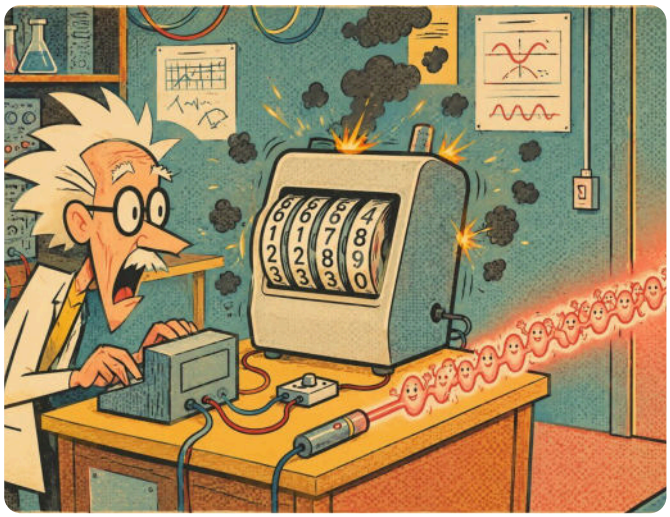
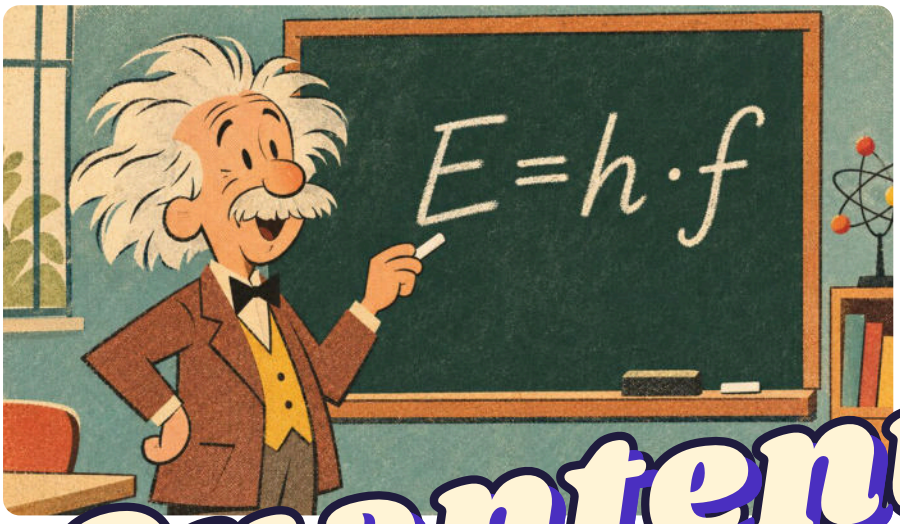








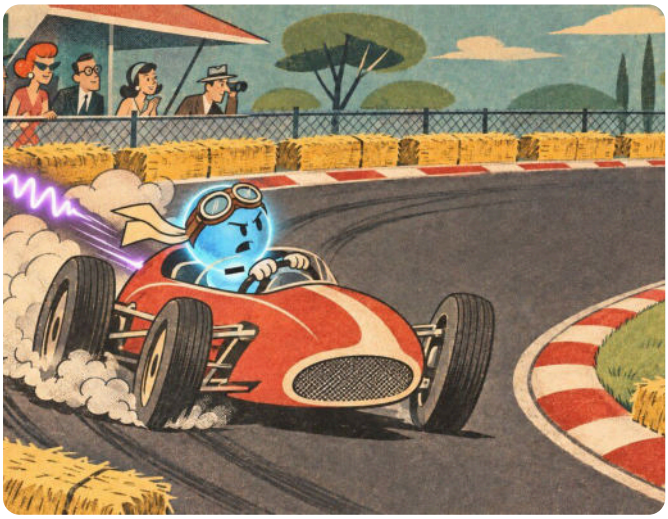


Quantenwelt

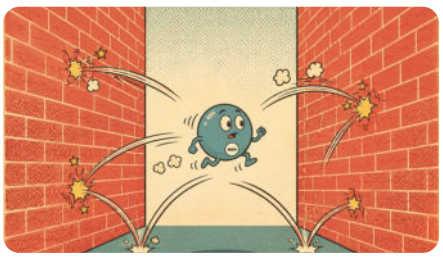


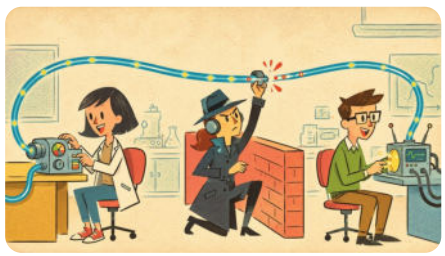














Willkommen in Köllns Quantenwelt

Liebe Lernende,

wenn ich in der Oberstufe Quantenphysik unterrichte, kommt mir dieses Teilgebiet der Physik jedes Mal genauso absurd vor wie die Fantasiewelt aus Douglas Adams' Buchreihe „Per Anhalter durch die Galaxis". In „Das Restaurant am Ende des Universums" schreibt Adams:

> *„Es gibt eine Theorie, die besagt, wenn jemals irgendwer genau herausfindet, wozu das Universum da ist und warum es da ist, dann verschwindet es auf der Stelle und wird durch noch etwas Bizarreres und Unbegreiflicheres ersetzt. Es gibt eine andere Theorie, nach der das schon passiert ist."*

Ich glaube, da ist etwas dran.

Gemeinsam mit der KI Claude habe ich versucht, eine möglichst anschauliche Lernumgebung für diese rätselhafte Quantenwelt zu schaffen. Am Ende füllten meine Prompts mehr als 50 DIN-A4-Seiten. Das finde ich irgendwie beruhigend: Es zeigt, dass es für das Gelingen eines solchen Projekts nach wie vor menschliche Ideen braucht – noch …

Claude und ich hoffen, dass uns etwas Gutes und Hilfreiches gelungen ist. Viel Erfolg!

Martin Kölln

Die interaktive Lernumgebung findest du hier:

Lerntresen.de/quantenphysik

mit Simulationen, Aufgaben mit Rückmeldung und deinem persönlichen Lernfortschritt

Inhalt

1	**Licht kommt in Portionen – das Photon**	Quantenobjekte	3
2	**Der Fotoeffekt – Licht schlägt Elektronen heraus**	Quantenobjekte	5
3	**Den Fotoeffekt vermessen – Gegenfeldmethode und h**	Quantenobjekte	7
4	**Auch Elektronen interferieren – Materiewellen**	Quantenobjekte	9
5	**Die Spielregeln der Quantenwelt**	Quantenobjekte	11
6	**Welcher Weg? Komplementarität und Quantenradierer**	Quantenobjekte	13
7	**Quantenphysik und Weltbild**	Quantenobjekte	15
8	**Atome leuchten in ihren eigenen Farben**	Atomvorstellungen	17
9	**Wo ist das Elektron? Orbitale des Wasserstoffatoms**	Atomvorstellungen	19

Dieses Begleitdokument fasst die Lernumgebung **Köllns Quantenwelt** (Lerntresen.de/quantenphysik) zusammen. Die Verweise „(→ Abschnitt *n*)" hinter den Überschriften führen zum passenden Abschnitt der jeweiligen Einheit in der Lernumgebung.

„Köllns Quantenwelt – Begleitdokument" von Martin Kölln, 2026, Lerntresen.de/quantenphysik. Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative-Commons-Lizenz **Namensnennung – Nicht kommerziell – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)**. Lizenztext: creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.de.
Du darfst das Material vervielfältigen, weitergeben und bearbeiten, wenn du Urheber und Lizenz nennst, Änderungen kenntlich machst, es nicht kommerziell nutzt und Bearbeitungen unter derselben Lizenz weitergibst.
Bilder: KI-generiert (Magnific) bzw. eigene Grafiken. Texte und Grafiken entstanden mit Unterstützung der KI Claude (Anthropic). Schriften: Fira Sans und Shrikhand (SIL Open Font License). Lizenzlogo: Creative Commons.

Licht kommt in Portionen – das Photon

Licht ist eine Welle – und trotzdem kommt es in einzelnen Energieportionen an. Wie passt das zusammen?

Warum sind Nachtfotos so „krisselig“?

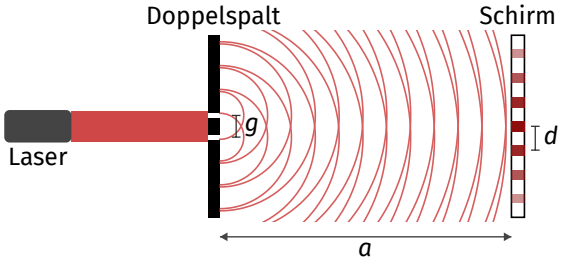
Mach im fast dunklen Zimmer ein Foto mit dem Smartphone: Das Bild wirkt körnig. Der Grund ist nicht (nur) eine schlechte Kamera. Der Bildsensor zählt das ankommende Licht – und im Dunkeln kommen so wenige **Lichtportionen** an, dass man ihre Zufälligkeit sieht: Ein Pixel bekommt zufällig drei Portionen ab, sein Nachbar nur eine (*Photonenrauschen*). Diese Lichtportionen – die **Photonen** – sind der Startpunkt der Reise in die Quantenwelt. Ob im Bildsensor einer Kamera oder in einer Solarzelle: Überall dort wird Licht Photon für Photon absorbiert und in ein elektrisches Signal umgewandelt.

1 Licht als Welle – das kennst du schon (→ Abschnitt 1)

Das Wellenmodell erklärt die *Ausbreitung* von Licht: Beugung, Polarisation und **Interferenz**. Am Doppelspalt geht von jedem Spalt eine Welle aus; dahinter überlagern sich beide:

- Wellenberg trifft auf Wellenberg: **heller Streifen** (konstruktive Interferenz).
- Wellenberg trifft auf Wellental: **dunkler Streifen** (destruktive Interferenz).

Gerade die dunklen Stellen sind bemerkenswert: Dort ist es dunkel, *obwohl* Licht aus zwei Spalten dorthin gelangen könnte. Das lässt sich nur mit Wellen erklären.



Doppelspalt (schematisch): Spaltabstand g, Abstand zum Schirm a, Abstand benachbarter heller Streifen d.

$$\lambda = \frac{g \cdot d}{a}$$

Wellenlänge aus dem Doppelspaltversuch (Kleinwinkelnäherung)

2 Ganz schwaches Licht: Photonen werden einzeln nachgewiesen (→ Abschnitt 2)

Bei sehr schwachem Licht und sehr empfindlichen Detektoren (z. B. **Photomultiplier**) beobachtet man hinter dem Doppelspalt:

- **Einzelne, punktförmige Ereignisse** („Klicks“) – nie ein schwaches, gleichmäßiges Leuchten.
- Jedes Ereignis überträgt eine **feste Energieportion** (bei gegebener Farbe).
- Wo der nächste Punkt erscheint, ist **nicht vorhersagbar**.
- Nach sehr vielen Ereignissen entsteht **das Interferenzmuster**.

Auch das Auge zählt Photonen: Die Stäbchen der Netzhaut reagieren schon auf einzelne Photonen; wahrgenommen wird ein Lichtblitz aber erst ab etwa zehn Photonen, die fast gleichzeitig auftreffen.

MERKE

Die Energieportionen heißen **Photonen** (**Lichtquanten**). Licht wird in Form von Photonen *nachgewiesen*: lokal, in festen Energieportionen, zu zufälligen Zeitpunkten und an zufälligen Orten. Die *Verteilung* vieler Nachweise wird dagegen durch ein Wellenmodell richtig vorhergesagt.

VERDACHT?!

„Ein Photon ist ein winziges Lichtkügelchen.“
Nein – ein Photon ist ein **Quantenobjekt**, weder klassisches Teilchen noch klassische Welle.

3 Die Energie eines Photons: E = h · f (→ Abschnitt 3)

Versuch mit Fotopapier: Unter einem blauen Filter wird Fotopapier geschwärzt, unter einem roten nicht – auch bei sehr hellem rotem Licht. Ein Körnchen nimmt immer die Energie *eines* Photons auf: Ein blaues Photon hat genug Energie, ein rotes nicht.

Die Photonenenergie ist **proportional zur Frequenz**: je **kürzer die Wellenlänge**, desto **größer die Energie**.

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

Energie eines Photons

Planck’sches Wirkungsquantum:
$h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ J·s = $4{,}136 \cdot 10^{-15}$ eV·s
Elektronenvolt: 1 eV = $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ J. Sichtbares Licht: ca. 1,6 eV (rot) bis 3,3 eV (violett).

3 Die Energie eines Photons: E = h · f (Fortsetzung) (→ Abschnitt 3)

Strahlung	typ. Wellenlänge	Photonenenergie	Was kann ein Photon bewirken?
UKW-Radio	3 m	≈ $4 \cdot 10^{-7}$ eV	nur viele zusammen: Signal in der Antenne
Infrarot	1500 nm	≈ 0,8 eV	Moleküle in Schwingung versetzen
rotes / blaues Licht	700 nm / 450 nm	≈ 1,8 eV / 2,8 eV	Sehzellen anregen; blau: Fotopapier schwärzen
UV-C	250 nm	≈ 5 eV	Bindungen brechen, Elektronen auslösen
Röntgenstrahlung	0,1 nm	≈ 12 000 eV	Atome ionisieren, Gewebe durchdringen

Photonen haben einen Impuls

Photonen übertragen nicht nur Energie, sondern auch Impuls. Trifft Licht auf einen Körper, entsteht dadurch eine sehr kleine Kraft, der **Strahlungsdruck**. Ein Photon hat keine Masse; sein Impuls folgt aus seiner Energie:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Impuls eines Photons (→ Einheit 4)

4 Wie viele Photonen? Leistung und Photonenstrom (→ Abschnitt 5)

Ein Strahl der Leistung P transportiert pro Sekunde die Energie $P \cdot 1\,\text{s}$, jedes Photon davon $E = h \cdot f$. Für den **Photonenstrom** gilt:

$$N = \frac{P}{E} = \frac{P \cdot \lambda}{h \cdot c}$$

Photonen pro Sekunde

MERKE

- Die **Frequenz** (Farbe) bestimmt die Energie *eines* Photons.
- Die **Intensität** (Helligkeit) bestimmt die *Anzahl* der Photonen pro Zeit und Fläche.

5 Experiment: h mit Leuchtdioden bestimmen (→ Abschnitt 6)

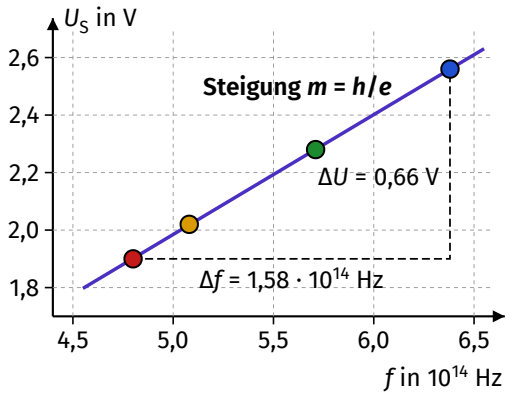
Eine LED leuchtet erst ab der **Schwellenspannung** U_S. Jedes Elektron nimmt dabei die Energie $e \cdot U_S$ auf und gibt sie als **genau ein Photon** wieder ab:

$$e \cdot U_S \approx h \cdot f \;\Rightarrow\; U_S = \frac{h}{e} \cdot f$$

Steigung im f-U_S-Diagramm: $m = h/e \Rightarrow h = e \cdot m$

LED	λ in nm	f in 10^{14} Hz	U_S in V
blau	470	6,38	2,56
grün	525	5,71	2,28
gelb	590	5,08	2,02
rot	625	4,80	1,90

Nur ungefähr genau: Der Einsatz des Leuchtens ist schwer exakt zu erkennen, und die Elektronen haben Energien in einem gewissen Bereich; typisch sind 5–15 % Abweichung.



Messwerte (idealisiert) mit Ausgleichsgerade. Ein für alle LEDs gleicher Versatz der Schwellenspannung ändert die Steigung nicht – daher ist die Steigungsmethode zuverlässiger als eine einzelne LED.

ABITURRELEVANTE RECHENANSÄTZE – MUSTERRECHNUNGEN

Photonenenergie (grünes Licht, λ = 532 nm)

Ansatz: $E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$

$E = \frac{6{,}626 \cdot 10^{-34}\,\text{J s} \cdot 3{,}00 \cdot 10^{8}\,\text{m/s}}{532 \cdot 10^{-9}\,\text{m}} \approx \mathbf{3{,}74 \cdot 10^{-19}\,J}$

in eV: $\frac{3{,}74 \cdot 10^{-19}\,\text{J}}{1{,}602 \cdot 10^{-19}\,\text{J/eV}} \approx \mathbf{2{,}33\,eV}$

Photonenstrom (λ = 650 nm, P = 1,0 mW)

Ansatz: $N = \frac{P}{E}$ mit $E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \approx 3{,}06 \cdot 10^{-19}$ J

$N = \frac{1{,}0 \cdot 10^{-3}\,\text{J/s}}{3{,}06 \cdot 10^{-19}\,\text{J}} \approx \mathbf{3{,}3 \cdot 10^{15}}$ Photonen pro Sekunde

Doppelspalt (g = 0,25 mm, a = 3,0 m, d = 7,8 mm)

Ansatz: $\lambda = \frac{g \cdot d}{a}$ (Kleinwinkelnäherung)

$\lambda = \frac{0{,}25 \cdot 10^{-3}\,\text{m} \cdot 7{,}8 \cdot 10^{-3}\,\text{m}}{3{,}0\,\text{m}} = 6{,}5 \cdot 10^{-7}\,\text{m} = \mathbf{650\,nm}$

***h* aus der Steigung** (blaue und rote LED)

Ansatz: $m = \frac{\Delta U_S}{\Delta f} = \frac{h}{e} \Rightarrow h = e \cdot m$

$m = \frac{2{,}56\,\text{V} - 1{,}90\,\text{V}}{(6{,}38 - 4{,}80) \cdot 10^{14}\,\text{Hz}} \approx 4{,}18 \cdot 10^{-15}\,\text{V s}$

$h = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,\text{C} \cdot 4{,}18 \cdot 10^{-15}\,\text{V s} \approx \mathbf{6{,}7 \cdot 10^{-34}\,J s}$

e^-

Der Fotoeffekt – Licht schlägt Elektronen heraus

Warum rotes Licht – egal wie hell – keine Elektronen aus Zink löst, UV-Licht aber sofort. Und warum das Wellenmodell daran scheitert.

Strom aus Licht

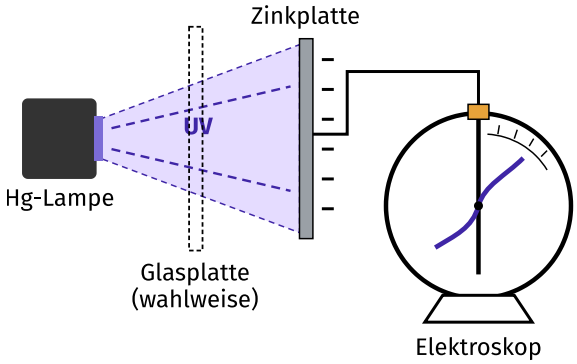
Jedes Solarmodul wandelt Licht direkt in elektrische Energie um – ohne Turbine, ohne bewegliche Teile. Dahinter steckt der **Fotoeffekt** (genauer: der *innere* Fotoeffekt im Halbleiter): Licht gibt seine Energie an Elektronen ab. Derselbe Effekt steckt in Lichtschranken, in Restlichtverstärkern von Nachtsichtgeräten und in den Photomultipliern der Teilchenphysik.

1 Der Hallwachs-Versuch (→ Abschnitt 1)

1888 untersuchte Wilhelm Hallwachs, wie Licht auf eine elektrisch geladene Metallplatte wirkt.

Aufbau: Eine frisch geschmirgelte **Zinkplatte** sitzt auf einem **Elektroskop**; Platte, Stange und Zeiger sind leitend verbunden. Je größer die Ladung, desto größer der Zeigerausschlag; nimmt die Ladung ab, geht der Zeiger zurück.

Beleuchtet wird mit einer **Quecksilberdampflampe**, deren Licht einen großen Anteil **ultravioletter Strahlung (UV)** enthält. Zum Vergleich gibt es eine sehr helle Rotlichtlampe; zusätzlich kann eine **Glasplatte** in den Lichtweg gestellt werden.



Versuchsaufbau des Hallwachs-Versuchs (negativ geladene Zinkplatte)

Beobachtung und Deutung – Schritt für Schritt

Versuch	Beobachtung	Deutung
negativ geladen, UV-Licht	Ausschlag geht zurück	Die Platte verliert negative Ladung: Das Licht löst **Elektronen** aus der Zinkoberfläche, die von der negativen Platte abgestoßen werden und davonfliegen.
positiv geladen, UV-Licht	Ausschlag bleibt gleich	Auch hier werden Elektronen ausgelöst, aber die positive Platte zieht sie sofort zurück. (Es werden also negative Ladungen ausgelöst.)
Glasplatte im Strahlengang	Ausschlag bleibt gleich	Glas lässt sichtbares Licht durch, *absorbiert aber UV*. Es ist also der UV-Anteil, der die Elektronen herauslöst.
sehr helles **rotes** Licht	nichts passiert	Die Helligkeit allein reicht nicht; es kommt auf die Frequenz des Lichts an.
UV-Licht, **größere Intensität**	schnellere Entladung	Mehr Licht löst pro Sekunde mehr Elektronen heraus.

MERKE

Das Herauslösen von Elektronen aus einer Metalloberfläche durch Licht heißt **äußerer fotoelektrischer Effekt** (kurz: **Fotoeffekt**). Bei Zink tritt er nur mit UV-Licht auf – nicht mit sichtbarem Licht, egal wie hell es ist.

Erklärung mit Photonen: Für das Herauslösen eines Elektrons ist ein bestimmter Mindestbetrag an Energie nötig. Nur die Photonen des UV-Lichts tragen jeweils genug Energie, um *ein* Elektron herauszulösen. Photonen des sichtbaren Lichts sind dafür einzeln zu „schwach" – und sie können ihre Energie nicht zusammenlegen.

2 Wellenmodell gegen Experiment (→ Abschnitt 2)

Nach dem Wellenmodell trifft das Licht gleichmäßig auf die ganze Metalloberfläche. Die transportierte Energie hängt von der **Amplitude** ab, also von der Intensität. Die Elektronen würden durch das elektrische Feld der Welle zum Mitschwingen gebracht und nach und nach Energie aufnehmen. Die Vorhersagen im Vergleich mit dem Experiment stehen in der Tabelle auf der nächsten Seite.

2 Wellenmodell gegen Experiment (Fortsetzung) (→ Abschnitt 2)

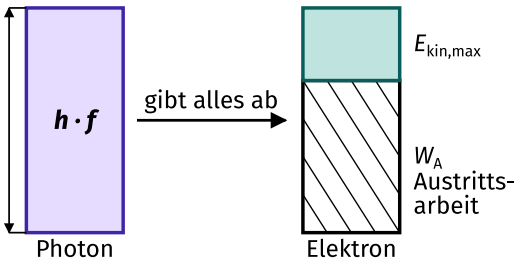
Erwartung nach dem Wellenmodell	Experimenteller Befund
Jede Lichtfarbe löst Elektronen aus, wenn die Intensität nur groß genug ist.	Unterhalb einer **Grenzfrequenz** f_G werden *nie* Elektronen ausgelöst – auch nicht bei riesiger Intensität.
Höhere Intensität ⇒ schnellere Elektronen.	Die maximale kinetische Energie hängt *nur von der Frequenz* ab, nicht von der Intensität.
Bei schwachem Licht dauert es, bis ein Elektron genug Energie „gesammelt" hat.	Die Elektronen treten *ohne messbare Verzögerung* aus (< 10^{-9} s).
—	Höhere Intensität ⇒ *mehr* Elektronen pro Sekunde (größerer Fotostrom).

Drei von drei Vorhersagen sind falsch: Das Wellenmodell versagt bei der Energieübertragung auf Elektronen.

Einsteins Lichtquantenhypothese (1905)

Licht überträgt seine Energie in Portionen $E = h \cdot f$, und **ein Photon gibt seine gesamte Energie an genau ein Elektron ab**. Das Elektron kann die Energie nicht „sammeln" – es bekommt eine ganze Portion oder gar nichts. Die Energie wird auf zwei „Konten" verteilt:

- Ein Teil wird gebraucht, um das Elektron aus dem Metall zu lösen: die **Austrittsarbeit** W_A (auch Austrittsenergie E_A). Sie hängt vom Material ab.
- Der Rest bleibt dem Elektron als kinetische Energie.



Energiebilanz: Die Photonenenergie wird auf Austrittsarbeit und kinetische Energie aufgeteilt.

$$h \cdot f = W_A + E_{kin,max}$$
Einstein'sche Gleichung für den Fotoeffekt · umgestellt: $E_{kin,max} = h \cdot f - W_A$

Warum „max"? Elektronen, die nicht direkt an der Oberfläche sitzen, verlieren auf dem Weg nach draußen noch Energie. Nur Elektronen von der Oberfläche erhalten den vollen Rest – die *maximale* kinetische Energie.

Grenzfrequenz: Ist $h \cdot f$ kleiner als W_A, ergäbe sich eine negative Bewegungsenergie – das ist unmöglich, es wird kein Elektron ausgelöst. An der Grenze gilt $h \cdot f_G = W_A$, also:

$$f_G = \frac{W_A}{h} \quad \text{bzw.} \quad \lambda_G = \frac{h \cdot c}{W_A}$$
Grenzfrequenz und Grenzwellenlänge

Die Austrittsarbeit ist eine **Materialkonstante** (Werte schwanken je nach Oberfläche um einige Zehntel eV):

Metall	Cäsium	Kalium	Natrium	Zink	Kupfer	Platin
W_A in eV	1,94	2,25	2,28	4,27	4,48	5,65

ABITURRELEVANTE RECHENANSÄTZE – MUSTERRECHNUNGEN

Grenzwellenlänge von Zink (W_A = 4,27 eV)

Ansatz: An der Grenze ist die Photonenenergie gleich der Austrittsarbeit: $\frac{h \cdot c}{\lambda_G} = W_A \Rightarrow \lambda_G = \frac{h \cdot c}{W_A}$

$\lambda_G = \frac{6{,}626 \cdot 10^{-34}\ \text{J s} \cdot 3{,}00 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{4{,}27 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J}} \approx 2{,}9 \cdot 10^{-7}\ \text{m} \approx$ **290 nm** (UV – deshalb wirkt sichtbares Licht nicht)

Maximale kinetische Energie
(Natrium, W_A = 2,28 eV, λ = 400 nm)

Ansatz: $E_{kin,max} = h \cdot f - W_A$ mit $h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$

$h \cdot f = \frac{6{,}626 \cdot 10^{-34}\ \text{J s} \cdot 3{,}00 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{400 \cdot 10^{-9}\ \text{m}} \approx 4{,}97 \cdot 10^{-19}\ \text{J} \approx 3{,}10\ \text{eV}$

$E_{kin,max}$ = 3,10 eV − 2,28 eV = **0,82 eV**

Maximale Geschwindigkeit
($m_e = 9{,}109 \cdot 10^{-31}$ kg)

Ansatz: $E_{kin} = ½\ m_e\ v^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2\ E_{kin}}{m_e}}$

E_{kin} = 0,82 eV · 1,602 · 10^{-19} J/eV ≈ 1,31 · 10^{-19} J

$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}31 \cdot 10^{-19}\ \text{J}}{9{,}109 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}}} \approx$ **5,4 · 10^5 m/s**

h/e

Den Fotoeffekt vermessen – Gegenfeldmethode und h

Wie misst man die Energie von Elektronen, die man nicht sieht? Mit einer Gegenspannung – und aus einer Geraden liest man dann die Naturkonstante h ab.

Die Zahl, an der das Kilogramm hängt

Rund 130 Jahre lang (seit 1889) war das Kilogramm ein Gegenstand: ein kleiner Zylinder aus Platin und Iridium, das *Urkilogramm*, verwahrt in einem Tresor bei Paris. Seit dem 20. Mai 2019 ist das Kilogramm über eine Naturkonstante festgelegt, die sich niemals ändert: das **Planck'sche Wirkungsquantum** *h*. Einen der ersten genauen Werte für *h* lieferte der Fotoeffekt: Robert Millikan bestimmte *h* um 1915 mit einer Fotozelle und der Gegenfeldmethode.

1 Die Gegenfeldmethode: Elektronenenergie messen (→ Abschnitt 1)

Einsteins Gleichung $h \cdot f = W_A + E_{kin,max}$ aus Einheit 2 macht eine überprüfbare Vorhersage: Die maximale kinetische Energie der Elektronen soll linear mit der Frequenz zunehmen. Dafür muss man diese Energie messen können.

Man verwendet eine **Fotozelle**: eine luftleer gepumpte Glasröhre mit zwei Elektroden. Die großflächige **Katode** ist mit einem Metall beschichtet, auf das das Licht fällt. Ihr gegenüber sitzt eine kleine, oft ringförmige **Anode**, die die herausgelösten Elektronen auffängt. Ein empfindliches Messgerät zeigt den **Fotostrom** an – also wie viele Elektronen pro Sekunde bei der Anode ankommen. Das Vakuum ist wichtig: Sonst würden die Elektronen mit Luftmolekülen zusammenstoßen und Energie verlieren.

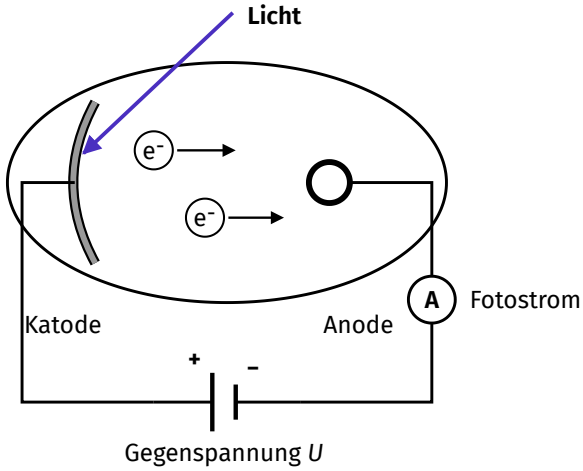
Die Idee: Elektronen „bergauf" laufen lassen. Zwischen Anode und Katode wird eine einstellbare **Gegenspannung** gelegt: Die Anode wird **negativ** gegenüber der Katode. Die Elektronen werden dann von der Anode abgestoßen und auf ihrem Weg abgebremst – wie ein Ball, der einen Hang hinaufrollt.

- Bei kleiner Gegenspannung schaffen es noch viele Elektronen bis zur Anode. Es fließt ein Fotostrom.
- Erhöht man die Gegenspannung, kommen nur noch die schnellsten Elektronen an. Der Strom wird kleiner.
- Bei der **Grenzspannung** U_G (auch Haltespannung oder U_{max}) reicht selbst die Energie der schnellsten Elektronen nicht mehr aus. Der Fotostrom wird null.

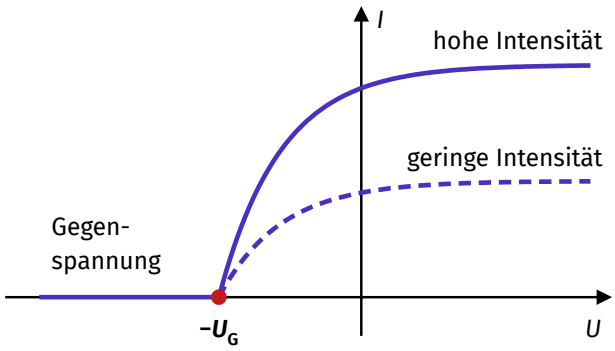
Ein Elektron verliert beim Durchlaufen der Gegenspannung U die Energie $e \cdot U$. Bei der Grenzspannung ist das genau die gesamte kinetische Energie der schnellsten Elektronen:

$$e \cdot U_G = E_{kin,max}$$

Eine Spannungsmessung ersetzt die Energiemessung.



Fotozelle mit Gegenspannung: Die Anode ist negativ gegenüber der Katode, die Elektronen laufen gegen das Feld an.



Fotostrom in Abhängigkeit von der Spannung (qualitativ): Höhere Intensität ergibt einen größeren Strom, aber dieselbe Grenzspannung.

Praktisch: Wird U_G in Volt gemessen, ist $E_{kin,max}$ in Elektronenvolt *genau derselbe Zahlenwert*. Beispiel: U_G = 1,15 V bedeutet $E_{kin,max}$ = 1,15 eV.

MERKE

Die Grenzspannung hängt nur von der Frequenz des Lichts und vom Katodenmaterial ab, **nicht von der Intensität**.

2 Das Frequenz-Grenzspannung-Diagramm: h und die Austrittsarbeit ablesen

(→ Abschnitt 2)

Aus der Gegenfeldmethode wissen wir $E_{kin,max} = e \cdot U_G$. Eingesetzt in Einsteins Gleichung:

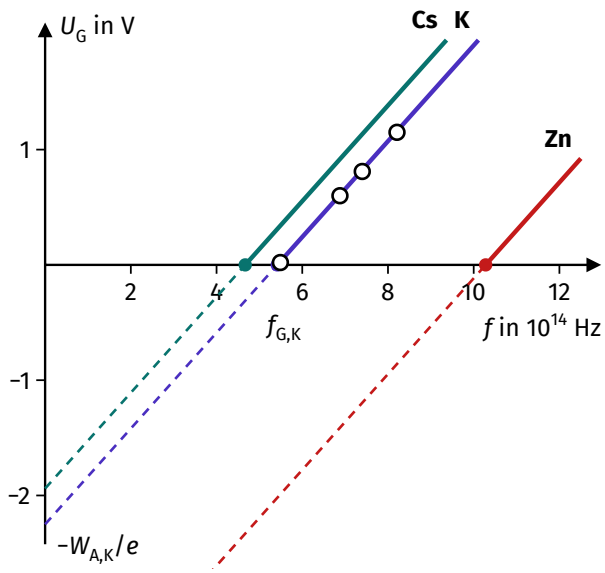
$$h \cdot f = W_A + e \cdot U_G$$

Nach U_G umgestellt (erst W_A abziehen, dann durch e teilen):

$$U_G = \frac{h}{e} \cdot f - \frac{W_A}{e}$$

Eine Geradengleichung der Form $y = m \cdot x + b$

Trägt man die Grenzspannung U_G (y-Achse) gegen die Frequenz f (x-Achse) auf, erhält man eine **Gerade**. Aus ihr lassen sich drei Größen ablesen:



Gerade für Kalium (Kreise: Messwerte unten) sowie für Cäsium und Zink. Unterhalb der Grenzfrequenz gibt es keinen Fotoeffekt; gestrichelt ist nur die *gedachte Verlängerung*.

Am Graphen	bedeutet physikalisch
Steigung m	$m = \frac{h}{e}$, also $h = e \cdot m$ – für alle Metalle gleich
Schnittpunkt mit der f-Achse	Grenzfrequenz $f_G = \frac{W_A}{h}$
verlängerte Gerade schneidet die U-Achse bei	$-\frac{W_A}{e}$: Der Betrag in Volt ist die Austrittsarbeit in eV

MERKE

Für alle Metalle ergeben sich **parallele Geraden** mit derselben Steigung h/e, weil h eine Naturkonstante ist. Die Geraden unterscheiden sich nur in der Austrittsarbeit: Je größer W_A, desto weiter rechts liegt die Grenzfrequenz. Dass der so gemessene Wert von h mit Plancks Wert übereinstimmte, war ein starker Beleg für die Lichtquantenhypothese (Millikan, 1916).

Messwerte einer Fotozelle mit Kaliumkatode (Quecksilberlinien):

λ in nm	365	405	436	546
f in 10^{14} Hz	8,21	7,40	6,88	5,49
U_G in V	1,15	0,81	0,60	0,02

ABITURRELEVANTE RECHENANSÄTZE – MUSTERRECHNUNGEN

***h* aus zwei Messpunkten**

(Kalium, 365 nm und 546 nm)

Ansatz: $m = \frac{\Delta U_G}{\Delta f} = \frac{h}{e} \Rightarrow h = e \cdot \frac{\Delta U_G}{\Delta f}$

$m = \frac{1{,}15\ \text{V} - 0{,}02\ \text{V}}{(8{,}21 - 5{,}49) \cdot 10^{14}\ \text{Hz}} \approx 4{,}15 \cdot 10^{-15}\ \text{V s}$

$h = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 4{,}15 \cdot 10^{-15}\ \text{V s} \approx \mathbf{6{,}65 \cdot 10^{-34}\ J s}$

Messunsicherheiten der Spannung wirken sich umso weniger aus, je größer der Frequenzabstand der beiden Messpunkte ist.

Austrittsarbeit (Kalium, λ = 365 nm, U_G = 1,15 V)

Ansatz: $W_A = h \cdot f - e \cdot U_G = \frac{h \cdot c}{\lambda} - e \cdot U_G$

$\frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6{,}626 \cdot 10^{-34}\ \text{J s} \cdot 3{,}00 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{365 \cdot 10^{-9}\ \text{m}} \approx 5{,}45 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$

in eV: $\frac{5{,}45 \cdot 10^{-19}\ \text{J}}{1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J/eV}} \approx 3{,}40\ \text{eV}$

$W_A \approx 3{,}40\ \text{eV} - 1{,}15\ \text{eV} = \mathbf{2{,}25\ eV}$

Geschwindigkeit der schnellsten Elektronen

(U_G = 1,15 V)

Ansatz: $\frac{1}{2} m_e v^2 = e \cdot U_G \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2\,e \cdot U_G}{m_e}}$

$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 1{,}15\ \text{V}}{9{,}109 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}}} \approx \mathbf{6{,}4 \cdot 10^{5}\ m/s}$

λ = h/p

Auch Elektronen interferieren – Materiewellen

Wenn Licht Teilcheneigenschaften hat – haben dann Teilchen auch Welleneigenschaften? De Broglies kühne Idee.

Bilder vom Allerkleinsten

Bilder von Coronaviren oder einzelnen Atomreihen stammen aus **Elektronenmikroskopen**; ein Lichtmikroskop kann keine Strukturen auflösen, die viel kleiner sind als die Wellenlänge des Lichts. Elektronenmikroskope nutzen eine erstaunliche Tatsache: Auch **Elektronen** verhalten sich bei der Ausbreitung wie Wellen – mit einer Wellenlänge, die tausendfach kleiner ist als die von Licht.

1 De Broglies Hypothese (→ Abschnitt 1)

Licht, das wir als Welle kennen, wird in einzelnen Portionen (Photonen) nachgewiesen, und jedes Photon hat den Impuls $p = h/\lambda$ (Einheit 1). Louis de Broglie drehte diesen Gedanken 1924 um: Zu einem Elektron mit dem Impuls $p = m \cdot v$ gehört eine Welle mit der Wellenlänge $\lambda = h/p$ – dieselbe Gleichung, nur umgestellt.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v}$$
de-Broglie-Beziehung

De Broglie behauptete also: **Jedem** Objekt mit Impuls kann man eine Wellenlänge zuordnen, die **de-Broglie-Wellenlänge**. Das war zunächst nur eine Vermutung (Hypothese), die sich im Experiment bewähren musste. Ein schnelleres Elektron hat einen größeren Impuls und damit eine *kürzere* Wellenlänge.

Wellenlänge von beschleunigten Elektronen

1. Ein Elektron, das aus der Ruhe die Spannung U_B durchläuft, erhält die Bewegungsenergie $E_{kin} = e \cdot U_B$.
2. Aus $E_{kin} = ½\, m\, v^2$ und $p = m\, v$ folgt $E_{kin} = \frac{p^2}{2\, m}$.
3. Gleichsetzen und nach p auflösen: $e \cdot U_B = \frac{p^2}{2\, m_e}$, also $p = \sqrt{2\, m_e\, e\, U_B}$.

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2\, m_e\, e\, U_B}}$$
gilt, solange die Elektronen viel langsamer als Licht sind (gut bis einige 10 kV)

Bei $U_B = 1{,}0$ kV ist $\lambda \approx 0{,}039$ nm – kleiner als ein Atomdurchmesser (≈ 0,1 nm) und rund 10 000-mal kleiner als die Wellenlänge von sichtbarem Licht.

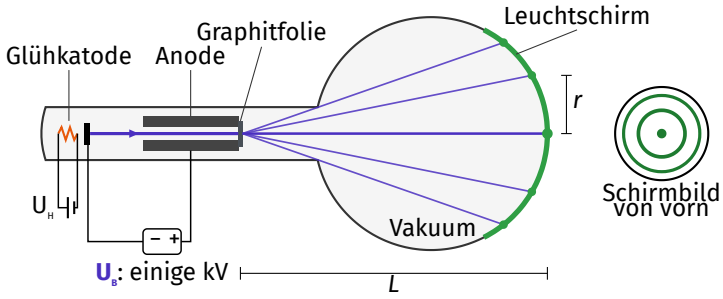
MERKE

Die de-Broglie-Beziehung verknüpft eine typische Teilchengröße (Impuls) mit einer typischen Wellengröße (Wellenlänge). Es gilt $\lambda \sim 1/\sqrt{U_B}$: Vierfache Spannung halbiert die Wellenlänge.

2 Die Elektronenbeugungsröhre (→ Abschnitt 2)

1927 wiesen Davisson und Germer (USA) sowie G. P. Thomson (Großbritannien) nach, dass Elektronen an Kristallen Interferenzmuster erzeugen. In der Schule nutzt man dafür die **Elektronenbeugungsröhre**.

1. Eine **Glühkatode** setzt Elektronen frei.
2. Die **Beschleunigungsspannung** U_B (einige Kilovolt) zwischen Katode und Anode bringt sie auf hohe Geschwindigkeit.
3. Der Strahl trifft auf eine hauchdünne Folie aus **polykristallinem Graphit** (sehr viele winzige, ungeordnet liegende Kristalle).
4. Dahinter treffen die Elektronen auf den **Leuchtschirm**.

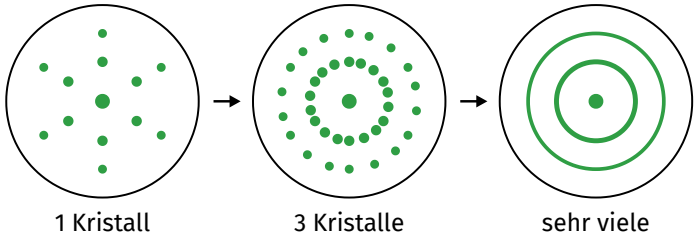


Elektronenbeugungsröhre (Seitenansicht); rechts der Schirm von vorn: heller Mittelfleck und zwei Ringe.

Beobachtung: Auf dem Schirm sieht man nicht nur einen hellen Fleck in der Mitte, sondern zusätzlich zwei **helle Ringe**. Kleine Kügelchen würden hinter einer Folie höchstens einen verwaschenen Fleck erzeugen. Ringe mit dunklen Zwischenräumen sind ein Interferenzmuster.

2 Die Elektronenbeugungsröhre (Fortsetzung) (→ Abschnitt 2)

Warum Ringe? In einem Graphitkristall sitzen die Atome regelmäßig in Reihen, ähnlich wie die Striche eines optischen Gitters. Die Elektronenwelle wird an diesen regelmäßig angeordneten Atomen gestreut. Nur in bestimmten Richtungen verstärken sich die gestreuten Anteile – genau wie das Licht hinter einem Gitter.



Schirmbild von vorn: Ein einzelner Kristall lenkt die Elektronen nur in wenige Richtungen (Punkte). Drei verschieden gedrehte Kristalle ergeben mehr Punkte. In der Folie liegen sehr viele winzige Kristalle, beliebig um den Strahl gedreht. Ihre Punkte verschmieren zu **Ringen**.

Es entstehen zwei Ringe, weil die Atome im Graphit in zwei verschiedenen Abständen regelmäßig angeordnet sind: d_1 = 0,213 nm und d_2 = 0,123 nm. Zum größeren Abstand gehört der kleinere Ring – wie beim Doppelspalt, wo ein größerer Spaltabstand engere Streifen ergibt.

	Licht am Doppelspalt	**Elektronen an Graphit**
regelmäßiger Abstand	Spaltabstand g	Atomabstand d
Abstand zum Schirm	a	L
Muster	Streifenabstand d	Ringradius r
Wellenlänge	$\lambda = g \cdot d \,/\, a$	$\lambda \approx d \cdot r \,/\, L$

$$\lambda \approx \frac{d \cdot r}{L}$$

d: Atomabstand im Graphit, r: Ringradius, L: Abstand Folie–Schirm (kleine Winkel)

Ergebnis: Bei höherer Beschleunigungsspannung werden die Ringe *kleiner*: Die Elektronen sind schneller, ihre Wellenlänge ist kürzer – genau wie de Broglie vorhersagt. Die aus den Ringen bestimmte Wellenlänge stimmt mit $\lambda = h/p$ überein. Ein Magnet verschiebt das Muster: Es stammt von geladenen Elektronen.

3 Elektronen am Doppelspalt (→ Abschnitt 4)

Auch der Doppelspaltversuch gelingt mit Elektronen, wenn die Spalte winzig sind (Abstand unter 1 µm). Schickt man die Elektronen **einzeln** durch, hinterlässt jedes genau einen Punkt auf dem Schirm. Erst viele Punkte zusammen ergeben Interferenzstreifen – genau wie bei einzelnen Photonen (Einheit 1). Elektronen und Photonen sind beide **Quantenobjekte**.

MERKE

Ein Elektron wird immer an *einer* Stelle nachgewiesen. Wie sich viele Nachweise verteilen, beschreibt eine Welle mit $\lambda = h/p$.

4 Wie groß darf ein Quantenobjekt sein? Moleküle am Gitter (→ Abschnitt 5)

Sogar Moleküle aus 60 Kohlenstoffatomen (C_{60}, fußballförmig, etwa 0,7 nm groß) zeigen hinter einem Gitter ein Interferenzmuster; inzwischen gelingt das mit Molekülen aus über 2000 Atomen. Wegen ihrer großen Masse ist die Wellenlänge winzig.

ABITURRELEVANTE RECHENANSÄTZE – MUSTERRECHNUNGEN

de-Broglie-Wellenlänge (U_B = 4,0 kV)

Ansatz: $e \cdot U_B = \frac{p^2}{2\,m_e} \Rightarrow p = \sqrt{2\,m_e\,e\,U_B}$

$p = \sqrt{2 \cdot 9{,}109 \cdot 10^{-31}\ \text{kg} \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 4000\ \text{V}}$
$\approx 3{,}42 \cdot 10^{-23}\ \text{kg m/s}$

$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6{,}626 \cdot 10^{-34}\ \text{J s}}{3{,}42 \cdot 10^{-23}\ \text{kg m/s}} \approx$ **0,0194 nm**

Molekülinterferenz (C_{70}, v = 190 m/s)

Ansatz: $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$ mit $m = 1{,}40 \cdot 10^{-24}$ kg

$\lambda = \frac{6{,}626 \cdot 10^{-34}\ \text{J s}}{1{,}40 \cdot 10^{-24}\ \text{kg} \cdot 190\ \text{m/s}} \approx 2{,}5 \cdot 10^{-12}$ m
$=$ **0,0025 nm**

Atomabstand im Graphit (r = 1,23 cm, L = 13,5 cm)

Ansatz: $\lambda \approx \frac{d \cdot r}{L} \Rightarrow d \approx \frac{\lambda \cdot L}{r} = \frac{0{,}0194\ \text{nm} \cdot 13{,}5\ \text{cm}}{1{,}23\ \text{cm}}$

$\approx$ **0,213 nm**

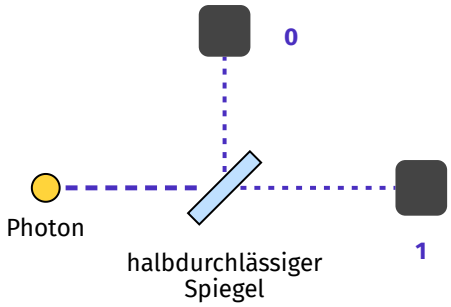
P(x)

Die Spielregeln der Quantenwelt

Zufall mit festen Regeln, Interferenz einzelner Objekte, Superposition – die Wesenszüge, die für alle Quantenobjekte gelten.

Echter Zufall – zum Kaufen

Für Verschlüsselung braucht ein Gerät **Zufallszahlen**. Ein Computer berechnet „Zufallszahlen" nach festen Regeln (**Pseudozufall**) – wer die Regel kennt, kann sie vorhersagen. Ein **Quanten-Zufallszahlengenerator** schickt dagegen einzelne Photonen auf einen **halbdurchlässigen Spiegel**. Bei jedem Photon klickt nur *einer* der beiden Detektoren (0 oder 1) – welcher, ist **prinzipiell** nicht vorhersagbar.

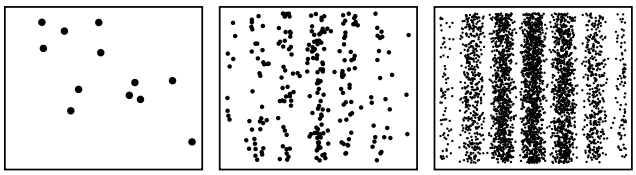


50 % : 50 % – echt zufällig

1 Ein Quantenobjekt nach dem anderen (→ Abschnitt 1)

Durch einen Doppelspalt werden Quantenobjekte – Photonen oder Elektronen – **einzeln** geschickt. Jedes Objekt erzeugt auf dem Schirm genau einen Punkt.

- Wo der nächste Punkt erscheint, lässt sich **nicht vorhersagen**.
- Wiederholt man den Versuch, landen die ersten Objekte an **anderen Stellen**.
- Erst nach vielen Objekten wird ein Muster sichtbar – und bei jeder Wiederholung entsteht **dasselbe** Interferenzmuster.



Schirmbilder nach unterschiedlich vielen einzeln nachgewiesenen Quantenobjekten (simuliert)

2 Stochastische Vorhersagbarkeit und Determiniertheit der Verteilung (→ Abschnitt 2)

Aus dem Experiment lassen sich zwei Grundregeln ablesen, die **Wesenszüge** der Quantenphysik:

WESENSZUG 1 – STOCHASTISCHE VORHERSAGBARKEIT

Für das Verhalten eines *einzelnen* Quantenobjekts lassen sich im Allgemeinen nur **Wahrscheinlichkeitsaussagen** machen. Einzelne Messergebnisse (z. B. Auftreffort, Zeitpunkt einer Emission) sind zufällig.

„Stochastisch" heißt: vom Zufall bestimmt, aber mit festen Wahrscheinlichkeiten. Man kann sagen: „Mit 12 % Wahrscheinlichkeit landet das Elektron in diesem Streifen" – aber nicht, ob es das nächste Elektron tatsächlich tut.

WESENSZUG 2 – DETERMINIERTHEIT DER ZUFALLSVERTEILUNG

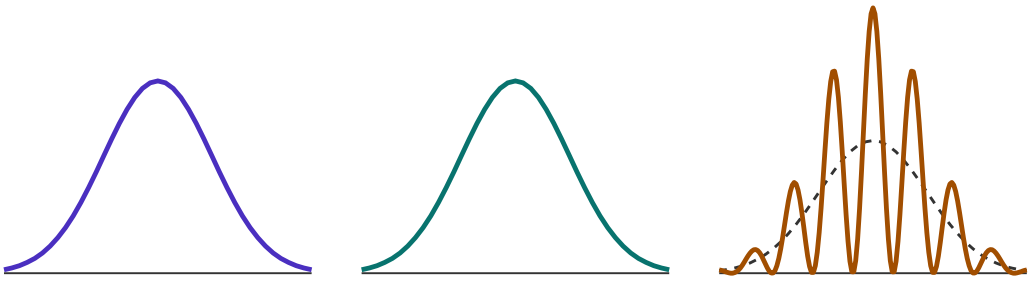
Die **Verteilung** der Ergebnisse vieler gleich präparierter Quantenobjekte ist durch die Versuchsbedingungen festgelegt (determiniert) und reproduzierbar.

„Determiniert" heißt: festgelegt. Derselbe Aufbau liefert immer dieselbe Verteilung. Ändert man den Aufbau (z. B. den Spaltabstand), ändert sich die Verteilung in vorhersagbarer Weise.

Echter Zufall: Der Zufall in der Quantenphysik ist nach heutigem Wissen **nicht** auf fehlende Information zurückzuführen (anders als beim Würfeln). Es gibt keine „verborgenen" Eigenschaften, die den Auftreffort schon vorher festlegen.

3 Interferenz einzelner Quantenobjekte und Superposition (→ Abschnitt 4)

Am Doppelspalt gibt es zwei klassisch denkbare Möglichkeiten, zum Schirm zu gelangen: durch Spalt 1 oder durch Spalt 2. Die Kurven zeigen für drei Messungen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Quantenobjekt an welcher Stelle nachgewiesen wird:



nur Spalt 1 offen: P_1 nur Spalt 2 offen: P_2 beide offen: $P \neq P_1 + P_2$

waagerecht: Ort auf dem Schirm · senkrecht: Nachweiswahrscheinlichkeit

Gestrichelt: die Summe $P_1 + P_2$, die man für klassische Teilchen erwarten würde. Gemessen wird ein Interferenzmuster.

Mit beiden offenen Spalten gibt es Stellen, an denen *weniger* ankommt als mit nur einem offenen Spalt – an manchen Stellen *gar nichts*. Für Kügelchen wäre das unmöglich. Man beschreibt das so: Der Zustand des Quantenobjekts ist eine **Superposition** (Überlagerung) der beiden Möglichkeiten „durch Spalt 1" und „durch Spalt 2". Keine der beiden ist verwirklicht – beide zusammen bestimmen, wo das Objekt nachgewiesen werden kann.

Maxima und Minima berechnet man wie in der Wellenoptik mit dem Gangunterschied Δs und der (de-Broglie-)Wellenlänge. Neu ist die Deutung: Das Muster gibt die **Wahrscheinlichkeit** an, ein einzelnes Quantenobjekt an einer Stelle nachzuweisen.

$$\text{Maxima: } \Delta s = k \cdot \lambda$$

$$\text{Minima: } \Delta s = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

WESENSZUG 3 – FÄHIGKEIT ZUR INTERFERENZ

Ein einzelnes Quantenobjekt kann Interferenz zeigen, wenn es für ein Messergebnis **mehrere klassisch denkbare Möglichkeiten** gibt und diese **prinzipiell nicht unterscheidbar** sind.

VERDACHT?!

„Das Elektron geht durch beide Spalte gleichzeitig." – „Das Elektron geht durch einen Spalt, wir wissen nur nicht, durch welchen." *Beide* Sätze sind irreführend: Das Elektron wird immer nur als Ganzes nachgewiesen, und der zweite Satz würde das falsche Ergebnis $P_1 + P_2$ liefern. **Fachlich korrekt:** „Es lässt sich nicht sagen, durch welchen Spalt das Elektron gegangen ist; der Zustand ist eine Superposition beider Möglichkeiten."

4 VERDACHT?! Typische Fehlvorstellungen – und was stattdessen gilt (→ Abschnitt 8)

Verbreitete Vorstellung	Fachlich angemessen
Ein Elektron ist eine winzige Kugel, die auf einer Bahn fliegt.	Einem Quantenobjekt kann man (ohne Messung) im Allgemeinen keine Bahn zuschreiben.
Ein Elektron ist mal Teilchen, mal Welle („Dualismus").	Es ist immer ein Quantenobjekt. Je nach Experiment ist ein Teilchen- oder ein Wellen*modell* zur Beschreibung nützlich.
Die Welle ist ein schwingendes Medium, in dem das Elektron surft.	Das Wellenmodell beschreibt nur, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Quantenobjekt an einer Stelle nachgewiesen wird. Die Welle selbst kann man nicht messen.
Die Interferenz entsteht durch Stöße vieler Elektronen miteinander.	Interferenz tritt auch auf, wenn die Elektronen einzeln durch die Apparatur gehen.
Quantenzufall = Messungenauigkeit.	Der Zufall ist prinzipiell; nur die Verteilung ist determiniert.

MZI

Welcher Weg? Komplementarität und Quantenradierer

Sobald man herausfinden könnte, welchen Weg ein Photon genommen hat, verschwindet die Interferenz. Selbst wenn niemand hinschaut.

Abhörsichere Kommunikation

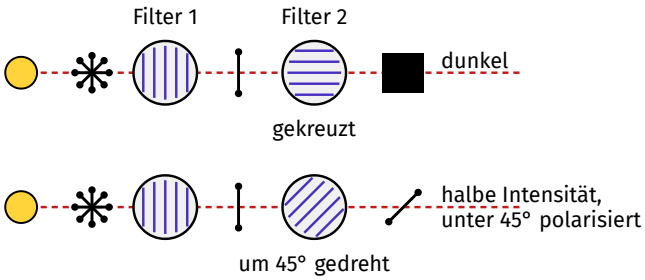
Bei der **Quantenkryptographie** wird ein geheimer Schlüssel mit einzelnen Photonen übertragen. Jeder Lauschangriff ist eine *Messung* und verändert den Zustand der Photonen. Am deutlichsten zeigt sich das am Gegensatz zwischen **Weginformation** und **Interferenz**.

1 Polarisation von Licht – kurz erklärt (→ Abschnitt 1)

Licht ist eine **Transversalwelle**: Das elektrische Feld schwingt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Bei Licht aus einer Glühlampe oder von der Sonne wechselt die Schwingungsrichtung ständig und regellos: Das Licht ist **unpolarisiert**. Schwingt das Feld immer in derselben Richtung, heißt das Licht **linear polarisiert**.

Ein **Polarisationsfilter** (Polfilter) lässt nur den Anteil des Lichts durch, der in seiner *Durchlassrichtung* schwingt; dahinter ist das Licht in dieser Richtung polarisiert. Von unpolarisiertem Licht kommt die Hälfte der Intensität durch.

- **Durchlassrichtungen parallel:** Das polarisierte Licht kommt vollständig durch den zweiten Filter.
- **Durchlassrichtungen senkrecht** („gekreuzte" Filter): Es kommt kein Licht durch.
- **Zweiter Filter um 45° gedreht:** Die Hälfte kommt durch; danach ist das Licht unter 45° polarisiert.



Unpolarisiertes Licht, nach Filter 1 senkrecht polarisiert. Entscheidend ist der Winkel zwischen den Durchlassrichtungen.

MERKE

Senkrecht zueinander polarisierte Lichtanteile interferieren nicht miteinander. Deshalb kann man mit Polfiltern den Weg eines Photons *markieren*: Die Polarisation verrät dann den Weg.

2 Weginformation zerstört Interferenz (→ Abschnitt 3)

Ein **Welcher-Weg-Detektor** ist jede Vorrichtung, die an einem Spalt eine **Spur** hinterlässt, wenn dort ein Quantenobjekt vorbeikommt – ohne es aufzuhalten. Beispiele:

- **Elektronen:** Man beleuchtet den Bereich hinter den Spalten. Ein vorbeifliegendes Elektron streut ein Photon – ein Lichtblitz zeigt den Spalt an.
- **Photonen:** Hinter Spalt 1 ein Polfilter mit senkrechter, hinter Spalt 2 einer mit waagerechter Durchlassrichtung. Die Polarisation verrät den Spalt.

Ergebnis: Mit eingeschalteten Detektoren verschwinden die Interferenzstreifen. Übrig bleibt eine breite Verteilung ohne Minima – die Summe der Einzelspalt-Verteilungen: $P = P_1 + P_2$. Entscheidend ist nicht ein „Anrempeln", sondern allein, dass eine Spur entsteht, aus der man den Weg ablesen *könnte*.

WESENSZUG 4 – KOMPLEMENTARITÄT

Weginformation („welcher Weg?") und **Interferenzfähigkeit** schließen sich gegenseitig aus. Liegt (prinzipiell) Weginformation vor, gibt es keine Interferenz. Gibt es Interferenz, kann keine Weginformation vorliegen.

Superposition: Keine Weginformation. Der Zustand ist eine Überlagerung beider Möglichkeiten. Es gibt *Interferenz*: $P \neq P_1 + P_2$.

Gemisch: Jedes Objekt hat einen bestimmten Weg genommen (oder trägt eine Markierung). Es gibt *keine Interferenz*: $P = P_1 + P_2$.

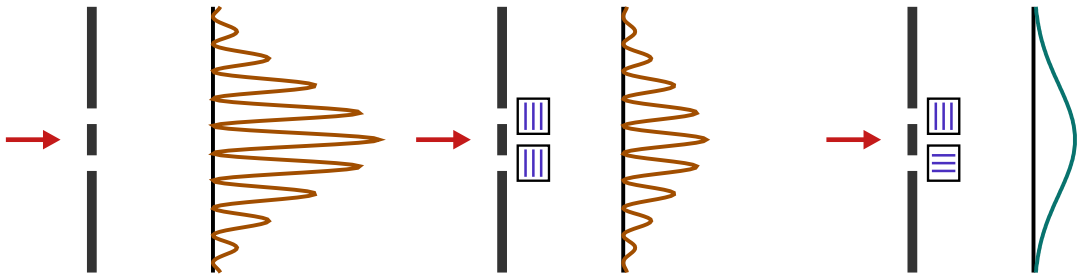
3 Die vier Wesenszüge auf einen Blick (→ Abschnitt 4)

Wesenszug	Was er besagt	Daran erkennst du ihn im Experiment
1 · Stochastische Vorhersagbarkeit	Für ein *einzelnes* Quantenobjekt gibt es nur Wahrscheinlichkeitsaussagen. Wo und wann es nachgewiesen wird, ist zufällig.	Einzelne Auftreffpunkte erscheinen an unvorhersehbaren Stellen; die Zählrate eines Detektors schwankt.
2 · Determiniertheit der Zufallsverteilung	Die *Verteilung* vieler gleich präparierter Quantenobjekte ist durch den Versuchsaufbau festgelegt und reproduzierbar.	Bei vielen Objekten entsteht immer wieder dasselbe Muster; ändert man den Aufbau, ändert es sich vorhersagbar.
3 · Fähigkeit zur Interferenz	Ein einzelnes Quantenobjekt kann interferieren, wenn es mehrere klassisch denkbare Möglichkeiten gibt, die *prinzipiell nicht unterscheidbar* sind (Superposition).	Auch bei sehr geringer Intensität – einzeln nacheinander – baut sich ein Interferenzmuster mit Minima auf.
4 · Komplementarität	Weginformation und Interferenzfähigkeit schließen sich aus. Schon die *prinzipielle* Möglichkeit, den Weg zu kennen, zerstört die Interferenz.	Mit Welcher-Weg-Detektor (oder Markierung per Polfilter) verschwinden die Streifen: $P = P_1 + P_2$.

So argumentierst du: Beobachtung beschreiben (einzelnes Objekt, viele Objekte) – Wesenszug benennen – Bedingung prüfen (Möglichkeiten unterscheidbar? Weginformation?) – Folgerung ziehen (Interferenz ja oder nein, und warum?).

4 Komplementarität im Experiment: Doppelspalt mit Polfiltern

Licht (auch einzelne Photonen) fällt auf einen Doppelspalt. Direkt hinter jeden Spalt kann man einen Polfilter setzen. Was auf dem Schirm passiert, hängt nur davon ab, ob die Polfilter den Weg *verraten*:



ohne Polfilter
Interferenz

Polfilter parallel
Interferenz

Polfilter gekreuzt
keine Interferenz

Nachweiswahrscheinlichkeit auf dem Schirm (qualitativ). Die Striche in den kleinen Kästchen zeigen die Durchlassrichtung der Polfilter.

- **Ohne Polfilter:** Man kann nicht unterscheiden, durch welchen Spalt ein Photon gekommen ist. Es entsteht ein Interferenzmuster.
- **Polfilter parallel** (beide senkrecht): