

# FACETTEN DER QUANTENPHYSIK

## AKTIVITÄTEN

VON HANS PETER DREYER



Universität  
Zürich<sup>UZH</sup>

Version 6.0 – Dezember 2021  
hanspeter.dreyer@uzh.ch



**INHALTSVERZEICHNIS DER AKTIVITÄTEN****AKTIVITÄTEN ZU «WAS IST LICHT?»**

Modul 1: Aufgaben zum Denken und Diskutieren, zum Recherchieren und Rechnen

Modul 1: Kurz-Lösungen der Aufgaben

Modul 1: MINT-Aufgaben

Modul 1: Kurz-Lösungen der MINT-Aufgaben

Abschnitt 1.1: Experiment Wellenaspekt beim Doppelspalt

Abschnitt 1.3: Die Experimente von Lenard und Compton.

Abschnitt 1.3: Experimentelle Bestimmung des Werts des Wirkungsquantums  $h$

Abschnitt 1.4: Simulation zum Einzelphoton

Abschnitt 1.6: Simulation zur Teilchen-Welle-Dualität

Nachdenken über Physik 1: Physik und Technik

**AKTIVITÄTEN ZU «WO IST DAS ELEKTRON?»**

Modul 2: Aufgaben zum Denken und Diskutieren, zum Recherchieren und Rechnen

Modul 2: Kurz-Lösungen der Aufgaben

Modul 2: MINT-Aufgaben

Modul 2: Kurz-Lösungen der MINT-Aufgaben

Abschnitt 2.3: Experimente zur Bragg-Reflexion

Abschnitt 2.3: Von Davisson und Germer zu Elektronenwellen in der Schule

Abschnitt 2.3: Simulation mit Quantenobjekten am Doppelspalt

Abschnitt 2.6: Simulation zur Wahrscheinlichkeitsverteilung

Nachdenken über Physik 2: Theorie und Experiment in der Physik

**AKTIVITÄTEN ZU «QUANTEN-ZUFALL UND KATZEN-PHILOSOPHIE»**

Modul 3: Aufgaben zum Denken und Diskutieren, zum Recherchieren und Rechnen

Modul 3: Kurz-Lösungen der Aufgaben

Abschnitt 3.4: Experiment zum radioaktiven Zerfall

Medien

Nachdenken über Physik 3: Physik und Interdisziplinarität – 3 Beispiele

**MODUL 1: AUFGABEN ZUM DENKEN UND DISKUTIEREN, ZUM REPETIEREN UND RECHNEN****1.1) Kontrollfragen zum Modul 1**

Seite 3: Durch welche Grössen ist sichtbares Licht charakterisiert?

Seite 4: Wusste «man» um 1900, was Licht ist?

Seite 5: Wie könnte man das Lichtgemisch beschreiben, das ein glühender Körper aussendet?

Seite 6: Wie müsste man sich die Quantisierung der Energie im Alltag veranschaulichen?

Seite 7: Was ist der Unterschied zwischen einem «heuristischen Gesichtspunkt» und einem «Beweis»?

Seite 8: Weshalb hat Einstein übers Ziel hinausgeschossen?

Seite 9: Welche «Elementarprozesse mit Licht» im Sinn von Einstein kennen Sie?

Seite 10: Wie kann man die «Verwandlung von Licht» im grünen Blatt darstellen?

Seite 11: Der Wirkungsgrad von Energieumwandlungen ist immer  $<1$ . Was geschieht mit dem Rest?

Seite 12: Was ist der Unterschied zwischen «Das Licht ist...» und «Das Licht zeigt...»?

Seite 13: Wann geht man mit physikalischen Modellen opportunistisch um?

Seite 14: Warum sind Quantenobjekte unanschaulich? Warum wirken sie paradox?

**1.2) Fluoreszenz in der Natur**

a) Wieso ist es unmöglich, dass ein Kristall UV abgibt, wenn er mit blauem Licht beleuchtet wird?

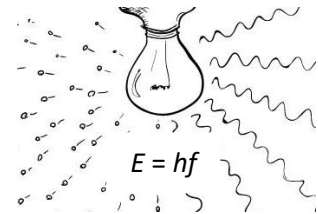
b) Kann «Schwarzlicht» Fluoreszenz hervorrufen?

c) Recherche: Was hat das Enzym «Luciferase» mit der Fluoreszenz zu tun?

**1.3) Halbe-Halbe-Lampe**

a) Bringen Sie die Figur und die Gleichung zueinander in Beziehung.

b) Erläutern Sie die Problematik der Figur in wenigen Sätzen jemandem, der/die keine Kenntnisse der Quantenphysik des Lichts hat.

**1.4) Energiesparlampen**

a) Welche Energiespar-Lampentypen gibt es? Werfen Sie einen Blick in die Regale des Warenhauses!

b) Lampen-Werbetext: «4.3 Watt = 40 Watt» - Überlisten solche Lampen die Energieerhaltung?

c) Seit wann spielen LED-Lampen für die Strassenbeleuchtung eine nennenswerte Rolle?

**1.5) Abstrakte Darstellung des Experiments von Lenard**

Erläutern Sie das Ergebnis von Lenards Experiment (Figur 1.4) anhand der Figuren 1.7.

**1.6) Quantenphysik in der Taschenlampe**

Manche Taschenlampen arbeiten mit 9 Volt Batterien. - Wie viele in Serie geschaltete blaue Leuchtdioden können so betrieben werden?

**1.7) Quantenphysik in der «Röhre»**

Im Magnet-Resonanz-Tomographen (MRI/MRT) wird elektromagnetische Strahlung mit einer Frequenz von etwa 50 MHz in ein Knie gestrahlt. Berechnen Sie die Energie der Quanten dieser Strahlung und die Wellenlänge.

**1.8) Einsteins Heuristik – Dualität – Janusköpfigkeit**

a) Erläutern Sie den Begriff «Heuristik» in eigenen Worten.

b) Welche Schlussweisen wären Alternativen zur Heuristik?

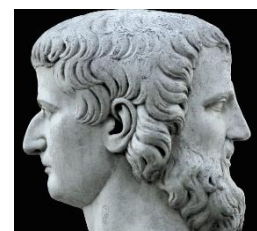
c) Wieso ist Albert Einstein 1905 auf Heuristik angewiesen?

d) Was bedeutet «Dualität»?

e) Machte die Dualität des Lichts 1905 Einstein Sorgen?

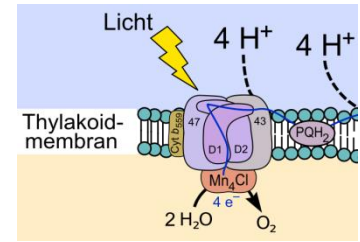
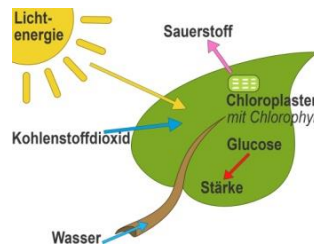
f) Ist die Dualität heute erledigt?

g) Diskutieren Sie in einer Kleingruppe die «Janusköpfigkeit des Lichts». Verursacht sie Unbehagen?



**1.9) Darstellung von Licht in Biologiebüchern**

Studieren Sie, wie in den zwei Abbildungen das Licht dargestellt wird und vergleichen Sie dies mit der Darstellung der Materie. – Kommt die Quantisierung irgendwie zum Ausdruck? Wie könnte man es besser machen? Finden Sie eine ähnlich problematische Abbildung im Netz oder einem populären Buch oder Schulbuch.



**1.10) Quantenphysik und unsere Haut**

Die Quanten des ultravioletten Lichts deponieren Energie in verschiedenen Schichten der Haut.

- a) Was macht UV-A in der Oberhaut und der Lederhaut? Was macht UV-B?
- b) Finden Sie heraus, was in der Atmosphäre mit UV-Licht geschieht.
- c) Wieso müssen Weltraumanzüge speziell gegen UV-C schützen, unsere Kleider jedoch nicht?
- d) Recherche: Was versteht man unter «weissem Hautkrebs»?
- e) Recherche: Wieso ist Sonnencreme weiss wie Schnee?
- f) Inwiefern äussert sich die Dualität des Lichts sogar in der Sonnencreme?



**1.11) Infrarot in der Natur**

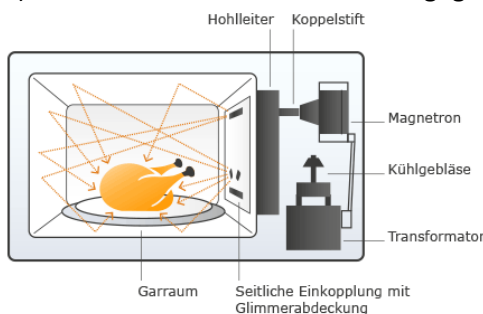
- a) Infrarotstrahlung ist uns unvertraut. IR hat grob gesprochen eine Wellenlänge zwischen 1/100 mm und 1/1000 mm. – Wie gross sind die Frequenzen?
- b) Wie gross sind die Energien der zugehörigen Lichtquanten in J und in eV?
- c) Wieso können die fürs Nachtsehen wichtigen Stäbchen in unseren Augen kein IR erkennen, im Gegensatz zum IR-empfindliches Sinnesorgan nachtaktiver Schlangen?
- d) Die Erde strahlt die von der Sonne erhaltene Energie überwiegend mit IR ab. Die CO<sub>2</sub>-Moleküle und andere Gase in der Atmosphäre «verwandeln» es und speichern die Energie kurz. Dann «erzeugen» sie mit dieser Energie wieder Licht und strahlen es in irgendeine Richtung ab. – Wieso ist es wieder IR? Wieso macht das ein Klimaproblem? Zeichnen Sie diesen Prozess möglichst abstrakt.

**1.12) Quanten aus dem 5 mW-Laser-Pointer von 532 nm**

- a) Ist dieses Licht grün?
- b) Wie viele Photonen strömen pro Sekunde aus diesem «bedingt unbedenklichen» Pointer?
- c) Wie gross wäre ihr Abstand, wenn sie nacheinander auf dem Lichtweg aufgereiht wären?
- d) Kann man aus der Lösung von c) auf die Grösse eines Photons schliessen?

**1.13) Der Mikrowellenofen: Quantenphysik in der Küche.**

a) Im Mikrowellenofen sendet eine gegen aussen abgeschirmte Magnetron-Röhre elektromagnetische



Strahlung mit einer Frequenz von 2.455 GHz aus. Wie gross ist die Wellenlänge? Weshalb dringt diese Strahlung nicht durch das Lochblech in der Tür des Ofens?

b) Wie viele Mikrowellenquanten erzeugt die Röhre bei der vollen Heizleistung von 1 kW in den Garraum? Vergleichen Sie diese Zahl mit der Anzahl Luftmoleküle im Garraum. Diese ist in der Grössenordnung von 1 Gramm-Mol.

c) Inwiefern zeigen a) und b), dass Mikrowellen-Strahlung ein Quantenobjekt ist?

**1.14) Grundlagenforschung versus Angewandter Forschung**

Die Physikalisch Technische Reichsanstalt untersuchte um 1900 nicht nur Glühlampen, sondern betrieb auch ein umfangreiches Forschungsprogramm zu verschiedensten Lichtquellen. – Kommentieren Sie mit wenigen Sätzen die Aussage von Anton Zeilinger, einem der Väter der Quantenkryptographie: *Doch wenn immer nur unmittelbar anwendungsbezogene Forschung betrieben worden wäre, hätten wir heute eine unglaubliche Vielfalt und Raffinesse an Kerzen; aber keine Elektrizität.*

**MODUL 1: KURZ-LÖSUNGEN DER AUFGABEN**

1.1 -

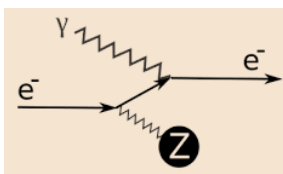
- 1.2a UV-Quant benötigt mehr Energie als Quant aus dem Sichtbaren zur Verfügung stellt.  
 1.2b «Schwarzlicht» ist unpräzise: Wenn IR, dann Quantenenergie zu klein; mit UV möglich.  
 1.2c Artspezifische Enzyme, die katalytisch natürliche Leuchtstoffe (Luciferine) zu energiereichen, instabilen Substanzen oxidieren. Bei deren Zerfall kommt es zur Biolumineszenz.

1.3a In  $E$  steckt der Teilchenaspekt = linke Hälfte; in  $f$  steckt der Wellenaspekt = rechte Hälfte.

1.3b -

- 1.4a Gasentladungslampen (mit Hg, Na usw.) und LED-Lampen neben besseren Glühlampen.  
 1.4b Nein. Neue Lampen besitzen einen höheren Wirkungsgrad als Glühlampen, können also mit 4.3 W elektrischer Leistung gleich viel Licht erzeugen, wie eine alte 40 W-Glühlampe.  
 1.4c Scheinwerfer usw. mit LED seit etwa 2010. LED als Signallämpchen seit 1960.

1.5 Lenard beleuchtet das Metall Zink mit verschiedenem Licht. Z ist ein Symbol für das Zn-Metall.



I) Beleuchtung mit sichtbarem Licht => Die Energiezunahme des  $e^-$  ist so gering, dass die Bindung an Z erhalten bleibt, dessen Energie erhöht und letztlich zu einer winzigen Temperaturerhöhung führt.

II) Beleuchtung mit UV-Licht bei positiv geladener Platte => Energiezunahme des  $e^-$  ist gross, aber nicht gross genug um die Bindung an Z zu überwinden, weil diese durch die positive Ladung grösser als normal ist.

III) Beleuchtung mit UV-Licht bei negativ geladener Platte => Energiezunahme des  $e^-$  ist gross genug um die Bindung an Z zu überwinden, weil diese durch die positive Ladung kleiner ist als normal.

Perfektionierungsmöglichkeiten:

- (1) Das rote Lichtquant könnte mit längeren Wellen gezeichnet werden als das ultraviolette.  
 (2) Die Energieveränderungen des  $e^-$  könnten entsprechend kleiner und grösser dargestellt werden.

1.6 Figur 1.1: blau =>  $10^{15}$  Hz =>  $E = hf = 6.6 \cdot 10^{-19}$  J = 4 eV => 2 blaue LED in Serie1.7  $E = hf = 3.3 \cdot 10^{-26}$  J  $\approx$  0.2  $\mu$ eV;  $\lambda = c/f = 6$  m, im UKW-Bereich

1.8a -

- 1.8b Deduktion (Schluss vom Allgemeinen aufs Besondere) oder Induktion (umgekehrt).  
 1.8c Er hatte keine theoretische Basis für Deduktion. Er verwendet «heuristisches Vorgehen» synonym zu «induktivem Vorgehen».  
 1.8d In einigen Experimenten zeigt Licht Wellenaspekt, in anderen Teilchenaspekt.  
 1.8e Dualität störte Einstein 1905 noch nicht, erst einige Jahre später.  
 1.8f Beim Lernen des Verhaltens der Natur taucht er immer noch auf. Wissenschaftlich ist er durch die Quantenmechanik erklärt: Teilchen und Welle sind zwei Extreme des allgemeinen Falls.  
 1.8g -

- 1.9 1. Bild: Licht nicht körnig, kontinuierlich; Materiefluss ebenfalls.  
 2. Bild: Materie in Portionen, körnig; Lichtenergie hingegen nicht körnig!

- 1.10a UV-A durchdringt Oberhaut; gelangt bis zur Lederhaut; bewirkt kurzfristige Bräunung. UV-B wird in der Oberhaut absorbiert; bewirkt langfristige Bräunung; wirkt kanzerogen.  
 1.10b UV-Strahlung unter 300 nm wird vollständig, unter 400 nm in grossem Umfang absorbiert.  
 1.10c UV-C (gemäss WHO von 1 nm bis 400 nm) schädigt Aminosäuren, ist kanzerogen.  
 1.10d «Weisser Hautkrebs» ist Basalzellenkrebs, eine bösartige Krebserkrankung der Haut, die sich aus den basalen Schichten der Epidermis und der Haarfollikel entwickelt. Bevorzugte Lokalisationen sind die der Sonne ausgesetzten Gesichtsregionen wie Stirn, Nase oder Ohren.

