

Skripte zur Physik
Moderne Physik

von
Christian Wyss

Skripte zur Physik
Moderne Physik

von

Christian Wyss



mathema



© 2024 Dr. Christian Wyss

Verlagslabel: mathema (www.mathema.ch)

ISBN Hardcover: 978-3-384-20111-9
Paperback: 978-3-384-20110-2

Auflage 1.2

Druck und Distribution im Auftrag des Autors:
tredition GmbH, Heinz-Beusen-Stieg 5, 22926 Ahrensburg, Germany

Das Werk, einschliesslich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Für die Inhalte ist der Autor verantwortlich. Jede Verwertung ist ohne seine Zustimmung unzulässig. Die automatisierte Analyse des Werkes, um daraus Informationen, insbesondere über Muster, Trends und Korrelationen gemäss §44b UrhG („Text und Data Mining“) zu gewinnen, ist untersagt. Die Quellen der Bilder und deren Lizenzen sind im Anhang aufgeführt. Die Publikation und Verbreitung erfolgen im Auftrag des Autors, zu erreichen unter:

Dr. Christian Wyss, Chemin du Clos 60, 2502 Biel-Bienne, Schweiz.

Die Philosophie steht in diesem grossen Buch geschrieben, das unserem Blick ständig offen liegt – ich meine das Universum –; aber das Buch ist nicht zu verstehen, wenn man nicht zuvor die Sprache erlernt und sich mit den Buchstaben vertraut gemacht hat, in denen es geschrieben ist. Es ist in der Sprache der Mathematik geschrieben, und deren Buchstaben sind Kreise, Dreiecke und andere geometrische Figuren, ohne die es dem Menschen unmöglich ist, ein einziges Bild davon zu verstehen; ohne diese irrt man in einem dunklen Labyrinth herum.

Galileo Galilei: „*Il Saggiatore*“ (1623)

Inhaltsverzeichnis

Einleitende Worte

Zu den Inhalten der Skripte

- I. Quantentheorie
- II. Atomphysik
- III. Spezielle Relativitätstheorie
- IV. Allgemeine Relativitätstheorie
- V. Teilchenphysik
- VI. Kosmologie

Ergänzende Bemerkungen

Demonstrationsexperimente

Schlussworte

Einleitende Worte

Die Skripte zur Physik sind im Rahmen des gymnasialen Unterrichts entstanden und sind primär als **unterrichtsbegleitendes Material** konzipiert. Sie können jedoch auch als eigenständiges Lern- und Übungsmaterial eingesetzt werden.

Die Skripte enthalten **Lückentexte**. Sie dienen der Festigung des erworbenen Wissens und sollten im Plenum mit der gesamten Klasse ausgefüllt werden. Diese handschriftlichen Einträge helfen, die Schlüsselbegriffe und Aussagen zu verinnerlichen und Herleitungen und Beweise besser nachzuvollziehen.

Zu den Inhalten

Quantentheorie

Behandelte Inhalte

Das vorliegende Skript führt in die Konzepte der Quantenmechanik ein. In einem ersten Schritt wird verdeutlicht, dass sowohl Materie als auch Licht Eigenschaften von Teilchen wie auch von Wellen aufweisen, die sich gegenseitig ausschliessen. Dafür werden der Photoeffekt und das Doppelspalteinperiment im Detail erläutert. Erste Anwendungen behandeln die Röntgenröhre und das Elektronenmikroskop. Energie und Impuls von Quantenobjekten werden diskutiert und der scheinbare Widerspruch des Teilchen-Wellen-Dualismus wird mithilfe der Wellenfunktion aufgelöst. Des Weiteren werden Quanteneffekte wie der Compton-Effekt, das Zerfließen des Wellenpakets, der Tunneleffekt und die Unschärferelation behandelt. Weitere wesentliche Anwendungen der Quantentheorie werden im Skript zur Atomphysik beschrieben. Der Zugang zur Materie erfolgt hier eher intuitiv als streng formal.

Notwendiges Vorwissen

Dieses Skript setzt eine gewisse Vertrautheit mit den Grundlagen der klassischen Mechanik, der Wellenlehre und den Grundbegriffen der Elektrizitätslehre voraus. Es wird davon ausgegangen, dass die Begriffe (kinetische) Energie und Impuls, Wellenlänge und Frequenz, Spannung und Strom bekannt sind. Darüber hinaus werden Grundkenntnisse in Algebra, Trigonometrie und Wahrscheinlichkeitsrechnung vorausgesetzt. Es wird empfohlen, die Quantentheorie erst auf fortgeschrittenem Niveau zu behandeln, da ein grundlegendes Verständnis naturwissenschaftlicher Konzepte vorausgesetzt wird und der Abstraktionsgrad teilweise recht hoch ist.

Atomphysik

Behandelte Inhalte

Zunächst werden historische Atommodelle diskutiert, darunter das Dalton'sche, das Thomson'sche sowie das Rutherford'sche Modell. Anschliessend werden Atomspektren und das Franck-Hertz-Experiment betrachtet, um das Bohr'sche Atommodell zu motivieren. Dieses wird mithilfe der de Broglie-Bedingung hergeleitet. Ein korrektes quantenmechanisches Atommodell wird anschliessend anhand des unendlich tiefen Potentialtopfes plausibilisiert. Damit wird eine Vielzahl von Effekten erklärt, darunter die kovalente Bindung, die Lumineszenz, das Periodensystem etc. Zum Schluss wird eine kurze Einführung in die Laserphysik präsentiert.

Notwendiges Vorwissen

Dieses Skript setzt eine gewisse Vertrautheit mit den Grundlagen der klassischen Mechanik, der Wellenlehre und den Grundbegriffen der Elektrizitätslehre voraus. Es wird davon ausgegangen, dass die Begriffe (kinetische) Energie und Impuls, Wellenlänge und Frequenz, Spannung und Strom bekannt sind. Zudem werden Kenntnisse der Grundidee der Quantentheorie vorausgesetzt. Es wird empfohlen, die Atomphysik erst auf fortgeschrittenem Niveau zu behandeln, da ein grundlegendes Verständnis naturwissenschaftlicher Konzepte vorausgesetzt wird und der Abstraktionsgrad teilweise recht hoch ist.

Spezielle Relativitätstheorie

Behandelte Inhalte

Dieses Skript führt in die spezielle Relativitätstheorie ein. Es diskutiert die Postulate der speziellen Relativitätstheorie und leitet die Zeitdilatation sowie die Längenkontraktion her und untersucht sie eingehend. Darüber hinaus wird die Energie-Massenäquivalenz studiert und anhand von angewandten Aufgaben vertieft. Die Thematik wird zweifach diskutiert: zunächst werden die Zeitdilatation und Längenkontraktion eher intuitiv anhand einer Lichtuhr hergeleitet. Anschliessend wird der Dopplereffekt direkt aus den Postulaten der speziellen Relativitätstheorie abgeleitet und die Energie-Impuls-Relation formal streng, jedoch immer noch verhältnismässig einfach zugänglich, behandelt.

Notwendiges Vorwissen

Dieses Skript setzt eine gewisse Vertrautheit mit den Grundlagen der klassischen Mechanik sowie der Wellenlehre (insbesondere dem Dopplereffekt) voraus. Es wird davon ausgegangen, dass die Begriffe (kinetische) Energie, Impuls, Wellenlänge und Frequenz bekannt sind. Zudem muss für einige Herleitungen die Energie eines Photons $E = hf$ bekannt sein. Für einige wenige Gedanken sind Kenntnisse zu den Taylor-Reihen notwendig. Diese können jedoch problemlos übersprungen werden. Es wird empfohlen, die spezielle Relativitätstheorie erst auf fortgeschrittenem Niveau zu behandeln, da ein grundlegendes Verständnis naturwissenschaftlicher Konzepte vorausgesetzt wird und der Abstraktionsgrad teilweise recht hoch ist.

Allgemeine Relativitätstheorie

Behandelte Inhalte

Dieses Skript führt in die allgemeine Relativitätstheorie ein. Im ersten Abschnitt werden das Äquivalenzprinzip und seine Konsequenzen behandelt, einschliesslich der Ableitung der Lichtablehnung im Gravitationsfeld und der gravitativen Zeitdilatation mittels semiklassischer Herleitungen. Anschliessend werden die Grundkonzepte der Differentialgeometrie intuitiv und formal wenig streng erläutert. Der abschliessende Teil widmet sich den Grundprinzipien der Allgemeinen Relativitätstheorie, wobei auf die Lorentz-Transformation und die Raum-Zeit-Krümmung eingegangen wird. Zudem wird angedeutet, wie die Beschreibung mithilfe der Einstein'schen Feldgleichungen gelingt.

