



UZH - Weiterbildung für Lehrpersonen an Maturitätsschulen

Elemente der Quantenphysik an Maturitätsschulen

Unterrichtsvorschläge und ein Seitenblick auf die Klimaphysik

Modul 1: «Was ist Licht?» ***Einstieg in die Quantenphysik***



Hans Peter Dreyer



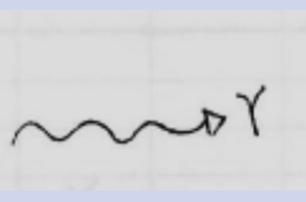


Wie denken die Lernenden über das Licht?

Mit dem Strahl-Welle-Dualismus scheint eine doppelgleisige Denkweise angelegt (Lichtfeldt, 1992).

Students have a range of different visualizations of photons (Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017).

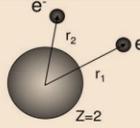
Fünf Zeichnungen von Gymnasiastinnen und Gymnasiasten, nach Abstraktion angeordnet:

1 Konkret	2 Welle	3 Teilchen	4 Welle plus Teilchen	5 abstraktes Objekt
				

*Students showed **less difficulty** assigning both wave and particle behaviour **to light than to electrons.***
(Krijtenburg-Lewerissa et al., 2017).

→ **Quantenphysik im Gymnasium mit Licht beginnen.**

Helium

$$\Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, t)$$


$$H = -\frac{\hbar^2}{2m_1} \nabla_1^2 - \frac{\hbar^2}{2m_2} \nabla_2^2 + V(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$$

Hintergrund der Welle-Teilchen-Dualität des Lichts

Physik, nicht Didaktik: Einstein entdeckt zwei Summanden



In der verschollenen Habilitationsarbeit für die Uni Bern 1907
«Folgerungen die Konstitution der Strahlung betreffend»
untersucht Einstein Schwankungen der Energiedichte.



Als frischer Assistenzprofessor an der Uni Zürich erhält er,
ausgehend von Plancks Gesetz, für Strahlungsdruckschwankungen Δp auf einen nur f reflektierenden Spiegel,
zwei Summanden. Wegen $\text{Nm/m}^2\text{m} = [\Delta p]$ sind das auch Energiedichteschwankungen ΔE .

Einstein, 1909, Vortrag an der Naturforschertagung in Salzburg:

ΔE = wellenartig-klassischer Summand (Wien) + teilchenartig-quantenphysikalischer Summand (Rayleigh-Jeans)
qualitative **Zusammenfassung**: ...wie *zwei* voneinander unabhängige Ursachen...

Vorsichtig ausgedrückte **Folgerung**: **“Wellen und Teilchen sind nicht miteinander unverträglich.”**

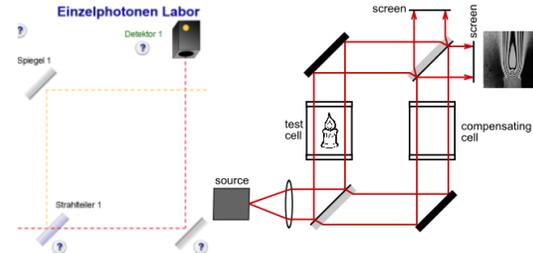
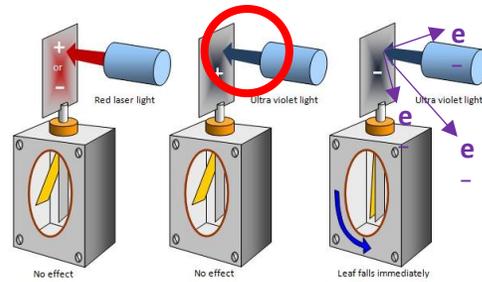
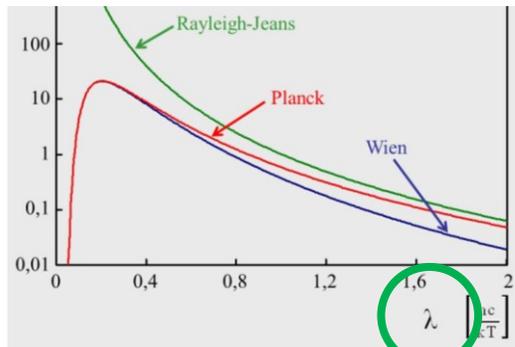
Das **überzeugt** die Fachkollegen (vor dem Compton-Effekt) **nicht** von den Lichtquanten:

Planck 1913: «*Einstein mag mit seiner Lichtquantenhypothese übers Ziel hinausgeschossen haben...*»

Aus der Geschichte der Quantenphysik der elektromagn. Strahlung

1900	Planck	Strahlungsgesetz mit Wirkungsquantum = neue Naturkonstante h
1905	Einstein	Licht kann mit Energiequanten verstanden werden $E = hf$
1909	Einstein	<i>... nicht unvereinbar ...</i>
1916	Einstein	Lichtquanten besitzen einen Impuls $p = h/\lambda$
1920	H. Sponer	<i>Über ultrarote Absorption zweiatomiger Gase</i>
1921	Einstein	Nobelpreis <i>especially for his discovery of the law of the photoelectric effect</i>
1923	Compton	Stoss von Röntgenstrahlung bestätigt Lichtquant
1924	Bose & Einstein	Quantenstatistik für «Quantengas» und Bosonen allgemein
1950	Feynman u. a.	Quantenelektrodynamik
1954	Pearson u. a.	Halbleiter-Solarzelle
1958	Maiman u. a.	Laser
1982	Aspect u. a.	EPR-Bell-Test mit Photonen
1997	Zeilinger u. a.	Quanten-Teleportation ...

Lernziel Physik: *Angestrebter Konzeptwechsel beim Licht*



Nicht mehr: **entweder Welle oder Teilchen**, sondern **sowohl wellenartig als auch teilchenartig**, also unanschaulich.

Das Lichtquant ist der Prototyp für ein **Quantenobjekt**. Es zeigt **Welle-Teilchen-Dualität**.

2 Sprechweisen:

«Licht zeigt sich sowohl wellig als auch körnig.»

«Quantenobjekte zeigen Aspekte.»

2 Beziehungen:

$$E = hf$$

$$p = h/\lambda$$

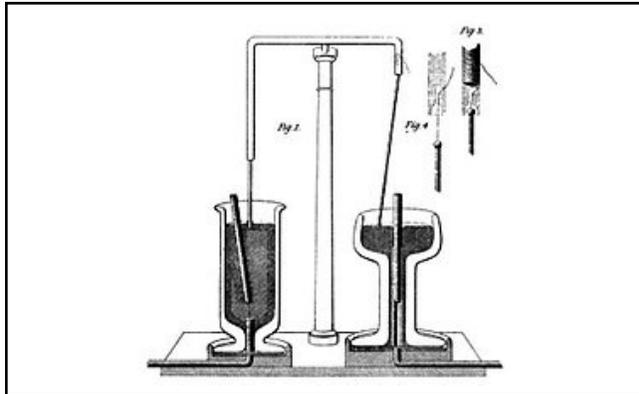
Lernziel NoS: *Angestrebte Konzeptentwicklung*

Technik setzt Wissenschaft voraus



Wechselwirkung zwischen Wissenschaft & Technik

Faraday vor Siemens



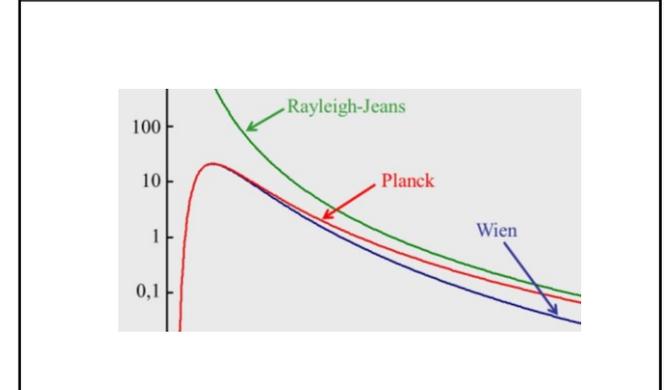
reale Entwicklung
↔
Physik und Technik
sind **verknüpft**

Mittelschulphysik
leider oft schematisch:
↔
zuerst Physik, dann
techn. Anwendungen

aber: Edison vor Planck



Technik vor Physik



LERNWEG

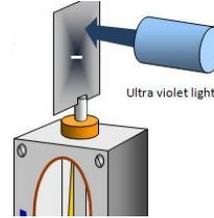
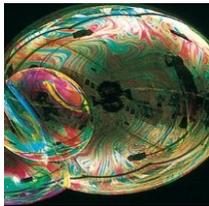


Was ist Licht?

wellenartig

h

auch teilchenartig



Einstein, 1905:

erklärt Erscheinungsgruppe "Erzeugung und Verwandlung von Licht" mit etwas Neuartigem: **Lichtquant**

⇔ *heuristischer Gesichtspunkt*

$$E = hf = hc/\lambda$$

$E \Rightarrow$ **Teilchenaspekt**

$f \ \& \ \lambda \Rightarrow$ **Wellenaspekt**

Lernende akzeptieren heute den Teilchenaspekt zusätzlich zum Wellenaspekt leicht.

Leicht und gerne verdrängen sie den Wellenaspekt ⇔ Das Lokalisierte ist einfacher als das Feldartige! → **Photon**

Physik-Community lehnte bis 1923 (Compton) ab: Solvay Konferenz 1911 & Planck et al. 1912 & Millikan 1915 & Bohr 1920

LERNWEG

Konzeptwechsel: Es gibt in der Natur unanschauliches Verhalten.