1.10e Schnee ist weiss, weil er aus Eiskristallen zusammengesetzt ist, die ungeordnet daliegen und das Sonnenlicht in alle Richtungen zurückschicken. Die Titanoxidkristalle im Sonnenschutzmittel machen das Gleiche. In beiden Fällen muss die Schicht dick genug sein. Der Wellenaspekt des Lichts kommt insofern zum Vorschein, als das Gemisch aller Wellenlängen im Sonnenlicht gleich reflektiert wird.

Der Quantenaspekt des Lichts macht sich beim Sonnenschutz bemerkbar, wenn  $\text{TiO}_2$  oder andere UV-Filterstoffe wie Amiloxat ( $\text{C}_{15}\text{H}_{20}\text{O}_3$ , aus der Gewürzlilie) die energiereichen UV-Quanten verschlucken, im Sinne von Einstein «verwandelt». Daraus entsteht Wärme.

1.10f Siehe 1.10e.

1.11a  $f = c/\lambda = 3 \cdot 10^{13} \text{ Hz}$  resp.  $3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$

1.11b  $E = hf = 2.0 \cdot 10^{-21} \text{ J} = 12 \text{ meV}$  resp.  $2.0 \cdot 10^{-20} \text{ J} = 120 \text{ meV} = 0.12 \text{ eV}$

1.11c Die minimale Energie für eine Reaktion eines Zäpfchens ist diejenige eines roten Quants.

1.11d Energieerhaltung wie bei der Fluoreszenz. Das IR, das Richtung Erde abgestrahlt wird, erwärmt diese zusätzlich zur Sonne => Treibhauseffekt. Vgl. mit der Figur 1.11.

1.12a  $f = c/\lambda = 5.64 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ ;  $E = hf = 3.74 \cdot 10^{-19} \text{ J} = \text{ca } 2.3 \text{ eV}$  pro Quant => JA, grün

1.12b  $5.0 \cdot 10^{-3} \text{ W} / 3.74 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1.3 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1}$  also: Anzahl pro Sekunde

1.12c Lichtweg in 1 s =  $3.0 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1} / 1.3 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1} = 2.2 \cdot 10^{-8} \text{ m} = \text{ca } 20 \text{ nm}$   
also 25 Photonen pro 1 Wellenlänge

1.12d Nein! Lichtquanten sind nicht lokal.

1.13a  $\lambda = c/f = 12 \text{ cm}$ ; die Wellenlänge ist viel grösser als die ca 3mm kleinen Löcher; diese sind aber viel grösser als die Lichtwellenlänge, so dass sichtbares Licht hindurch kommt und wir ins Innere blicken können.

1.13b Energie eines Quants =  $E = hf = 1.44 \cdot 10^{-24} \text{ J}$ ;  $1.0 \cdot 10^3 \text{ W} / 1.44 \cdot 10^{-24} \text{ J} = 6.6 \cdot 10^{26}$  pro Sekunde; es hat also etwa 1000mal mehr Mikrowellenquanten als Luftmoleküle im Garraum (ca.  $10^{23}$ ).

1.13c Die Strahlung zeigt am Lochblech ihren Wellenaspekt und bei der Absorption im Wasser (nicht in Einzelmolekülen, sondern dem Verbund von vielen Molekülen in der Flüssigkeit) des Kochguts ihren Teilchenaspekt. In Alltagsdimensionen ist die Energie-Quantisierung überhaupt nicht bemerkbar; der Wellenaspekt hingegen schon.

1.14 Dass **Grundlagenforschung** im Verlaufe der Zeit für technische Anwendungen nützlich sein kann, gilt für jedes Teilgebiet der Physik: Aus elektrischen Salonspielereien im 17. Jh. wurden im 20. Jh. kontinentale Netzwerke! Mit der frühen Quantenphysik des Lichts ging es schneller. Die Entwicklung von immer besseren Solarzellen ist noch in Gang, wie sie das Diagramm im Abschnitt 1.5.3 zeigt.

**Angewandte Forschung:** Hätten sich nur die Hersteller von Fotopapier mit der «Verwandlung von Licht» beschäftigt, gäbe es vielleicht ganz andere und noch bessere Farbfotos oder Systeme zur Abbildung von Objekten, aber keine Solarzellen. Grundlagenforschung ist aber langsam. Erst 100 Jahre nach Einstein kommt der Nutzen seiner «Verwandlung» zum Vorschein.

**Randbemerkung:**

Politische Aktionen mögen nötig sein, um die das Bewusstsein der breiten Bevölkerung aufzuscheuchen. Als Basis für Grundlagenforschungsprogramme taugen sie kaum.

Das Klima wurde von der Grundlagenforschung schon während Jahrhunderten untersucht. Spätestens in den 1970er Jahren geriet die  $\text{CO}_2$ -Problematik ins Bewusstsein von vielen Forschern aus verschiedenen Disziplinen. Erst um 2020 geriet der gleiche Sachverhalt erneut ins öffentliche Blickfeld.



**MODUL 1: MINT-AUFGABEN****M1.1) TITANIC I (Wellen)**

Der «SOS-Ruf» der TITANIC wird mit 500 kHz ausgestrahlt. Für einen «SOS-Strich» benötigt der Funker 1/10 Sekunde. – Wieviele Wellenzüge erzeugt er? Wie lang ist ein einzelner? Wie weit wandert der erste bis der letzte erzeugt wird? Wie gross ist die «elektromagnetische Wolke» des «SOS-Strichs»?

**M1.2) TITANIC II (zur Quantenphysik)**

- a) Wir betrachten die Antennenanlage der TITANIC und nehmen an, dass sie eine Leistung von 1 kW hatte. - Wie viele Radio-Quanten werden in einem «SOS-Strich» von 1/10 Sekunde Dauer erzeugt?
- b) In der Empfangsantenne werden die Radio-Quanten in einen elektrischen Strom «verwandelt». Wie viele Quanten des «SOS-Punkts» treffen bei einem 10 km entfernten Schiff auf eine Antenne mit einer wirksamen Fläche von  $10 \text{ m}^2$ ? (Hinweis: Halbkugel) Welche mittlere Leistung liefern sie?

**M1.3) Ein Mikrowellenofen als Raketentriebwerk**

Berechnen Sie die Anzahl Quanten, die ein Mikrowellen-Kochgerät bei 1 kW Leistung erzeugt. Schliessen Sie auf den Impuls, der mit dieser Leistung verknüpft ist. Wieso merkt man nichts von diesem Rückstoss?

**M1.4) Laserdiode für DVD-Player, Barcode-Scanner usw.**

Im abgeschnittenen Gehäuse von etwa 3.5 mm Durchmesser befinden sich eine AlGaInP-Laserdiode und eine Photodiode, die das reflektierte Licht aufnimmt (vgl. Schema links). Die Diode strahlt 7 mW Licht von 650 nm Wellenlänge aus, wenn sie bei 2.2 V mit 27 mA in Durchlassrichtung betrieben wird.

a) Mit welcher Farbe leuchtet die Diode? Ist ihr Licht sichtbar?

b) Wie gross ist zugeführte elektrische Leistung und wie gross ist der Wirkungsgrad?

c) Der Laserkristall ist der schwarze Quader, der auf dem vergoldeten Kühlkörper montiert und mit einem Golddraht kontaktiert ist: Wie gross ist der Kühlkörper etwa, wenn der Durchmesser des abgesägten Gehäuses 3.5 mm beträgt, und welche Wärme muss er ableiten?

d) Wie gross ist der eigentliche Laserkristall etwa? Passt dazu die Information vom Datenblatt: *Emission point accuracy min 80  $\mu\text{m}$* ? Wo ist die Photodiode?

e) Wie viele Wellenlängen enthält eine stehende Welle zwischen den Spiegeln des Kristalls gemäss Ihren Angaben bei d)?

f) Wie gross ist ungefähr die Energie im Innern der Laserdiode, wenn der Austrittsspiegel zu 90% spiegelt?