Notwendiges Vorwissen

Dieses Skript setzt eine gewisse Vertrautheit mit den Grundlagen der klassischen Mechanik sowie der Wellenlehre (insbesondere dem Dopplereffekt) voraus. Es wird davon ausgegangen, dass die

Begriffe (kinetische) Energie, Impuls, Wellenlänge und Frequenz bekannt sind. Die Konzepte der speziellen Relativitätstheorie müssen vertraut und für einige Herleitungen muss die Energie eines Photons $E = h \cdot f$ bekannt sein. Für einige wenige Gedanken sind Kenntnisse der Differentialrechnung und der Taylor-Reihen notwendig. Diese können jedoch übersprungen werden. Es wird empfohlen, die allgemeine Relativitätstheorie erst auf fortgeschrittenem Niveau zu behandeln, da ein grundlegendes Verständnis naturwissenschaftlicher Konzepte vorausgesetzt wird und der Abstraktionsgrad teilweise recht hoch ist.

Teilchenphysik

Behandelte Inhalte

Dieses Skript begibt sich auf eine Reise zu den kleinsten Teilchen, beginnend mit dem Atom und endend bei den Quarks. Im ersten Teil wird die Entwicklung der Atommodelle von der Antike über das Dalton- und das Thomson-Modell bis zum Rutherford'schen Atommodell dargelegt. Anschliessend werden der radioaktive Zerfall und die Nukleonen untersucht. Der 'Teilchenzoo' wird vorgestellt und klassifiziert. Zum Schluss wird auf die Quarks und das Standardmodell eingegangen.

Notwendiges Vorwissen

Dieses Skript erfordert kein Vorwissen aus dem gymnasialen Curriculum. Die an sich sehr komplexe Thematik wird eher phänomenologisch und ohne grossen mathematischen Aufwand behandelt. Es eignet sich daher für den Einsatz auf jeder Stufe.

Kosmologie

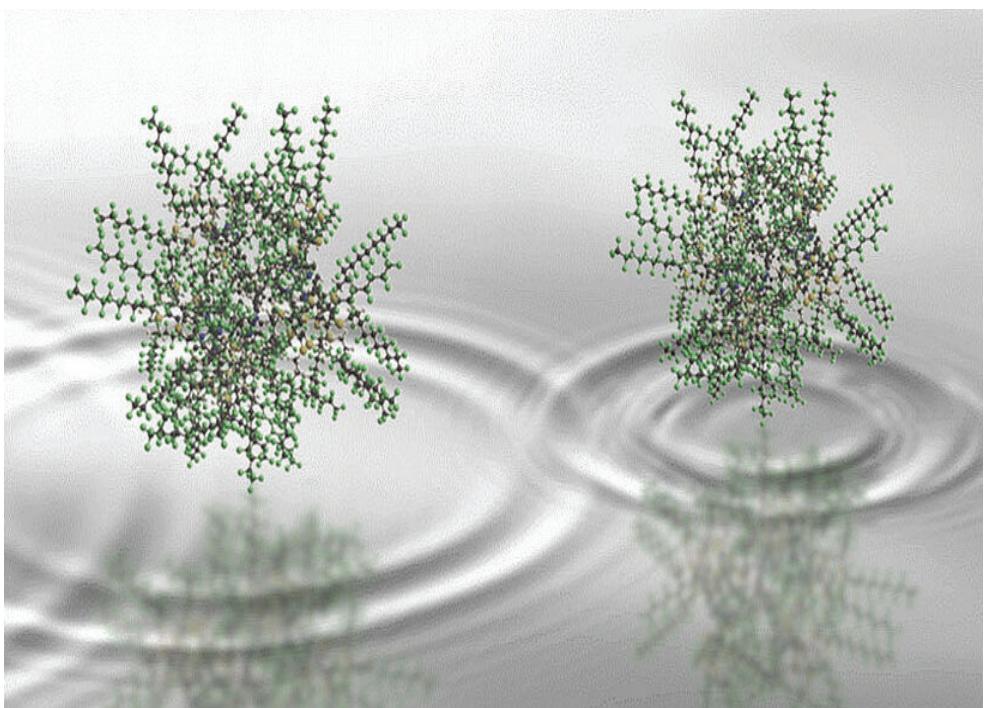
Behandelte Inhalte

Diese Einführung in die Kosmologie beginnt damit, die grundlegenden Methoden zur Durchführung kosmologischer Messungen, insbesondere Messungen von sehr grossen Distanzen, zu erläutern. Im zweiten Teil werden die empirischen Ergebnisse vorgestellt und anschliessend versucht, diese anhand der Urknall-Theorie zu erklären. Schliesslich wird die mathematische Beschreibung der Expansion des Universums erläutert. Dabei wird nicht auf die Einstein'schen Feldgleichungen oder die daraus abgeleiteten Friedmann-Lemaître-Gleichungen eingegangen, sondern die Differentialgleichung für den Skalenfaktor wird plausibilisiert und mittels Ansätzen gelöst.

Notwendiges Vorwissen

Nur minimale mathematische und physikalische Vorkenntnisse sind erforderlich. Lediglich für das letzte Kapitel – welches nicht zwingend behandelt werden muss – wird eine gewisse Vertrautheit mit Differentialgleichungen vorausgesetzt. Es wird jedoch empfohlen, diese Thematik erst auf fortgeschrittenem Niveau zu behandeln, da ein grundlegendes Verständnis naturwissenschaftlicher Konzepte vorausgesetzt wird und der Abstraktionsgrad teilweise recht hoch ist.

Quantentheorie



Gibt es in der Natur Zufall oder sind die Naturgesetze streng bestimmd (Determinismus)? Welche Beziehung gilt zwischen Ursache und Wirkung (Kausalität)? Gibt es physikalische Objekte, die physikalische Eigenschaften objektiv besitzen (Realität)? Die Quantentheorie wirft viele Fragen auf und beantwortet diese ganz anders als bis anhin. Der Quantentheorie liegen andere Vorstellungen von Materie und Strahlung zugrunde, als wir uns durch unsere Alltagserfahrung und von der klassischen Mechanik her gewohnt sind. Sie ist heute die empirisch bestbelegte physikalische Theorie.

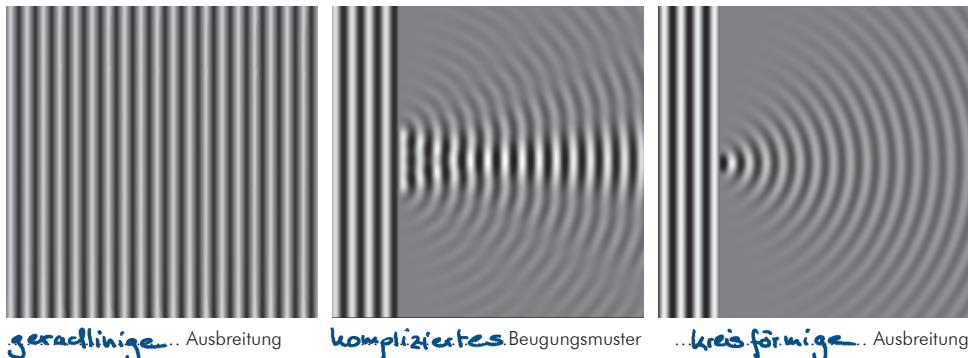
„Das Prinzip der Quantenuberlagerung wurde in einer neuen Studie von Wissenschaftlern der Universität Wien in Zusammenarbeit mit der Universität Basel in einem bisher unerreichten Massstab getestet. [...] komplexe Moleküle bestehend aus fast zweitausend Atomen [ber 25'000 u] wurden in eine Quantenuberlagerung gebracht und interferiert.“

1. Wellen und Teilchen

Ein erstes Experiment mit Licht: Beugung am Doppelspalt

Beugung hebt Schattengrenzen auf.

Mit der Wellenwanne studieren wir, wie sich Wellen beim Durchgang durch eine Öffnung verhalten. Es kann Beugung beobachtet werden:



Man beobachtet, dass die Welle in den geometrischen **Schatten**.....raum übergreift. Dieses Übergreifen in den Schattenraum heisst **Beugung**..... Das Phänomen wird umso stärker, je **kleiner**..... der Spalt ist. Es lassen sich zwei extreme Fälle unterscheiden:

Geradlinige Ausbreitung: Ist der Spalt wesentlich **grösser**..... als die Wellenlänge ($d \gg \lambda$), so breitet sich die Welle nach dem Spalt geradlinig aus.

Kreisförmige Ausbreitung: Ist der Spalt jedoch deutlich **kleiner**.... als die Wellenlänge ($d \ll \lambda$), so breitet sich nach dem Spalt eine Kreiswelle aus.

Jeder Punkt einer Wellenfront ist Ausgangspunkt einer Kreiswelle (**Huygens'sche Prinzip**).