Was ist Licht?

wellenartig

h

auch teilchenartig

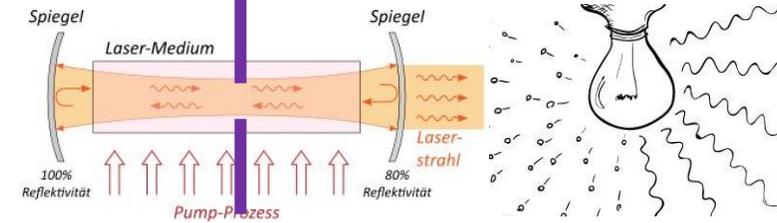
nicht unvereinbar

'paradox' our feeling

QED

Compton

Q. Optik



Welle-Teilchen-Dualität:

Wellenaspekt und Teilchenaspekt sind **'nicht miteinander unvereinbar'**.

Für Lehrpersonen: Aus Strahlungsgesetz & Entropiekonzept ergeben sich Energiedichteschwankungen: $\langle (\Delta E)^2 \rangle = \text{const.} \cdot E^2 + hf \cdot E$
Energiedichteschwankung = wellenartiger, klassischer Anteil + teilchenartiger, quantenphysikalischer Anteil

Den Lernenden hilft Feynmans Aussage (1965): *The 'paradox' is only a conflict between reality and our feeling of what reality 'ought to be'.*

«Licht ist etwa Neuartiges, ein Quantenobjekt mit Wellen- und Teilchenaspekt.»

Wo stehen wir jetzt?

Einführung



Modul 1

Was ist Licht?

Lernende

Licht vor Elektron

Physik

Welle-Teilchen-Dualität

Lernziele

Angestrebte Konzeptänderungen in Physik und NoS

Lernweg 'Licht'

Anknüpfen ... bis ... Auflösung des Welle-Teilchen-Paradoxons

Details

Ausschnitte aus dem Lerntext

Bilanz

QUANTEN/LICHT

Modul 2

Wo ist das Elektron?

Verknüpfung

Klima & Quanten

Ergänzung

Quantenphysik im Schulalltag

Ausblick

Mehr Quanten

Modul 1: «Was ist Licht?»

Anknüpfen – Erweitern des Begriffs «Licht»

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

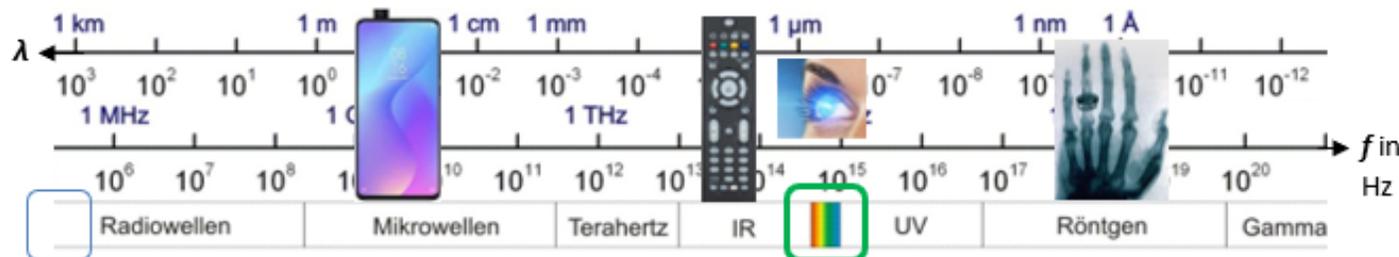
Um 1900, noch steckte man im Zeitalter der Kaiser, Zaren und Sultane, wusste man bereits viel über das Licht, das heute noch stimmt, aber nicht die ganze Wahrheit ist:

(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)

(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.



Positive Emotionen wecken.

An Bekanntem anknüpfen.

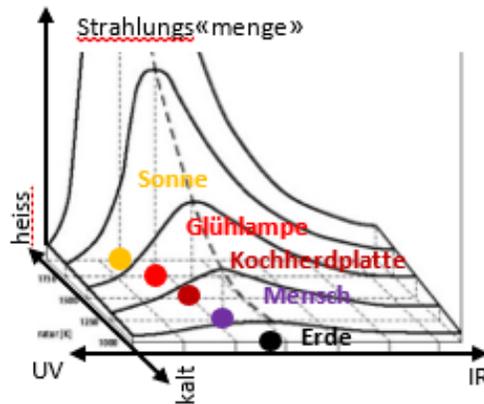
Ausweiten des Begriffs «Licht» von «sichtbarem Licht» auf das gesamte Spektrum.

Zusätzlich zur Wellenlänge wird die unanschauliche und wenig vertraute Frequenz f mit Alltäglichem ins Spiel gebracht.

Modul 1: «Was ist Licht?»

Eine neue Naturkonstante, Plancks h , taucht auf.

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



FIGUR 1.3a: STRAHLUNGSGESETZ

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.

Plancks Strahlungsgesetz ist eine Knacknuss. Es wird hier nur graphisch gezeigt.