**M1.5) Was wäre, wenn**

a) Was wäre anders, wenn  $h$  nur fürs Sonnenlicht  $10^{20}$  Mal wäre, für den Rest der Welt aber gleich? Wie viele Lichtquanten würden dann pro Sekunde auf einen Quadratmeter Erdboden fallen, wenn das Sonnenlicht eine Leistung von 1 kW pro Quadratmeter hätte?

b) Was wäre anders, wenn  $h$  beim MRI  $10^{20}$  Mal kleiner wäre, für den Rest der Welt aber gleich?

c) Was wäre anders, wenn  $h$  unendlich klein wäre?

**M1.6) Mit  $c$ ,  $h$  und  $G$  gibt es die natürlichen Masseinheiten von Max Planck**

a) Überprüfen Sie, dass  $h/c$  die Masseinheit  $\text{m}\cdot\text{kg}$  besitzt, also die Dimension  $\text{L}\cdot\text{M}$  aufweist.

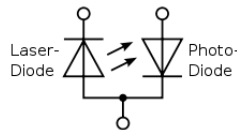
b) Die Gravitationskonstante  $G$  ist ebenfalls universell. Sie besitzt die Masseinheit  $\text{m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$ . Suchen Sie nach einer ebenso einfachen Kombination von  $G$  und  $c$  mit der Dimension  $\text{L}/\text{M}$  wie in a).

c) Benützen Sie die Ergebnisse von a) und b) um die Planck-Länge  $L$  mit  $c$ ,  $h$  und  $G$  auszudrücken.

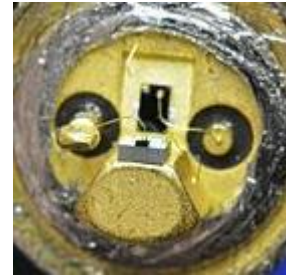
d) Berechnen Sie den Zahlenwert von  $L$ . Vergleichen sie ihn mit der Grösse eines Atoms.

Hinweise: 1) In der Literatur wird  $L$  nicht mit  $h$ , sondern mit  $h/2\pi$  berechnet.

2) Ebenso gelingt es die Zeit  $T$ , die kleinste, sinnvolle Zeitspanne auszudrücken.



aufnimmt (vgl. Schema links). Die Diode strahlt 7 mW Licht von 650 nm Wellenlänge aus, wenn sie bei 2.2 V mit 27 mA in Durchlassrichtung betrieben wird.



**MODUL 1: KURZ-LÖSUNGEN DER MINT-AUFGABEN**

M1.1  $n = f \cdot t = 5000$  Wellenzüge;  $\lambda = c/f = 600$  m;  $s = c \cdot t = 3.0 \cdot 10^6$  m;  $x = n \cdot \lambda = 3.0 \cdot 10^6$  m = 3000 km

M1.2a  $E = P \cdot t = 10$  J;  $E_\gamma = h \cdot f = 3.3 \cdot 10^{-28}$  J (pro Lichtquant);  $n = E/E_\gamma = 3.0 \cdot 10^{28}$  Quanten

M1.2b  $A_{\text{Halbkugel}} = 2\pi \cdot r^2 = 6.3 \cdot 10^8$  m<sup>2</sup>;  $n' = n \cdot A' / A = 4.8 \cdot 10^{20}$ ;  $P' = n' \cdot E_\gamma / t = 1.6 \cdot 10^{-5}$  W = 16  $\mu$ W

Bemerkung: Bei Kommunikation über Radio spielt die Quantisierung der Strahlung keine Rolle.

M1.3 Bei 3 cm-Wellen ca.  $10^{26}$  Quanten pro Sekunde und ein Impuls von  $3 \cdot 10^{-6}$  Js/m =  $3 \cdot 10^{-6}$  Ns.

Der Betrag ist sehr klein und nur von Bedeutung, wenn alle Photonen dieselbe Richtung haben.

Weil sie in verschiedenen Richtungen wegfliegen, ist die Vektorsumme = Null.

M1.4a Dunkelrot; ja

M1.4b  $P = UI = 59$  mW; Wirkungsgrad = 7 mW / 59 mW = 12 %

M1.4c Vergrößerung ca 10 : 1 => Abmessungen 1 mm / 1.5 mm; 52 mW

M1.4d ca 0.2 mm x 0.5 mm x 0.6 mm; Genauigkeit von 0.08 mm ist passend; klein, «unten» = auf dem Grund, schwarz mit einem Golddraht kontaktiert

M1.4e  $2 \cdot 10^{-4}$  m /  $650 \cdot 10^{-9}$  m = ca. 300 Wellenlängen

M1.4f Annahme: Im Innern der Diode treffe 100% des Energieinhalts in der Zeit  $t$  auf den Spiegel, die das Licht braucht, um das Volumen zu füllen resp. zu leeren. Davon tritt 10% = 7 mW aus.

In  $t = 2 \cdot 10^{-4}$  m /  $3 \cdot 10^8$  ms<sup>-1</sup> =  $7 \cdot 10^{-13}$  s ist die ganze Energie aus dem Würfel auf der Wand.

Energie im Würfel = 70 mW ·  $7 \cdot 10^{-13}$  s =  $5 \cdot 10^{-11}$  J (Das sind eine Million Quanten zu 1 eV.)

M1.5a Eine gleich leistungsfähige Lichtquelle müsste  $10^{20}$  mal weniger Photonen produzieren. Beim Sonnenlicht hätten wir nur  $1.5 \cdot 10^{-5}$  Quanten pro Sekunde und Quadratmeter.

Veranschaulichung: Im Mittel pro Sekunde ein Lichtblitz durch ein Riesenphoton auf eine Fläche von etwa 10 Fussballfeldern. Oder alle 18 Stunden eines auf einen Quadratmeter.

M1.5b Wenn die Protonen gleich viel Anregungsenergie  $E$  benötigten,  $h$  aber kleiner wäre, müsste die Frequenz  $f$   $10^{20}$  mal grösser sein, also  $5 \cdot 10^{27}$  Hertz.

M1.5c Keine Energiequantisierung, keine Atome ... keine Quantenphysik!

M1.6a  $[c] = \text{m/s} = \text{L/T}$ ;  $[h] = \text{m}^2\text{kg}\text{s}^{-1} = \text{L}^2\text{MT}^{-1}$  (vgl. 1.5.3)

M1.6b  $[G/c^2] = \text{m/kg} = \text{L/M}$

M1.6c (a) · (b) =>  $L = \sqrt{hG/c^3}$

M1.6d Unser Wert  $L = 4.0 \cdot 10^{-35}$  m; Literaturwert von  $L = 1.6 \cdot 10^{-35}$  m;  $10^{25}$  mal kleiner

**Physik macht Politik: Quantenphysik ermöglicht genaueres Wägen**

Politik, Technik und Physik stehen durch die Finanzen seit jeher in einer wechselseitigen Abhängigkeit.

Dazu ein aktuelles Beispiel: Im Jahr 2019 wurde das Urkilogramm nach 220 Jahren offiziell überflüssig! Alle Messämter der Welt definieren das **Kilogramm** nicht mehr mit der Masse des Platinzylinders von Paris, sondern indirekt über die universelle und unveränderliche Festsetzung von  $h$ , analog zur

**Meter**definition von 1983

**Kilogramm**definition von 2019

$$c \equiv 2.997'924'58 \cdot 10^{+8} \text{ ms}^{-1}.$$

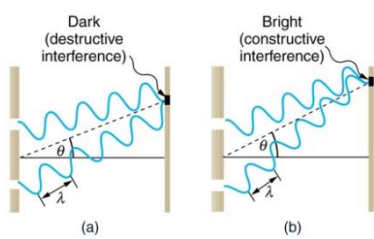
$$h \equiv 6.626'070'15 \cdot 10^{-34} \text{ kgm}^2\text{s}^{-1}.$$



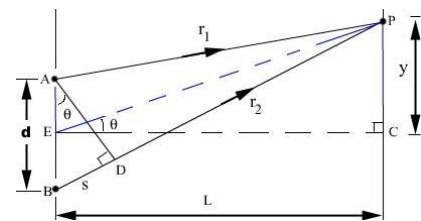


**EXPERIMENT 1.1: EXPERIMENT ZUM WELLENASPEKT DES LICHTS BEIM DOPPELSPALT**

**UMFELD:** Der Doppelspalt ist das einfachste Gerät, um bei einer Strahlung den Wellenaspekt nachzuweisen. Er wurde um 1800 durch den Universalgelehrten Thomas Young erstmals bei Wasserwellen demonstriert und zur Wellenlängenbestimmung beim Licht eingesetzt. Der Wechsel zwischen konstruktiver und destruktiver Interferenz ist kein Beweis des Wellenaspekts, denn Beweise gibt es nur in der Mathematik und der Logik. Den beobachteten Wechsel kann man sich aber nicht anders erklären als es das Schema links nahelegt. Wenn die Wellenlänge ca. 3 cm beträgt, wie bei einem Mikrowellensender, ist die Entfernung zwischen den Stellen mit destruktiver und mit konstruktiver Interferenz bei vernünftiger Beobachtungsdistanz auch in der Grössenordnung von einigen cm.



**MATHEMATISCHE PRÄZISIERUNG:** Ist die Wellenlänge so klein wie beim Licht oder bei den de Broglie-Wellen von Modul 2, ist die mathematische Präzisierung für Planung und Auswertung unerlässlich. Im schematisierten Bild rechts ist  $d$  der Abstand zwischen den Spalten A und B, deren Breite vernachlässigt wird.  $L$  ist die Entfernung zwischen «dem Spalt» und dem Messort (Schirm, Wand Detektor usw.).  $y$  ist der Abstand von der Symmetrieachse C zum Beobachtungsort P.

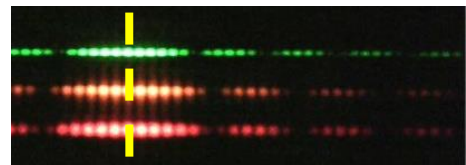


$s$  ist der Längenunterschied zwischen den zwei Ausbreitungswegen:  $s = r_2 - r_1$ . **Oft ist  $s$  viel kleiner als  $L$ .** Dann ist das Dreieck ABP beinahe gleichschenkelig und der Winkel  $\vartheta$  sehr klein. Einerseits gilt:  $\sin\vartheta = s/d$ ; andererseits gilt  $\tan\vartheta = y/L$ . Meist sind die Winkel so klein, dass die Näherung  $\sin\vartheta = \tan\vartheta$  gilt.

Dann kann man  $s/d \approx y/L$  setzen.

Bei Auslöschung ist  $s$  ein ungerades Vielfaches der halben Wellenlänge. Für die erste destruktive Interferenz mit  $s = \lambda/2$  wird dann:  $(\lambda/2)/d \approx y/L$  und daraus  $\lambda = (2d \cdot y)/L$ .

**EXPERIMENT:** In einem Schulexperiment benützt am bequemsten einen Laser als Lichtquelle. Auf der Wand hinter den Doppelspalt ist das Interferenzmuster als Abfolge von hellen und dunklen Linien zu sehen. Benutzt man drei Laser gleichzeitig, erhält man das komplexe, von vorn aufgenommene, Bild nebenan. Gestrichelt ist die Symmetrieachse des Experiments eingezeichnet. Sie läuft durch die hellsten Punkte. Man erkennt deutlich, dass die dunklen Stellen mit der destruktiven Interferenz im grünen Licht näher beim Maximum liegen als beim orangen oder roten, weil die Wellenlänge kürzer ist.



Verwirrend ist, dass die Helligkeit nicht gleichmässig abnimmt, sondern mit rund 6 hellen Flecken auf Null sinkt und wieder auftaucht. Diese feine Struktur mit den Flecken hat mit der endlichen Breite der Spalten zu tun. Die Spaltenbreite ist rund  $1000 \lambda$ . Das ist bei der «Mathematischen Präzisierung» oben weggelassen worden, weil sonst alles viel komplizierter würde.

**AUSWERTUNG:** Die sehr kleine Wellenlänge  $\lambda$  lässt sich mit den bequem grossen Werten  $y$  und  $L$  bestimmen, wenn man den kleinen Abstand  $d$  der beiden Spalten genügend genau kennt. Im Schulzimmer erhält man für grünes Licht mit der ersten destruktiven Interferenz die runden Werte:

$$L = 8 \text{ m}, y = 2.5 \text{ mm}, d = 1 \text{ mm}.$$

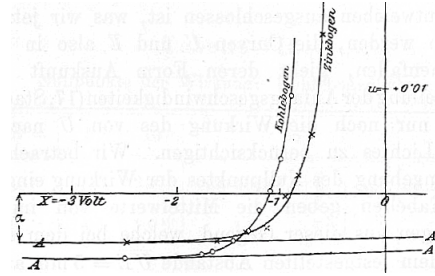
Man findet gerundet:  $\lambda = (2d \cdot y)/L = 2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ m} / 8 \cdot 10^0 \text{ m} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ m}.$

**BILANZ:** Das sind auch 600 nm oder 0.6  $\mu\text{m}$ , also etwa ein halber Tausendstelmillimeter: Haarspalterei!

**EXPERIMENT 1.2: DIE EXPERIMENTE VON LENARD (UND MILLIKAN) IN ÄSTHETISCHER GESTALT**

**UMFELD:** Philipp Lenard war Professor in Kiel, als er die Experimente zum lichtelektrischen Effekt durchführte, die Albert Einstein später mit den Lichtquanten erklären konnte. Lenard benützte verschiedenfarbiges Licht um den Effekt bei verschiedenen Stoffen zu untersuchen. Neben an steht eine Abbildung aus jener Zeit. Im einfachen Experiment von 1.3 gibt es nur rotes oder ultraviolettes Licht und nur das Material Zink.

Der Amerikaner Robert Andrews Millikan ist durch die Bestimmung der elektrischen Elementarladung mit Öltröpfchen bekannt, für die er den Physik-Nobelpreis erhielt. Millikan hat auch Einsteins Beziehung (1.2) mit verschiedenen Lichtarten und Materialien mit grossem Aufwand im Vakuum untersucht, bestätigt und dabei den Wert von  $h$  genau bestimmt. Doch das überzeugte ihn nicht von der Richtigkeit der Lichtquantenhypothese. Auch er wollte jahrelang nicht an die Körnigkeit des Lichts glauben!



**EXPERIMENT:** Das LEGO-LED-Spektrometer nach Klemens Koch ([www.vsn-shop.ch/produkte](http://www.vsn-shop.ch/produkte)) ermöglicht Erzeugung und Verwandlung von verschiedenfarbigem, sichtbarem Licht bequem zu verfolgen. Die Dinger, in denen die Elementarprozesse «Erzeugung von Licht» und «Verwandlung von Licht» geschehen, sind Leuchtdioden. Sie sind im Innern wesentlich komplexer als eine Zinkplatte, aber von Bedeutung ist nur, dass es in ihnen Elektronen in Energiestufen hat. Die LEDs müssen immer in Serie mit einem Widerstand an die elektrische Quelle (z. B. 9 V-Batterie) angeschlossen werden, damit kein zu grosser Strom fliesst. Am langen Draht ist der +Pol anzuschliessen.



(1) Wir **erzeugen** 7 Sorten Licht mit verschiedenen Farben, also verschiedenen Wellenlängen und Frequenzen. Gemäss (1.2) erzeugen wir damit 7 Sorten Lichtquanten, von den roten Quanten mit wenig Energie bis zu den violetten Quanten mit viel Energie.