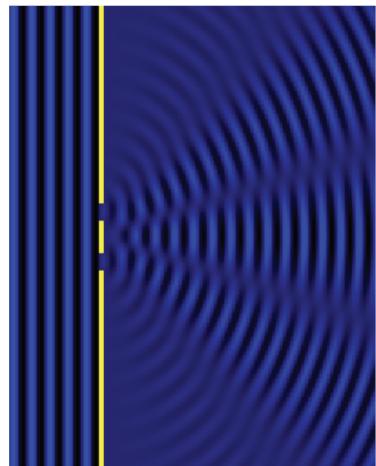


Christiaan Huygens (1629 – 95 Den Haag)
Astronom, Mathematiker und Physiker

Doppelspaltversuch von Young

Wir untersuchen Wellen in der Wellenwanne und lassen dabei eine ebene **Wasserwelle** gegen zwei nebeneinander liegende, sehr enge Öffnungen – einen Doppelspalt – laufen. Nach dem Doppelspalt beobachten wir ein kompliziertes Muster in der Wellenausbreitung.

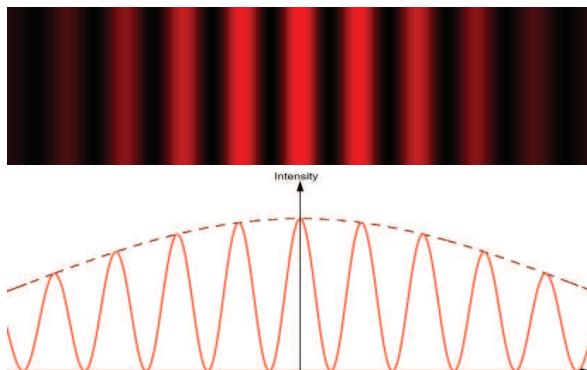
Hinter jeder Öffnung breitet sich eine Kreiswelle aus. Diese Kreiswellen laufen übereinander hinweg und bilden dabei ein Interferenzmuster (Beugungsmuster). Es gibt Gebiete mit **destruktiver** Interferenz, in denen sich die Wellen gegenseitig auslöschen. In anderen Gebieten kommt es zur **konstruktiver** Interferenz und es ergibt sich eine grosse Amplitude, die Beugungsmaxima.



Trifft eine Welle auf einen Doppelspalt, so entsteht ein Interferenzmuster. Dieses Muster kann nur bei einer ... **Welle** entstehen. Würde ein **Teilchen** strahl auf einen Doppelspalt treffen, so könnte kein solches Streifenmuster beobachtet werden.

Thomas Young führte 1802 dieses Doppelspaltexperiment erstmals mit Licht durch. Dabei traf Licht auf einen sehr feinen Doppelspalt. Hinter dem Doppelspalt entstand auf dem Schirm ein Muster aus abwechselnd hellen und dunklen Streifen. Dieses Experiment wurde zu einem der bedeutendsten Experimente in der Geschichte der Physik.

Wir lassen einen Laserstrahl auf einen Doppelspalt treffen und betrachten das entstehende Muster. Es entsteht ein Interferenzmuster. Licht wird an einem Doppelspalt gebrochen.



Thomas Young (* 1773 – † 1829) Arzt, Linguist, Physiker, Ägyptologe, Universalgenie: „The Last Man Who Knew Everything“.

Licht ist eine ... **Welle** und kann kein **Teilchen** sein.

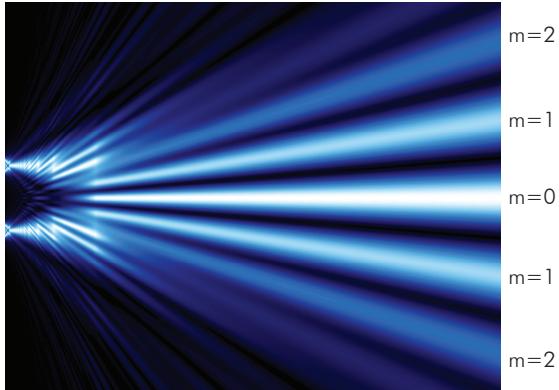
Aufgabe 1: Was für ein Muster würde sich auf dem Schirm zeigen, wenn ein Teilchenstrahl (z.B. die Tröpfchen aus einer Sprühdose) auf einen Doppelspalt trifft?

