im Takt. Solches Licht ist **kohärent** (vom lateinischen *cohaere* = zusammenhängen). Es kann u. A. in Hologrammen viel Information speichern. Nebenan wird durch Holographie ein Riesenelefant in eine Zirkusarena gezaubert.



Bemerkenswert ist, dass das beim Treibhauseffekt wesentliche CO<sub>2</sub>-Molekül auch zum Lasern dienen kann. In CO<sub>2</sub>-Lasern bildet es in einer Mischung mit N<sub>2</sub> und He das Laser-Medium von Figur 1.12. Der Pump-Prozess besteht im Wesentlichen darin, dass das N<sub>2</sub> elektrisch angeregt wird und bei Zusammenstößen mit dem CO<sub>2</sub> diesem eine Portion Energie gibt. Das CO<sub>2</sub> schwingt dann, ebenso wie in der



Atmosphäre, und kann durch vorbeifliegende IR-Lichtquanten von rund 10  $\mu\text{m}$  Wellenlänge zur stimulierten Emission angeregt werden. Wenn der CO<sub>2</sub>-Laser zur Blechbearbeitung eingesetzt wird, beträgt seine Lichtleistung bis 10 kW. Die IR-Strahlung ist unsichtbar; man sieht nur das wegspritzende, verflüssigte Eisen. Wenn ein CO<sub>2</sub>-Laser in der Hand der Chirurgin organisches Material trennt, beispielsweise ein Lippenband, dann genügt eine Leistung von 10 W.

Einstein hat die absolut zufallsgesteuerte spontane Emission schon 1916 neben der stimulierten Emission 1916 vorhergesagt, als er über das Strahlungsgleichgewicht des schwarzen Körpers forschte. An technische Anwendungen der spontanen Emission dachte er nicht. Hingegen bereitete ihm das Zufällige, das in der Quantenphysik zentral ist, bereits Sorgen. 1924 schrieb er seinem Freund Max Born:

*Der Gedanke, dass ein einem Strahl ausgesetztes Elektron [zum Beispiel in einem Atom des Lasermediums] aus freiem Entschluss den Augenblick und die Richtung wählt, in der es fortspringen will, ist mir unerträglich. Wenn schon, dann möchte ich lieber Schuster oder gar Angestellter einer Spielbank sein als Physiker.*

### 1.4.7 «Achtung Gefahr» bei der Verwendung des Begriffs «Modell»!



Das Wort «Modell» hat für uns seit der Kindheit die Bedeutung einer verkleinerten und deshalb vereinfachten Anschauungsmöglichkeit der Realität. In der Physik ist die Bedeutung des Begriffs vielschichtiger. Wir sprechen vom Teilchenmodell der Atome und denken uns harte Kügelchen, deren Aufprall einen Ballon aufbläst. Wir sprechen vom Elektronengas, dem Modell mit frei beweglichen Elektronen im Kupferdraht. Die Modelle, mit denen die Klimaforschung die Auswirkungen des antropogenen Treibhauseffekts voraus berechnet, sind politisch umstritten. Wissenschaftlich sind keine absolut sicheren Angaben möglich, weil in diesen Modellen immer Vereinfachungen zu Meeresströmungen usw. gemacht werden müssen.



In der Quantenphysik dürfen wir nicht sagen, bei der Entstehung sei Licht ein «richtiges Teilchen» entsprechend einem Teilchenmodell, aber beim Durchqueren des Doppelspalts, sei Licht eine «normale Welle» gemäss einem Wellenmodell. Ein solches Umgehen mit dem Modellbegriff wäre opportunistisch (lateinisch *opportunus* = günstig, momentan geeignet). Der folgende Satz widerspiegelt die vorsichtige Verwendung des Begriffs «Modell» in der Physik:

Ein **Modell** ist eine bewusst vereinfachte, konzeptionell-mathematische Sicht auf ein System.