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!



kontinuierlich = keine Energienstufen



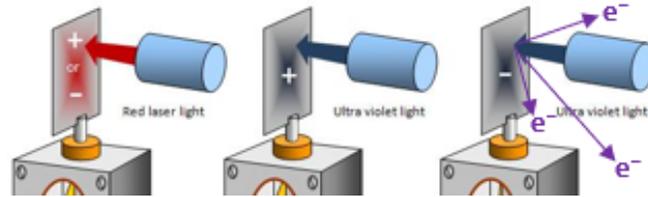
Die (Nicht-)Quantisierung der Energie wird an Beispielen aus dem Alltag erläutert.

Modul 1: «Was ist Licht?»

Das Licht ist auch körnig. – Das Lichtquant taucht auf.

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 Schulexperiment das Prinzip: Leuchtet man mit UV auf die Zn-Platte des negativ geladenen Elektroskops, entlädt es



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,

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.*

Anknüpfen am historisch nicht wichtigen, aber methodisch bequemen Photoeffekt.

Historisch korrekt:
Für Einstein sind die Lichtquanten eine Annahme.

Es fasziniert viele Lernende, dass sie Einstein im Originaltext verstehen können.

Modul 1: «Was ist Licht?»

Ein neues Konzept entsteht und wird diskutiert.

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 λ beträgt: $E = h \cdot f = hc/\lambda$ (1.2)

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 herausschlagen 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



LEDs gibt es grossformatig für Scheinwerfer und sehr klein in den einzelnen Pixeln der Flachbildschirme. 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



«Nature of Science» ist hier zwanglos integriert: Physikalische Wahrheit ist anders als mathematische.

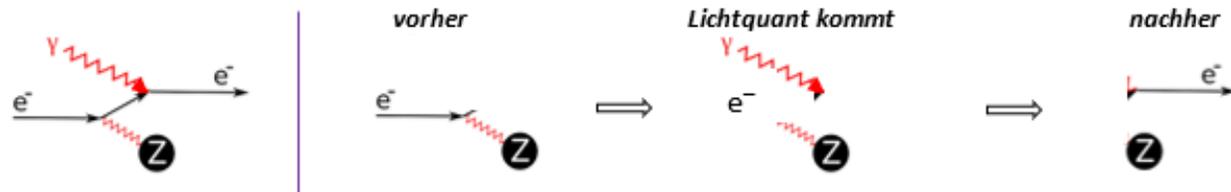
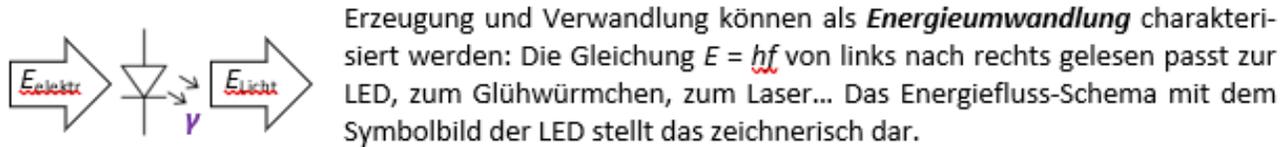
Verbindung mit dem «Wichtigsten», der Formel.

Den Photoeffekt am eigenen Leib erfahren!

Technische Anwendungen gibt es in Hülle und Fülle.

Modul 1: «Was ist Licht?»

In der Quantenphysik Bilder und Wörter bewusst nutzen.



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

*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** .

prozess» 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)

Zeichnungen
= figürlichen Darstellungen
der Quantenphysik
sind wichtig,
aber manchmal problematisch.

Einstein betont den
provisorischen Charakter der
Dualität.

Einstein findet den Impuls des
Lichtquants (gemäss Pais
überraschend spät).

Modul 1: «Was ist Licht?»

Welle ~~oder~~ Teilchen? \Leftrightarrow Sich mit Dualität beschäftigen

Das Wort «Photon» verleitet zur Vorstellung, Licht sei ein Strom von gewöhnlichen Teilchen. Wenn das so wäre, wie entstände 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.*



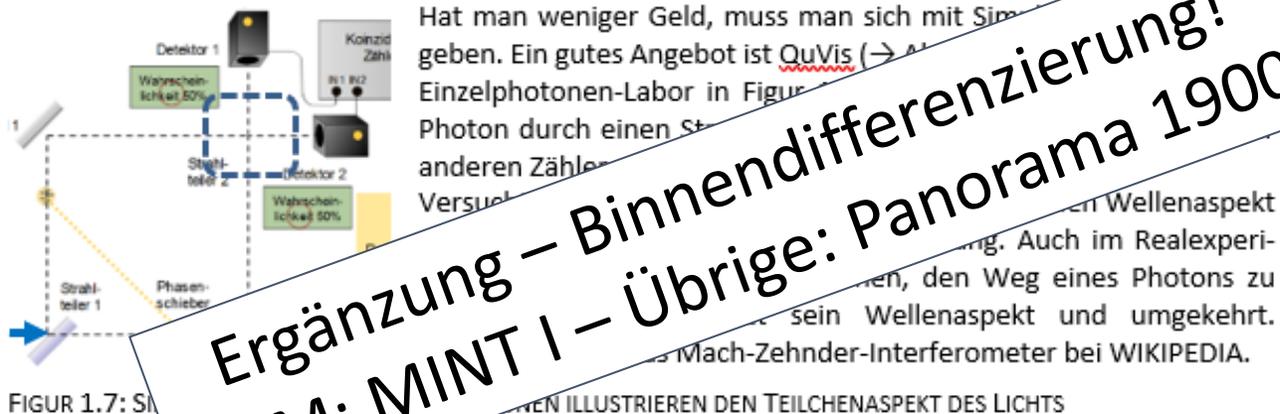
FIGUR 1.6: DIE «HALBE-HALBE-LAMPE» STELLT DIE WESENS-FRAGE.