Beugung am Doppelspalt

Bei der Beugung am Doppelspalt entstehen Streifen mit hoher Intensität, die Beugungsmaxima. Die Winkel α , unter welchen diese **Intensitätsmaxima** auftreten, unterliegen der folgenden Bedingung:

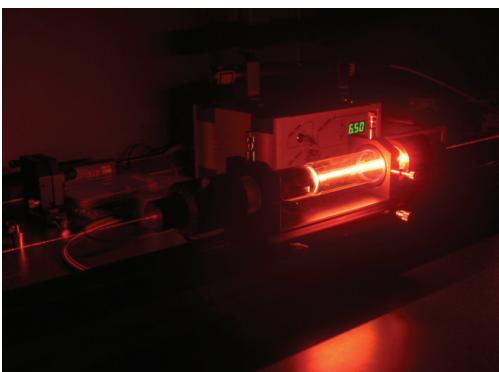
$$\sin(\alpha) = m \cdot \frac{\lambda}{d}$$

wobei der Abstand der Spalten, λ die Wellenlänge und $m = 0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots$ die Ordnung des Maximums bezeichnet.



Aufgabe 2: Rotes Licht eines Helium-Neon-Lasers ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$) wird an einem Doppelspalt gebeugt. Die Spalten haben einen Abstand von $2 \mu\text{m}$.

- Berechne die Winkel, unter welchen die Intensitätsmaxima erscheinen.
- Wie viele Intensitätsmaxima entstehen?
- Wie verändert sich der Winkelabstand zwischen den Maxima, wenn der Abstand der Spalten grösser gemacht wird, d.h. liegen die Maxima dichter?
- Spezielle Helium-Neon Laser emittieren grünes Licht ($\lambda = 543.5 \text{ nm}$). Liegen die Maxima bei der Beugung am Doppelspalt mit dem grünen He-Ne-Laser dichter oder weniger dicht als mit dem roten He-Ne-Laser?



Beugung am Spalt

Bereits an einem einfachen Spalt tritt Beugung auf.

Die **Intensitätsminima** erscheinen bei der Beugung am Spalt unter den Winkeln:

$$\sin(\alpha) = k \cdot \frac{\lambda}{s}$$

wobei s die Spaltbreite, λ die Wellenlänge und $k = 1, 2, 3, 4, \dots$ die Ordnung des Minimums ist.

Aufgabe 3: Im Praktikum wird die Wellenlänge eines Laserpointers gemessen. Dazu wird ein Spalt von 0.20 mm Breite mit roten Laserlicht beleuchtet. Ein Schirm wird in einer Entfernung von 3.0 m vom Spalt positioniert. Dabei sind der Spalt und der Schirm parallel zueinander angeordnet und stehen senkrecht zum Laserstrahl. Die beiden Intensitätsminima 1. Ordnung haben einen Abstand von 1.9 cm zueinander. Wie gross ist die Wellenlänge des Laserlichts?

Ein zweites Experiment mit Licht: Der Photoeffekt

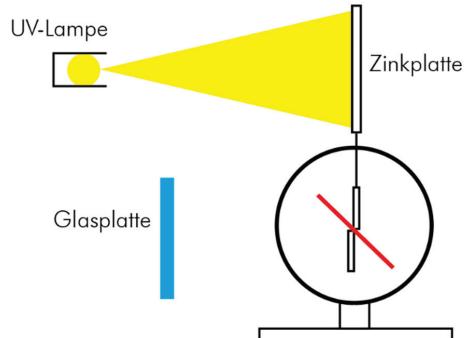
Bisher wurde angenommen, dass Licht eine Wellencharakteristik aufweist. Im Folgenden werden wir jedoch zeigen, dass Licht auch Teilcheneigenschaften besitzt.

1886 führten Heinrich Hertz und sein Assistent Wilhelm Hallwachs erste systematische Untersuchungen zum Photoeffekt durch. Wir führen dasselbe Experiment durch und machen dabei folgende Beobachtungen:

Die Platte entlädt sich, wenn sie negativ geladen ist. Ist sie jedoch ...positiv..... geladen, so entlädt sie sich nicht.

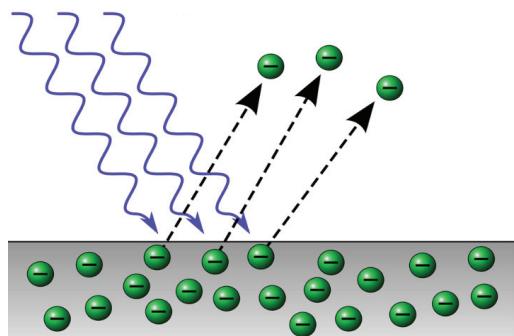
Je grösser die Intensität des Lichtes, desto Schneller... entlädt sich die Platte.

Wird die Zinkplatte mit sichtbarem Licht (ohne UV-Strahlung) beleuchtet, so entlädt sie sich nicht., und zwar unabhängig von der Intensität des Lichts.