(2) Wir versuchen, das Licht aller 7 Sorten in 3 verschiedenen LEDs zu **verwandeln**. Wenn das gelingt, können wir mit dem Messgerät ein elektrisches Signal feststellen. Das ist einfacher als die Entladung eines Elektroskops zu beobachten, die immer durch die feuchte Luft gestört wird. Als Messgerät benötigen wir ein Voltmeter mit 3 V Vollausschlag und einem hohen Innenwiderstand.

**AUSWERTUNG:**

Wir stellen fest, dass die **Verwandlung nur gelingt**, wenn die auslösenden Quanten die **gleiche oder eine höhere Energie** besitzen als die Quanten, die die LED selber aussenden kann. Rotes Licht kann kein Signal bei der grünen LED erzeugen, auch wenn wir viel rotes Licht drauf leuchten; alles Licht gibt ein Signal an der roten LED; nur blaues und violettes Licht erzeugt an der blauen LED ein Signal.

**BILANZ:**

- (1) Mit LEDs kann offensichtlich kein Perpetuum mobile betrieben werden.
- (2) Die LEDs gehorchen den gleichen Prinzipien wie der fluoreszierende Kristall (Gesetz von Stokes).
- (3) Ein Experiment allein kann unter Umständen sogar einen Nobelpreisträger nicht von der Richtigkeit einer Theorie überzeugen...

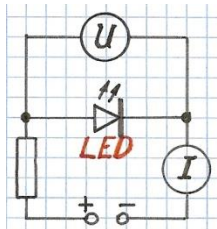
**WARNUNGEN:**

Wie alle Experimente, so werfen auch Experimente mit Vakuumphotozellen (im Abschnitt «Umfeld») oder mit Leuchtdioden (im Abschnitt «Experiment») oben und im «Experiment 1.3») Fragen auf, wenn man sie nur genau genug studiert. Im Buch ALLASTEN DER PHYSIK (Herrmann et al., 2012) setzen sich die Autoren kritisch mit diesen Experimenten auseinander. In «9.1 Der photoelektrische Effekt» empfehlen sie: «Man macht das Experiment gar nicht.» Ihre Analyse in «9.2 Die Planck-Konstante mit LED's bestimmen» führt zum Befund: «Dass die Gerade, die man erhält, durch den Ursprung geht, wie es oft gefunden wird, ist ein Zufall.» - Die *Steigung* der Geraden im Experiment 1.3 ist aber informativ.

**EXPERIMENT 1.3: EXPERIMENTELLE BESTIMMUNG DES WERTS DES WIRKUNGSQUANTUMS  $h$**

**UMFELD:** Die einfachste Diode besteht aus einem Platindraht, der auf einen Bergkristall drückt. Sie wird anfangs 20. Jahrhundert in Kristalldetektor-Radioempfängern eingesetzt. Eine Leuchtdiode (light emitting diode LED) ist ein kleiner Kristall aus Galliumarsenid oder einem anderen Halbleiter (→ MINT 3) mit der Eigenschaft, dass er den elektrischen Strom nur in einer Richtung durchlässt (Pfeilrichtung im Symbol der Diode). Wenn Strom fließt, wird in der LED mit einem hohen Wirkungsgrad elektrische Energie in Licht umgewandelt. Je nach Kristallart entsteht Licht unterschiedlicher Farbe. Dabei gilt Einsteins Gesetz (1.2) zur «Erzeugung von Licht»  $E = h \cdot f = hc/\lambda$ .

**EXPERIMENT:** Wir schliessen eine blaue, eine grüne und eine IR-LED an eine Spannung  $U$  und erhöhen sie, bis die Diode zu leuchten anfängt. Dann fängt auch der Strom  $I$  an zu fließen. Jedes Elektron vermag nun ein Lichtquant zu erzeugen.

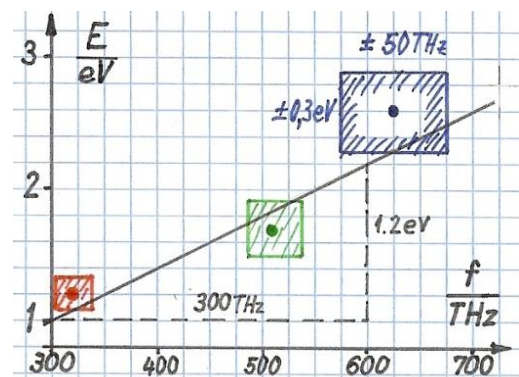


- (1) Wir stellen **qualitativ** fest, dass die Erzeugung von blauem Licht eine höhere Spannung benötigt, als die von grünem oder gar infrarotem Licht. Das stimmt überein mit der Gleichung (1.2): Eine höhere Spannung bedeutet energiereichere Elektronen zur Erzeugung energiereicherer Lichtquanten.
- (2) Für die **quantitative** Überprüfung von (1.2) sind Messungen nötig. Die Farbe der Leuchtdiode wird durch die Wellenlänge respektive die Frequenz des Lichts

gegeben. Wir stützen uns der Einfachheit halber auf die Informationen des Herstellers. Er sagt, die blaue LED leuchte mit 625 THz. Weil aber die LED kein Laser ist, strahlt sie mit etwa  $\pm 50$  THz um den Mittelwert herum. Entsprechend schwanken auch die Frequenzen der grünen und der IR-Diode um 510 THz resp. 300 THz.

Mit dem V-Meter messen wir die Spannung, bei der die Diode zu leuchten anfängt. Das A-Meter hilft uns, diesen Punkt einigermaßen genau zu bestimmen. Die blaue LED beginnt bei 2.6 V zu leuchten. Dabei müssen wir eine Schwankung von  $\pm 0.3$  V veranschlagen. Entsprechend liegen die Werte der grünen und der IR-Diode bei  $1.7 \pm 0.2$  V resp.  $1.2 \pm 0.1$  V.

**AUSWERTUNG:** Ausgehend von (1.2) tragen wir die Spannung, bei der das Leuchten einsetzt, als Funktion der Leuchtfrequenz auf. Aus der Spannung schliessen wir direkt auf die Energie, die zur Erzeugung der Lichtquanten nötig ist. Von der Elektrizitätslehre ist die Definition der elektrischen Spannung bekannt:  $U = E/q$ . Daraus wird  $E = qU$ . Durchläuft ein Elektron mit der Elementarladung  $q$  die Spannung  $U = 1$  V, setzt es die Energie  $E = qU = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1 \text{ eV}$  um.



Um den Messpunkt [625;2.6] zeichnen wir das Rechteck, in dem der wahre Wert infolge der **unvermeidlichen Messungenauigkeit** schwanken wird. Ebenso das Rechteck für die grüne LED um [510;1.7] und dasjenige für die Infrarot-LED um den Punkt [320;1.2].

Einsteins Gleichung (1.2) ist mathematisch gesehen eine lineare Funktion  $y = ax$ . In der Mathematik müssten die drei Messpunkte genau auf einer Geraden liegen. In Realität gibt es noch unbekannte Prozesse und alle Messvorgänge sind nur begrenzt genau. Wir können aber die Gerade so legen, dass sie durch die Rechtecke läuft. In  $E = hf$  ist  $h$  das Steigungsmass. Im eingezeichneten Steigungsdreieck wird  $h = 1.2 \text{ eV} / 300 \text{ THz}$ . Rechnen wir eV in Joule um, erhalten wir  $h = 6.4 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ . Das ist beachtlich nahe beim publizierten Wert. Allerdings fordert die direkte Proportionalität  $y = ax$  eine Gerade durch den Ursprung, während unsere Gerade nebendurch läuft.

Mit Leuchtdioden können wir Einsteins Gesetz und den Wert  $h = 6.4 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$  bestätigen.

**BILANZ:** Unter der Annahme, dass die Energie der Elektronen in einer Leuchtdiode vollständig in die Energie von Lichtquanten übergeht, kann man mit handelsüblichen Leuchtdioden Einsteins Gleichung (1.2) bestätigen und den Wert von Plancks Konstante mit weniger als 10% Ungenauigkeit bestimmen.