Was ist Licht???

Realexperimente mit einzelnen Photonen sind zu teuer.

Simulationen müssen die Lücke füllen – mit sorgfältigen Bildern!

Die Lernenden akzeptieren Simulationen als Tatsachen.



FIGUR 1.7: SIMULATIONEN ILLUSTRIEREN DEN TEILCHENASPEKT DES LICHTS

Ergänzung – Binnendifferenzierung!
PAM: MINT I – Übrige: Panorama 1900

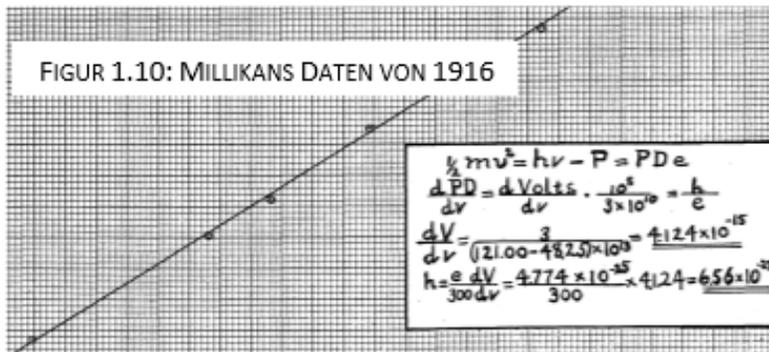
Modul 1: «Was ist Licht?»

Wieso merkt man nichts vom Teilchenaspekt?

WELLENASPEKT DOMINIERT			TEILCHENASPEKT DOMINIERT		
Strahlungsart/Quelle	Handy	IR/Radar	sichtbar. Licht	Röntgen	Gamma
Wellenlänge λ	500 mm	500 μm	500 nm	500 μm	500 fm
Größenvergleich	Arm	Haar	Seifenhaut	Atom	Atomkern
Frequenz f	600 MHz	600 GHz	600 THz	600 PHz	600 EHz
Quanten-Energie E	2 μeV	2 meV	2 eV	2 keV	2 MeV

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

Komplementarität (Modul 3)!
Es kommt auf die Energie an:
Von Gammaquanten
zu Radiowellen.



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 .

Historisch und didaktisch ist bemerkenswert, dass Millikan auch nach vielen Experimenten 1916 nicht an Lichtquanten glaubte und meinte, das tue Einstein auch nicht mehr.

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

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

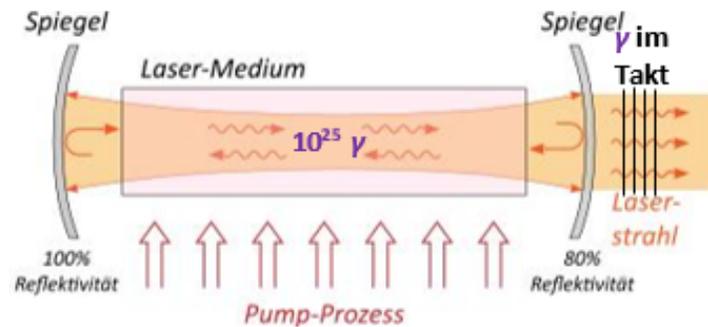
$\frac{h}{mc} = 386 \text{ fm} =$ Compton-Wellenlänge des Elektrons

Die Herleitung von Comptons Gleichung ist hier nicht nötig.

Modul 1: «Was ist Licht?»

Welle-Teilchen-Dualität als Sprechweise, nicht als Modell

Laser ist ein Kunstwort: **LASER** = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Das Laser-



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

Prinzip wird in Figur 1.12 deutlich: In einem gasförmigen (z. B. CO₂ 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 γ** . Eine typische Anzahl ist 10^{25} Lichtquanten.

Die Verwendung der Terminologie beim Gaslaser ist eine gute Übung.

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.

Der in Chemie und Biologie beliebte Modellbegriff verursacht Probleme und ist hier nicht angebracht.

Modul 1: «Was ist Licht?»

Das scheinbare Paradoxon und seine Auflösung

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 kontra-

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 ge-



funden 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.

Der Begriff «Quantenobjekt» hilft beim Sprechen über das Licht.

Feynmans Schilderungen der Lernschwierigkeiten sind für die Lernenden tröstlich und hilfreich.

Modul 1: «Was ist Licht?» - Bilanz

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 γ -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.