Interpretation im Wellenbild

Beim Photoeffekt werden Elektronen aus einer Metalloberfläche herausgelöst. Bei Licht handelt es sich um eine elektromagnetische Welle.... Diese Welle bringt die Elektronen im Metall zum Schwingen..., bis sie sich aus der Platte herauslösen.



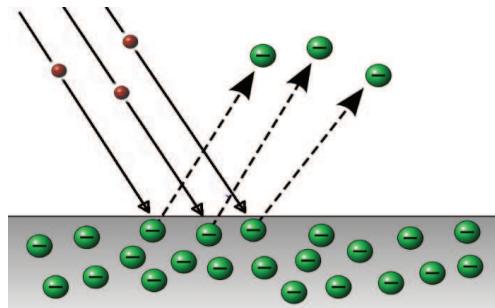
Je grösser die Intensität der Welle und damit die Amplitude der Welle, desto schneller erhalten die Elektronen genügend (Schwingungs-)Energie, um die Platte zu verlassen, d.h. umso Schneller. entlädt sie sich.

Mit UV-Strahlung, also kurz...welligem Licht, werden Elektronen herausgeschlagen, mit sichtbarem, also langwelligem.... Licht, jedoch nicht. Die Energie der Welle kann jedoch unabhängig von der Wellenlänge beliebig erhöht werden. Es müsste also durch Erhöhen der Intensität bei jeder Wellenlänge gelingen, Elektronen herauszuschlagen. Im Experiment können jedoch auch bei sehr hoher Intensität mit sichtbarem Licht keine Elektronen herausgelöst werden.

Interpretation im Teilchenbild

Beim Photoeffekt werden ... **Elektronen** aus einer Metalloberfläche herausgeschlagen.

Beim Licht handelt es sich um einen Strahl von **Teilchen**.... Diese Teilchen **treffen** auf die Elektronen und schlagen diese aus der Platte heraus.



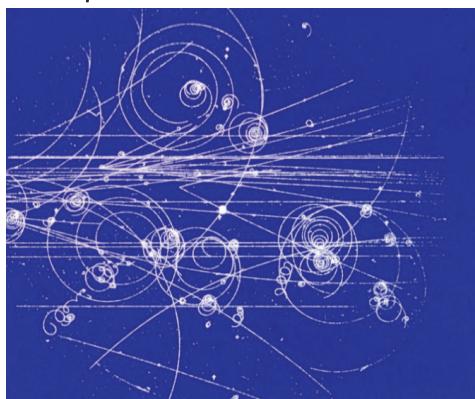
Je grösser die Intensität des Lichts und damit die ... **Anzahl**.. Teilchen pro Zeit und pro Fläche, desto **häufiger** treffen Lichtteilchen auf Elektronen – desto **schneller** entlädt sie sich.

Mit UV-Strahlung, also Lichtteilchen mit **hohem**.... Energie, werden Elektronen herausgeschlagen, mit sichtbarem, also Lichtteilchen mit ... **geringer**.... Energie, jedoch nicht. Auch wenn die Intensität (mehr Teilchen pro Zeit) erhöht wird, reicht die Energie der einzelnen Lichtteilchen **nicht** aus, um ein Elektron herauszuschlagen. Dies erklärt, weshalb im Experiment auch bei sehr hoher Intensität von sichtbarem Licht keine Elektronen herausgelöst werden.

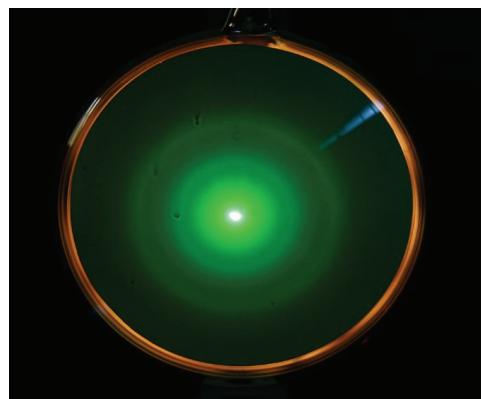
Licht ist ein **Teilchen**.. und kann keine ... **Welle**..... sein.

In der Natur und Technik kommen viele Phänomene vor, die nur mit Hilfe des Teilchencharakters von Licht erklärt werden können. So zum Beispiel ... **Färben von Photopapier**,...
Photodiode, CCD-Chip, **Photosynthese**, **Brauner der Haut**

Zwei Experimente mit Materie



Elektronen und andere geladene Teilchen hinterlassen in der Blasenkammer Spuren. Die Teilchen bewegen sich wie **massive Korpuskel** auf definierten Bahnen durch die Blasenkammer.