Klimamodelle sind gute Beispiele für die korrekte Verwendung des Modellbegriffs. In der Schule vernachlässigt das Strahlenmodell des Lichts bewusst den Wellenaspekt des Lichts. Es beschreibt aber Spiegelung und Brechung richtig. In Dimensionen, die viel grösser als die Lichtwellenlänge sind, führt es zu korrekten Folgerungen. Doch erst das Wellenmodell kann auch die Farben an Seifenblasen und andere Interferenzerscheinungen erklären. Es versagt seinerseits beim Photoeffekt. Erst die Quantenelektrodynamik liefert für das Licht ein beide Fälle korrekt beschreibendes Modell.

Wir sprechen in der Quantenphysik vom Wellen-/Teilchen**aspekt**, nicht vom Wellen-/Teilchen**modell**.

**Reflexion:** Suchen Sie sich drei Beispiele, die Ihnen spontan zum Wort «Modell» einfallen. Welche Gefahr besteht, wenn man in der Physik mit Modellen spielerisch umgeht und das bewusst Weggelassene vergisst?

**Reflexion:** Was sagen Sie zur folgenden Behauptung, die Heinrich Hertz 1889 aufgestellt hat: «An diesen Dingen [Erklärungen des Verhaltens der elektromagnetischen Strahlung, HPD] ist ein Zweifel nicht mehr möglich, eine Widerlegung dieser Anschauung ist für den Physiker undenkbar. Die Wellentheorie des Lichtes ist, menschlich gesprochen, Gewissheit».

## AKTIVITÄTEN ZU 1.4

### AUFGABEN:

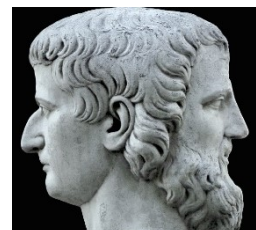
- 1.1) Kontrollfragen zu Modul 1
- 1.8) Einsteins Heuristik – Dualität – Janusköpfigkeit
- 1.9) Darstellung von Licht in Biologiebüchern
- 1.10) Quantenphysik und unsere Haut
- 1.11) Infrarot in der Natur
- 1.12) Quanten aus dem 5 mW-Laser-Pointer von 532 nm
- 1.13) Der Mikrowellenofen: Quantenphysik in der Küche.
- 1.14) Grundlagenforschung versus Angewandter Forschung

### EXPERIMENTE:

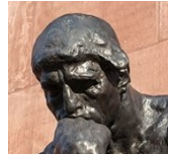
Laser

### BIOGRAPHIE:

Donna Strickland



### 1.5 Was ist Licht? – Ein Quantenobjekt!



Das Doppelleben des Lichts irritiert, scheint unlogisch zu sein. Wir lieben **entweder-oder**-Entscheidungen. Es wäre uns angenehmer, wenn sich das Licht entweder wellig oder körnig verhielte. Unsere Anschauung meint, dass nichts zugleich wie eine Welle **und** ein Teilchen wirken könne. Doch genau das ist der Fall. Früh sagte Einstein voraus: *Deshalb ist es meine Meinung, dass die nächste Phase der Entwicklung der theoretischen Physik uns eine Theorie des Lichtes bringen wird, welche sich als eine Art **Verschmelzung** von Undulations- [Wellen-] und Emissionstheorie [Teilchen-] des Lichtes auffassen lässt.* Mit der QED ist das gelungen. Wir müssen akzeptieren, dass es in der Natur das **Sowohl-als-auch** gibt. Wir benützen für Objekte mit dieser «Doppelnatur», Objekte mit Welle-Teilchen-Dualität, die ein Sowohl-als-auch-Verhalten an den Tag legen, den Begriff «Quantenobjekt»:

**Ein Quantenobjekt zeigt – je nach Experiment – sowohl Wellen- als auch Teilchenaspekt.**

Quantenobjekte sind etwas Neuartiges. In ihrem Verhalten äussert sich das Wirkungsquantum  $h$ .