Erweiterung des Konzepts «Licht» zum ganzen Spektrum.

Beschreibung und Benennung der beiden Aspekte des Lichts.

Interpretation der Gleichungen.

Ansprechen und Auflösen des «Paradoxons»

Hinweis auf Geschichtliches

Hinweis auf «Nature of Science»-Elemente.



Bilanz: Was sagen die Lernenden?

Einige Aussagen in den Lerntagebüchern:

- *Mich hat überrascht, dass Licht sowohl körnig als auch wellig sein kann und die Physik sich **noch nicht auf nur eine Eigenschaft** beziehen kann. (Flavio 11. Sj)*
- *Man sollte sich **anfreunden mit unlogisch erscheinenden Phänomenen** auf der Welt, denn wenn wir auch keinen direkten Zugang zu ihnen haben, machen sie auf eine uns vielleicht auf den ersten Blick unverständliche Weise Sinn. (Leila 11. Sj.)*
- *Diese quantenphysikalische Dualität ermöglicht einem, **mit den alltäglichen Wörtern** «Teilchen» und «Welle» über das Verhalten des Quantenobjekts «elektromagnetische Strahlung» = Licht zu sprechen. (Annalena 11. Sj.)*
- *Ich finde es **sympathisch**, dass sich **mit trivialen Wörtern** wie «Teilchen» und «Wellen» über das Verhalten von EM-Strahlung sprechen lässt. (Sandra 11. Sj.)*

Folgerung: Die Welle-Teilchen-Dualität hilft beim Einstieg in die Quantenphysik.

«Meiner Meinung nach wurden **zu viel verschiedene Anekdoten** erzählt, welche mir **nicht halfen**, es zu verstehen.»

(Thea 11. Sj.) ⇔ ca. 5% der Lernenden

Ich finde es toll, ist Physik so philosophisch. (Annalena 11. Sj.)



Was ist Licht?

Keine Welle und kein Teilchen, sondern etwas Neues!

*Licht ist ein Quantenobjekt,
das Wellen- und Teilchenaspekt zeigt.*



Meine Einschätzung:

Quantenphysik des Lichts mit Modul 1
ist ein zweckmässiger
Einstieg in die Quantenphysik
ab dem 10. Schuljahr.

***Ihre Gedanken zu
und/oder Erfahrungen mit
der Quantenphysik des Lichts: ...***

Hintergrund-Information zur Dualität:

Eine unfruchtbare Diskussion über Dualismus

Deutsch / international

Dualismus / Dualität

dualism / **duality**

Bis heute wird W-T-Dualität in der deutschsprachigen Physikdidaktik verdrängt!

Hochschule früher:

Heisenberg, 1927:

«Über den anschaulichen Inhalt der QM» *zwei Bilder*

M. Born, 1936:

«The Restless Universe»: Chapter: *Waves and Particles*

Feynman, 1965: Lectures vol. III:

In reality it [the double slit experiment] contains the only mystery.

Landé, 1966:

Quantum Theory without Dualism

Born & Biehm, 1968:

... discussion dualism or nondualism is superfluous ...

Gymnasialdidaktik früher:

Brachner & Fichter, 1977:

Es gibt keinen Dualismus und keine Komplementarität in der Quantenphysik.

Berg, Fischler et al., 1989:

... Ersatz der dualistischen Beschreibung durch die Demonstration eines sich in stochastisch verteilten Einzelprozessen aufbauenden Interferenzmusters...

Bader, 1996:

«Eine Quantenwelt *ohne Dualismus*»

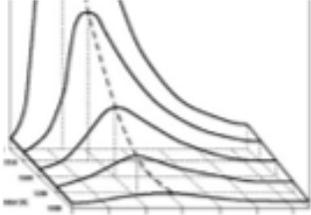
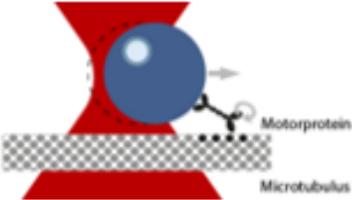
Gegenwart:

Yoon & Cho, 2021:

«Quantitative *complementarity of wave-particle duality*»

Fricker, R., 2023,

«strukt. Photonen» *zusätzlich zum fundamentalen Welle-Teilchen-Dualismus ...*

	<p>Heinrich Hertz 1885:</p> <p>Licht ist eine elektromagnetische Welle mit c und f und λ.</p>	
	<p>Max Planck 1900:</p> <p>Die Oszillatoren, die Wärmestrahlung erzeugen, nehmen Energie in Portionen hf auf.</p>	
	<p>Albert Einstein 1905:</p> <p>Bei der Erzeugung und Verwandlung zeigt sich Licht in Lichtquanten hf portioniert.</p>	
	<p>Albert Einstein 1910:</p> <p>Licht zeigt Dualität. Eine zukünftige Theorie wird beide Aspekte vereinigen.</p>	
	<p>Richard Feynman 1950:</p> <p>Licht ist ein Objekt der QED. Es erscheint uns paradox, weil sein Verhalten uns fremd ist.</p>	
	<p>Donna Strickland 2018:</p> <p>Sie teilt den Nobelpreis für die laseroptische Pinzette mit Arthur Ashkin und Gérard Mourou.</p>	