**ABSCHNITT 1.4 und/oder 1.6: SIMULATION ZUR TEILCHEN-WELLE-DUALITÄT**

Gehen Sie zum Angebot QuVis der St. Andrews University in Schottland:

**GELB HERVORGEHOBEN** = Stichwort in der Simulation

**Interferometerexperimente mit Photonen, Teilchen und Wellen**

<https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/de/simulations/sims/photons-particles-waves-de/photons-particles-waves-de.html>

Gehen Sie in der Menuleiste auf **Simulation**. Wählen Sie den Button **Einführung** und führen Sie aus, was angeboten wird.

**Hinweise:**

(1) Mehrmals taucht der Begriff **PHASE** auf. Die Phase ist von Bedeutung, wenn man zwei Wellen vergleicht. Haben beide gleichzeitig entweder ein Maximum oder ein Minimum, sind sie in Phase. Die Phasenverschiebung beträgt dann 0 Grad. Hat die eine ein Minimum, wenn die andere ein Maximum besitzt, beträgt die Phasenverschiebung 180 Grad oder  $\pi$ . Hat die eine den Nulldurchgang, wenn die andere ein Maximum besitzt, ist die Phasenverschiebung 90 Grad oder  $\pi/2$  usw

(2) «Koinzidenz» bedeutet «zusammentreffen». Beide Detektoren registrieren gleichzeitig ein Signal.

Klicken Sie nun auf den Button **Steuerung**. Untersuchen Sie, was mit **klassischen Wellen**, **elektromagnetischen Wellen** und **Photonen** ohne und mit Strahlteiler 2 geschieht. Verändern Sie auch die Phasenverschiebung im untern Strahlengang.

Wie unterscheiden sich Photonen von klassischen Teilchen?

Zur Repetition und Zusammenfassung wechseln Sie in der Menuleiste auf **Anleitung**.

Stellen Sie am Eingang die Varianten 1, 2 und 3 ein (Kreise rechts unten):

**klassische Teilchen**, dann **elektromagnetische Welle**, dann **einzelne Photonen**

Wenn Sie Zeit haben, können Sie die Varianten 4 und 5 ausprobieren.

Wechseln Sie in der Menuleiste zurück zu **Simulation** und wählen Sie den Button **Steuerung**.

Führen Sie die Simulationen mit **klassischen Teilchen** durch.

Führen Sie die Simulationen mit **einzelnen Photonen** durch.

Wie unterscheiden sich Photonen von klassischen Teilchen?

Offenbar besitzen Photonen eine Phase.

**Hinweis für kritische Schülerinnen und Schüler:**

Wieso geht die gesamte Strahlung einseitig in den Detektor 2, wenn im unteren Strahlengang dieser scheinbar symmetrischen Anordnung kein Phasenschieber für eine Phasenverschiebung (\*) eingebaut wird? – Die Strahlteiler sind nicht symmetrisch! Es kommt darauf an, ob die 50%-spiegelnde Seite beim einlaufenden oder beim auslaufenden Strahl ist! Ist sie beim einlaufenden Strahl, erfährt der reflektierte Anteil einen Phasensprung von  $\pi$  oder 180°, wie bei einem 100%-Oberflächenspiegel. Ist sie aber beim auslaufenden Strahl, erfährt der reflektierte Strahl ebenso keinen Phasensprung, wie der transmittierte, durchlaufende Strahl. Würde man den Strahlteiler 2 so montieren, wie den Strahlteiler 1, würde die gesamte Strahlung in den Detektor 1 gelenkt.

(\*) Mehr zum Begriff «Phase» steht auf der folgenden Seite.

**ERGÄNZUNGEN:****Abschnitt 1.1: Simulationen zum Doppelspalt**

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/quantum-wave-interference>

**Abschnitt 1.3: Simulationen zum Photoeffekt**

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/photoelectric>

**Abschnitt 1.4: Simulation zum Einzelphoton**

Gehen Sie zum Angebot QuVis der St. Andrews University in Schottland:

<https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/>

Wählen Sie LEVEL **Introductory** und LANGUAGE **German**.

Als Ergänzung zum Photon eignet sich die Simulation:

**Einzelphotonen Labor**

<https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/de/simulations/sims/single-photon-lab-de/single-photon-lab-de.html>

**Hinweis:** Klicken auf die **Fragezeichen** bringt Erklärungen hervor und hilft manchmal weiter.

Experimentieren Sie auf dem **Optischen Tisch 1**

mit **einzelnen Photonen**, mit **100 Photonen** und mit einem **Strom von Photonen**

Neubeginn mit **Alle Bauteile zurücksetzen!**

Verzichten Sie zuerst aufs Einbauen von Phasenschiebern!

Vergleichen Sie die zwei Werte **beobachtete Wahrscheinlichkeiten** und **asymptotische Wahrscheinlichkeiten**

Welche Wirkung hat der Einbau eines zweiten Strahlteilers?

Wenn Sie Zeit und Lust haben, können Sie den Wellenaspekts der Photonen untersuchen. Die Welle-Teilchen-Dualität ist allerdings auch das Thema der Simulation zum Abschnitt 1.6:

Experimentieren Sie auf dem **Optischen Tisch 2**

mit **einzelnen Photonen**, mit **100 Photonen** und mit einem **Strom von Photonen**

Experimentieren Sie jetzt mit den **Phasenschiebern**.

**Hinweis:**

Mehrmals taucht der Begriff **PHASE** auf. Die Phase ist von Bedeutung, wenn man zwei Wellen vergleicht. Haben beide gleichzeitig entweder ein Maximum oder ein Minimum, sind sie in Phase. Die Phasenverschiebung beträgt dann 0 Grad. Hat die eine ein Minimum, wenn die andere ein Maximum besitzt, beträgt die Phasenverschiebung 180 Grad. Hat die eine den Nulldurchgang, wenn die andere ein Maximum besitzt, ist die Phasenverschiebung 90 Grad usw.

Welche Wirkung hat der Einbau von Phasenschiebern?

### NACHDENKEN ÜBER PHYSIK 1: PHYSIK UND TECHNIK

Die Leuchtdioden, die man heute sogar in Schuhen einbaut, gibt es nur dank Forschung. Aber es ist nicht immer so, dass technischer Fortschritt erst nach vorangegangener Grundlagenforschung geschieht: Edison beispielsweise entwickelt die Glühlampe in seinem privaten Industrielabor in New Jersey *bevor* die staatliche Physikalisch-Technische Reichsanstalt in Berlin den Betrieb aufnimmt, die Wärmestrahlung genau vermisst und Planck die Quanten erfindet.



Sicher ist, dass alle technischen Geräte den Gesetzen der Physik gehorchen. Deshalb wird der Physiker Einstein als technischer Experte III. Klasse im Eidgenössischen Patent-

amt in Bern angestellt, wo er beispielsweise das Patent Nr. 39561 für eine Kies-sortiermaschine überprüft. Einstein ist auch technisch kreativ und entwickelt und patentiert mit einem Freund ab 1907 ein «Maschinchen» zur Messung von kleinsten Spannungen. Doch die Prototypen funktionieren unsicher und das Projekt wird zum finanziellen Flop. Technik ist oft komplex. Im Gegensatz zur Wissenschaft muss Technik rentieren. Patente, die gute Ideen als geistiges Eigentum schützen, sind wirtschaftlich wichtig. Manchmal helfen sie allerdings bloss die Monopole der Mächtigen zu schützen. In den Anfängen der Elektrizitätsversorgung kann Edison mit GENERAL ELECTRIC das Monopol für das Gleichstromsystem gegenüber dem Wechselstromförderer Nicolai Tesla verteidigen. Heute verteidigt MICROSOFT mit finanziell grossem Erfolg sein Betriebssystem WINDOWS als weltweiten Standard.



#### Was ist Technik?

**Technik will** helfen, **Probleme der Gesellschaft zu lösen**. Das Problem kann sein, Lebensmittel für lange Zeit zu konservieren. Dieses Problem kann mit biologischen (Vergärung), chemischen (Salzen) oder physikalischen (Vakuum) Methoden angegangen werden. Dementsprechend gibt es neben der Beziehung zur Physik auch Verbindungen zwischen Technik und Chemie, Biologie, Geologie usw. Diese **Wissenschaften wollen** über Alltagsprobleme hinaus die **Gesetze der Natur finden**.