Wir kennen bis jetzt nur ein Quantenobjekt, das Licht. Die Antwort auf die Frage im Titel lautet also:

**LICHT (... Mikrowellen, IR, sichtbares Licht, UV, Röntgen ...) IST EIN QUANTENOBJEKT.**

Der neue Begriff hilft, aber er löst nicht alle Probleme. Quantenphysik ist für alle Einsteiger kontraintuitiv. Das ist so, weil unsere Intuition eine psychologische Struktur ist, die sich unter den Eindrücken unserer Sinnesorgane ausbildet. Da uns der direkte, sinnliche Zugang zu welligen und zugleich körnigen Dingen fehlt, finden wir Quantenobjekte fremdartig und unanschaulich. Zeichnen wir ein Lichtquant am Doppelspalt, wirkt es **paradox**. – Im Modul 2 wird sich zeigen, dass auch Elektronen, Atome, Moleküle usw. Quantenobjekte sind. Allerdings sind sie Quantenobjekte mit Ruhemasse. Deshalb bewegen sie sich immer langsamer als das Licht.



Richard Feynman hat für seinen Beitrag zur QED in den 60er Jahren den Nobelpreis erhalten. Von diesem vielseitig interessierten Menschen, der auch die Ursache für die CHALLENGER-Katastrophe gefunden hat, sind pointierte Aussagen überliefert. Zum Beispiel: *I think I can safely say nobody understands quantum mechanics. (!?)*



Dieser Satz könnte alle Lernenden entmutigen. «Dick» Feynman, ein begeisterter Hochschullehrer, wollte das bestimmt nicht. Er sah mindestens zwei Punkte:

- (1) Die Quantenphysik ist immer noch am Entstehen. Sogar heute, im 21. Jahrhundert, lässt sich noch keine zufriedenstellende Verbindung herstellen zwischen der Quantenphysik und der Gravitation, die das Universum regiert.
- (2) Das Sowohl-als-auch der Quantenphysik irritiert die Intuition jedes Menschen.

Quantenobjekte bleiben uns fremd, wirken zwielichtig, paradox. Feynman löst dieses Paradoxon auf:

***The 'paradox' is only a conflict between reality and our feeling of what reality 'ought to be'.***

Quantenobjekte wirken auf uns paradox, aber sie selbst sind es nicht.

Unsere Sinne ermöglichen uns keinen direkten Zugang zum Licht oder zur Welt der Atome. Deshalb setzen wir «Achtung»-Signale in Bilder, die uns etwas vortäuschen.

**DAS VERHALTEN DER QUANTENOBJEKTE ERLAUBT KEINE ANSCHAULICHE BESCHREIBUNG.**

Wir können uns aber zunehmend mit dem unanschaulichen Sowohl-als-auch der Natur vertraut machen. Die Halbe-Halbe-Lampe erscheint dann immer weniger paradox. Feynman drückt das Verhältnis zwischen unserer beschränkten Anschauung, unserem beschränkten Vorstellungsvermögen, einerseits und den reichen Gestaltungsmöglichkeiten der Natur – inklusive dem Sowohl-als-auch – andererseits respektvoll auf diese Weise aus:

*I think nature's imagination is so much greater than man's, she's never going to let us relax.*

## WAS IST LICHT? – BILANZ DES MODULS 1

### Wellenaspekt des Lichts = korrekter, aber unvollständiger Kenntnisstand von 1900:

Licht zeigt sich als elektromagnetische Strahlung, «wellig-wolkig», mit Wellenlänge  $\lambda$  und Frequenz  $f$ , die sich im Raum mit  $c = \lambda f$  ausbreitet und Energie transportiert.

#### LEITIDEE 1.1: «Licht» ist ein Sammelbegriff für das Spektrum von Radio- bis Gammastrahlung.

Elektromagnetische Strahlung reicht vom langwelligen Radiobereich über das sichtbare Licht mit Wellenlängen um 500 nm bis zur kurzwelligen, durchdringenden  $\gamma$ -Strahlung.