Übersicht über den Inhalt

- Anknüpfen an Bekanntem
- «Licht» = alle e-m Strahlenarten

- Strahlungsgesetz im Diagramm
- Entstehungsgeschichte
- Begründung mit Energieportionen

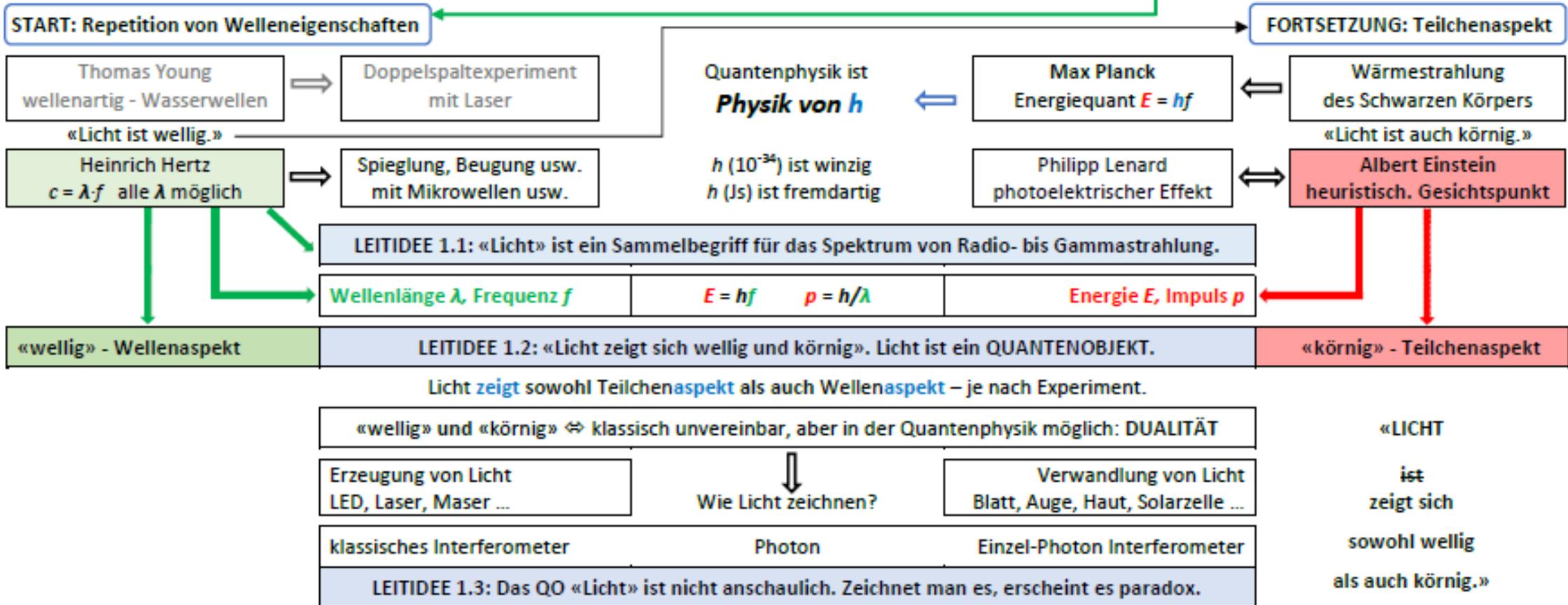
- Fotoeffekt
- Lichtquant = heuristischer Gesichtspunkt

- Was ist Licht «wirklich»?
- Dualität = «sowohl als auch»
- Quantenobjekte sind anders

- Licht ist paradox!?
- Wir meinen zu wissen...

- Anwendungen
- technisch z. B. im Laser
- Genderthematik in der Physik

MODUL 1	Lernweg zu einem quantenphysikalischen Verständnis von Licht	Info für die Lehrperson
10 Lektionen 11./12. Sj.	EINSTELLUNG ZUM THEMA: positiv; Licht macht hell, Licht ist warm ... VORSTELLUNGEN (Ende Sek I): Licht ist immer sichtbar (IR, UV ...). Licht ist eher wellig , vielleicht körnig , sicher etwas Feines. VORKENNTNISSE (beim Start): Licht breitet sich nach den Gesetzen der Strahlenoptik aus und hat eine Wellenlänge.	