Ein Elektronenstrahl trifft auf eine polykristalline Graphitfolie. Die periodische Kristallstruktur stellt eine Art ,Mehrfachspalt' dar (Bragg-Streuung). Die Elektronen werden wie eine **Welle** gebogt.

Materie hat sowohl Eigenschaften von .. **Teilchen**... wie auch von .. **Wellen**....

2. Das Photon

Der Photoeffekt

Beim Photoeffekt treffen Lichtteilchen (Photonen) auf einer Metallplatte auf. Hat das Lichtteilchen genügend Energie, um die Bindungsenergie des Elektrons zu überwinden, so kann es ein Elektron aus der Platte schlagen.

Wir messen die Energie des austretenden Elektrons mit der **Gegenfeldmethode**:

Licht besteht aus **Teilchen** (**Photonen**), deren Energie proportional zur **Frequenz** des Lichts ist: $E_\gamma = h \cdot f$.
mit dem Planck'schen Wirkungsquantum $h \approx 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$.

Beim **Photoeffekt** haben die austretenden Elektronen die maximale kinetische Energie $E_{\max} = E_\gamma - W_A$, wobei W_A die **Austrittsarbeit** und $E_\gamma = h \cdot f$ die Energie des Photons ist.

Aufgabe 4: Elektronen sind in Metallen durch elektrische Kräfte gebunden. Welche Möglichkeiten bestehen, den Elektronen die zum Austritt notwendige Energie (Austrittsarbeit) zu geben, so dass sie das Metall verlassen können?

- a) Bestrahlung mit Wärmestrahlung
- b) starkes Erhitzen
- c) Beschuss mit Elektronen oder Protonen
- d) Bestrahlung mit UV-Licht

Aufgabe 5: Eine negativ geladene Platte auf einem Elektroskop wird mit UV-Licht bestrahlt. Welche Effekte können beobachtet werden?

- a) Die Metallplatte wird entladen.
- b) Es treten Elektronen aus der Metallplatte aus.
- c) Der Elektroskopausschlag geht zurück.
- d) Der Elektroskopausschlag steigt an.
- f) Es passiert gar nichts.

Aufgabe 6: Eine positiv geladene Platte auf einem Elektroskop wird mit UV-Licht bestrahlt. Welche Effekte können nun beobachtet werden?

- a) Die Metallplatte wird entladen.
- b) Es treten Elektronen aus der Metallplatte aus.
- c) Der Elektroskopausschlag geht zurück.
- d) Der Elektroskopausschlag steigt an.
- f) Es passiert gar nichts.

Aufgabe 7: Der Photoeffekt widerlegt, dass Licht einzig Wellencharakter hat. Welche experimentellen Befunde beim Photoeffekt sind mit dem Wellenmodell nicht vereinbar?

- a) Grössere Lichtintensität führt zu grösserem Photostrom.
- b) Existenz einer Grenzfrequenz, unterhalb welcher kein Photostrom auftritt.
- c) Das Austreten von Elektronen aus einer Metallschicht bei Bestrahlung.
- d) Die Energie der herausgeschlagenen Elektronen ist unabhängig von der Lichtintensität.

Aufgabe 8: Schreibe den Satz zu Ende, indem Du jedem Teil aus A einen richtigen Teil aus B anfügst: „Wenn beim photoelektrischen Effekt bei konstanter Wellenlänge die Intensität geändert wird, ändert sich bei den herausgelösten Elektronen ...“

- | | |
|----------------------------|---------------------------------------|
| A die Anzahl ... | B proportional zur Lichtleistung. |
| die kinetische Energie ... | nicht proportional zur Lichtleistung. |
| die Geschwindigkeit ... | gar nicht. |

Aufgabe 9: Eine Photozelle wird an ein Voltmeter angeschlossen und mit grünem Licht bestrahlt. Es wird eine Spannung von 0.8 V gemessen. Welche der folgenden Aussagen sind richtig?

- a) Bei Erhöhung der Intensität des grünen Lichts steigt die Spannung.
- b) Die Intensität des grünen Lichts hat keine Auswirkung auf die Spannung.
- c) Blaues Licht würde die gleiche Spannung ergeben.
- d) Blaues Licht würde eine grössere Spannung ergeben.
- e) Blaues Licht würde eine kleinere Spannung ergeben.