### Teilchenaspekt des Lichts = wesentliche Ergänzung durch Einstein und andere ab 1905:

Erzeugung und Verwandlung von Licht erscheinen besser verständlich mit der Annahme, Energie und Impuls von Licht seien in Lichtquanten portioniert.

#### LEITIDEE 1.2: «Licht zeigt sich wellig und körnig.» Licht ist ein QUANTENOBJEKT.

Quantenobjekte zeigen sowohl Teilchen- als auch Wellenaspekt – je nach Experiment.

Quantenobjekte zeigen eine **Welle-Teilchen-Dualität**. Sie sind etwas Neuartiges.

Der Quantenaspekt des Lichts kommt in der **Natur** (Auge, grünes Blatt, Glühwürmchen ...) und in der **Technik** (Röntgen, Smartphone, Photovoltaik ...) zum Vorschein.

#### Einsteins Gleichungen verbinden Teilchen- und Wellenaspekt des Lichts:

Energie des Lichtquants:  $E = hf$ .

Impuls des Lichtquants:  $p = h/\lambda$ .

#### LEITIDEE 1.3: «Licht ist nicht anschaulich.»

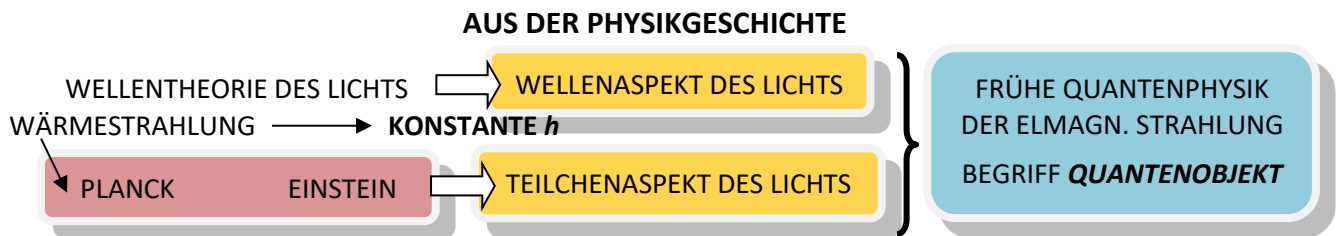
Wenn man ein **Quantenobjekt darstellt**, erscheint es **paradox**.

«The 'paradox' is only the conflict between reality and our feeling of what reality 'ought to be'.»

### Quantenphysik ist der Teil der Physik, in dem Plancks Wirkungsquantum $h$ eine Rolle spielt.

Das Wirkungsquantum ist winzig klein,  $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$  Js. Wäre es = 0 Js, gäbe es keine Quantenphysik.

Das Wirkungsquantum spielt nicht nur beim Licht, sondern auch bei der Materie eine Rolle.



Die Quanten tauchen um 1900 beim Licht auf.

## ERKENNTNISSE ZUM WESEN DER PHYSIK

① Physik ist nicht einfach da, sondern wird durch **Menschen** auf oft verschlungenen Wegen erarbeitet. Die Erkenntniswege können sich über Jahrzehnte erstrecken und Irrtümer einschliessen.

② **Modelle** sind bewusste Vereinfachungen. Man darf sie nicht vermischen oder ad hoc nutzen.

③ Zwischen **Physik und Technik** bestehen **wechselseitige Beziehungen**. Experimente setzen technische Geräte voraus. Diese gehorchen den Gesetzen der Physik.

Manchmal erfinden kreative Tüftler etwas, ohne dass die wissenschaftliche Physik dahinter klar ist.

Technik und Physik sind **nicht das Gleiche**:

- Technik will Probleme lösen, z. B. genauere Uhren, Maßstäbe und Waagen bauen.

- Physik will Naturgesetze finden, die zum Beispiel auch in der Klimathematik gültig sind.