PRAGMATISCHE EBENE	=>	Erheben in Klausur
Begriffe		Formeln, Kompetenzen
elektromagnetisches Spektrum = «Licht»		$c = \lambda f$
photoelektrischer Effekt, Lichtquant		$h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ Js
Dualität		$E = hf$
Quantenobjekt		$p = h/\lambda$
Quantenobjekte zeigen Aspekt		1 eV = $1.60 \cdot 10^{-19}$ J
Interferometer		Licht abstrakt zeichnen
Photon		Achtung beim Begriff «Modell»

ONTOLOGISCHE EBENE	=>	Erheben in Tests oder Interviews
Angestrebte Konzepte	⇔	Änderung der tiefen Konzept-Struktur
1.1. «Licht» ist ein Sammelbegriff, der alle e.lmag. Strahlung umfasst.		
1.2a) Bei Erzeugung und Verwandlung zeigt sich Licht «körnig», bei der Ausbreitung «wellig». «Sowohl-als-auch» ⇔ Licht zeigt Dualität.		
1.2b) Licht ist anders. Die klassisch unvereinbaren Konzepte «Welle» und «Teilchen» sind beim Licht vereinbar. Licht ist ein Quantenobjekt.		
1.3a) Quantenobjekte «sind» nicht, sondern «zeigen Aspekte».		
1.3b) Quantenobjekte können nicht veranschaulicht werden.		

Weglassen in Modul 1

1886	Hertz-Hallwachs-Lenard	Entwicklung & Hintergründe des Lichtelektrischen Effekts
1890	Stefan & Bolz.	Experiment & Theorie zum Gesetz zur Gesamtstrahlungsleistung
1893	Wien	Verschiebungsgesetz zum Strahlungsmaximum
1895	M. Curie	natürliche Radioaktivität
1907	Thompson	<i>Unit of Light</i>
1909	Taylor	«Einzelphotonen»-Experiment
1913	Bohr	Atommodell mit quantisiertem Drehimpuls
1913	Moseley	Zusammenhang Röntgenspektrum und Ordnungszahl
1914	Millikan	Einzelheiten der Experimente mit Alkalimetallen
1916	Duane & Hunt	kurzwellige Grenze des Röntgenspektrums
1916	Einstein	spontane und induzierte Emission
.....

Einige Quellen

- Bitzenbauer, P. & Meyn, J.-P. (2020). Inhaltsvalidität eines Testinstruments zur Erfassung deklarativen Wissens zur Quantenoptik. *PhyDid-B - Didaktik der Physik - Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, 149-155.
- Born, M., & Biehm, W. (1968). Dualism in quantum theory. *Physics Today*, 21 (8), 51.
- Brachner, A. & Fichtner R. (1977). *Quantenmechanik für Lehrer und Studenten*. Hannover: Schrödel.
- de Broglie, L. (1924). *Recherches sur la théorie des Quanta*. Paris: Université.
- Bungum, M. et al. (2015). ReleQuant – Improving teaching and learning in quantum physics through educational design research. *NorDiNa Nordic Studies in Science Education*, 112, 153-168.
- Einstein, A. (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 17, 132-148.
- Einstein, A. (1909). *Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung*. *Physikalische Zeitschrift*, 10, 817–825.
- Feynman, R. P. (1964). *The Character of Physical Law. – The 1964 Messenger Lectures*. Cambridge (MA): MIT Press. Video: <https://twitter.com/bbcarchive/status/1025372232892198912>
- Haroche, S. & Raimond, J. M. (2006): *Exploring the Quantum*. Oxford: University Press.
- Hoehn, J. & Finkelstein, N. (2018). Students' flexible use of ontologies and the value of tentative reasoning: Examples of conceptual understanding in three canonical topics of quantum mechanics. *Phys. Rev. Phys. Ed. Research*, 14, 010122.
- Kattmann, U., Duit, R., Groppegiesser, H. & Komorek, M. (1997). Das Modell der Didaktischen Rekonstruktion – Ein Rahmen für naturwissenschaftsdidaktische Forschung und Entwicklung. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 3, 3, 3-18.
- Krijtenburg-Lewerissa, K. et al. (2017). Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education. *Physical Review Physics Education Research*, 13, 010109.
- Kiefer, C. (2015) (Hrsg.). *Albert Einstein – Boris Podolsky – Nathan Rosen. Kann die quantenmechanische Beschreibung der physikalischen Realität als vollständig betrachtet werden?* Berlin: Springer.
- Lichtfeldt, M. (1992). *Schülervorstellungen in der Quantenphysik und ihre möglichen Veränderungen durch Unterricht*. Essen: Westarp.
- Müller, R. (2003). *Quantenphysik in der Schule*. Berlin: Logos.
- Müller, R. & Schecker, H. (2018). Schülervorstellungen zur Quanten- und Atomphysik. In H. Schecker et al. (Hrsg.) *Schülervorstellungen und Physikunterricht* (S. 209-224). Berlin: Springer.
- Schorn, B. (2014). *Quantenphysik in der Schule. Eine Unterrichtskonzeption zur Einführung in die Quantenphysik für die 10. Jahrgangsstufe*. Dresden: Technische Universität (Dissertation).
- Stadermann, H. & Goedhart, M. (2020). Secondary school students' views of nature of science in quantum physics. *Int. J. of Sci. Education*, 42 (6), 997-1016.
- Yoon, T. H. & Cho, M. (2021). Quantitative complementarity of wave-particle duality. *Science Advances*, 7, eabi9268.