Grundsätzlich kann jede physikalische Erkenntnis technisch genutzt werden. Die Bauleute in Babylon und Ägypten arbeiten mit dem Hebelgesetz *bevor* es mathematisch formuliert ist. Archimedes, der allererste Physiker, nutzt das von ihm entdeckte Auftriebsgesetz technisch: Er zeigt seinem Chef, dem



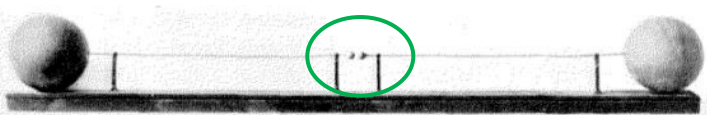
König Hieron von Syracus, wie man einen Goldschmied kontrollieren kann, ob er allenfalls Gold entwendet und durch Silber ersetzt. **Der wissenschaftliche Fortschritt stimuliert neue Technik** – und bessere Geräte ermöglichen umgekehrt raffiniertere Experimente. Der Laser beispielsweise wird heute sowohl in der Quantenphysik als auch in der Chirurgie eingesetzt.

Jede physikalische Erkenntnis kann technisch zu friedlichen oder kriegerischen Zwecken genutzt werden. Schon Hieron von Syracus hilft mit, Verteidigungsmaschinen gegen die angreifenden römischen Kriegsschiffe zu bauen. Jahrhunderte später bietet Galileo Galilei sein Fernrohr umgehend der venezianischen Marine an. Diese erkennt den Nutzen, wenn man die Bewaffnung des Feindes von weitem abschätzen konnte und entlohnt ihn fürstlich. Die wissenschaftliche Entdeckung mit dem Fernrohr, die Mondkrater, trägt Galilei hingegen nur Ärger mit der katholischen Kirche ein.

Im letzten Jahrhundert sind zwei wissenschaftliche Grossprojekte zu militärischen Zwecken lanciert worden: der Bau der Atombombe und der Flug zum Mond. Aktuell geht es bei Quantencomputern nicht nur um wissenschaftliche Erkenntnis, sondern auch um mögliche Anwendungen im Cyberwar.

#### Technischer Fortschritt stimuliert Wissenschaft und umgekehrt.

Der wissenschaftliche Fortschritt stimuliert neue Technik, und bessere Geräte ermöglichen raffiniertere Experimente. Heute ist es oft so, wie bei Marconi: Erst nachdem die Grundlagenforschung von Heinrich Hertz zeigt, dass es elektromagnetische Wellen gibt, kann er erfolgreich Sendeanlagen bauen.



Das Bild zeigt den historischen Funkensender. Es ist kein Zufall, dass «Radio» im Deutschen «Rundfunk» heisst. Elektronen müssen in der Sende-

antenne hin- und her pendeln. Damit sie sich nicht ausgleichen, sind sie durch die Luft zwischen zwei kleinen Kugeln in der Mitte getrennt. Dort müssen sie als Funken durch die Luft springen. Heinrich

Hertz bemerkt, dass der Funke leichter springt, wenn er die kleinen Kugeln mit UV-Licht bestrahlt. Sein Assistent Lenard untersucht das genauer und findet den Fotoeffekt. Die Fortsetzung ist bekannt. Wichtig ist zu wissen, dass sich Technik manchmal auch ohne wissenschaftliche Grundlagen entfaltet. Dampfmaschine und Explosionsmotor, aber auch Zahnimplantate und Computer, Batterie und Glühlampe usw. werden von genialen Tüftlern erfunden und perfektioniert.

**Berufe in der Technik sind kreativ**



Techniker und Ingenieur – bei uns nur langsam auch Frauenberufe – haben einen spezifisch kreativen Umgang mit der Aufgabe, **ein komplexes Problem zu lösen**, beispielsweise in trockenen Gebieten Trinkwasser zu liefern. Sie müssen dabei nicht bloss die Gesetze der Natur und des Wirtschaftens beachten, sondern auch die Rahmenbedingungen der Politik (Gesundheitsgrenzwerte usw.). Die Lösungen müssen betriebssicher sein, reparierbar, kontrollierbar, abbaubar – und natürlich möglichst wenig kosten. Am Schluss entscheiden immer die Menschen darüber, ob eine Technik auch genutzt wird – und ob diese Nutzung allenfalls unvorhergesehene Probleme schafft.

**Forschung und Entwicklung in Gesellschaft und Politik**

Wenn die Politik die Menschen vor technischen Gefahren, z. B. Strahlung der Handy-Antennen in der Tabelle rechts, schützen muss, braucht sie wissenschaftliche Grundlagen. Wie wichtig die enge Verbindung von Wissenschaft und Technik für die Wirtschaftspolitik heute ist, kommt beispielsweise zum Ausdruck in «Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Technologie» oder im «Wissenschafts- und Innovationsrat». Dementsprechend ist der Übergang von «reiner Forschung» über die «angewandte Forschung» zur «reinen Technik», oder vornehmer «Technologie», fließend.

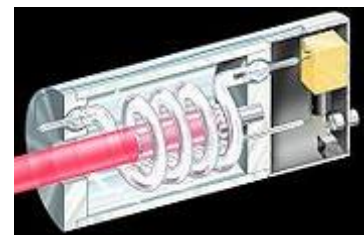
IEEE Standard	802.11a	802.11b
Max. Sendeleistung (mW)	200	100
Gemittelte Sendeleistung Beacon (mW)	1	0,5
Gemittelte Sendeleistung max (mW)	< 200	< 100
Frequenz (MHz)	5150 – 5250	2400 – 2483,5
Reichweite(m)	50	bis 200

Oft wird erst mit grosser zeitlicher Verschiebung aus reiner Forschung, beispielsweise zu den Lichtquanten, eine industrielle Technologie, beispielsweise die Solartechnik. Nicht selten wird aus weitabliegenden Forschungsgebieten plötzlich militärische Geheimtechnologie. Einsteins Relativitätstheorie ist eine wichtige Grundlage für das GPS, das vom amerikanischen Militär zur Lenkwaffensteuerung entwickelt worden ist. Daher gab und gibt das Militär Geld für Relativitätsforschung aus.

**Forschung in privaten und staatlichen Labors ausserhalb und innerhalb von Universitäten**

Im 20. Jahrhundert entstehen Labors von Industriebetrieben zur Förderung der Angewandten Physik.

Aus Edisons Labor wird BELL-Lab; Tesla wirkt für die Konkurrenz WESTINGHOUSE. Das Universalgerät Laser (→ 1.6) baut Theodore Maiman zuerst im privaten Research Laboratory des Milliardärs Howard Hughes. Das Ding scheint anfänglich so unnütz, dass Maiman erst Forschungsgeld erhält, als er mit der Kündigung droht! (In seinem Gerät findet der Laser-



prozess im zentralen Rubin-Stab statt.) Heute gibt es spezielle Laser für jeden Verwendungszweck: Als unentbehrliches Gerät für die Augenchirurgin und ebenso als gefährliche Antiraketen-Waffe für Generäle. 2018 gibt es Nobelpreise für Ideen zum Bau

leistungsfähigerer und schnellerer Laser. Einer geht an Donna Strickland, Physikingenieurin und Professorin an der öffentlichen University of Waterloo, Canada.

**Zum Nachdenken und Diskutieren:**

- 1a) Stimmt folgender Ablauf beim Wirkungsquantum: *Technisches Problem > angewandte experimentelle Forschung > reine Forschung > experimentell gestützte Theorie > fundamentale Theorie?*
- b) Stimmt er für Medizintechnik oder für Klettertechnik oder für Chemietechnik?
- 2) Skizzieren Sie, in welcher Weise die Benützung des Telefons in Ihrer Lebensspanne geändert hat.
- 3) Die griechische Mythologie kennt die zwei Gottheiten Pallas Athene und Prometheus. Repräsentieren diese Gottheiten Wissenschaft und Technik auch in unserem modernen Sinn?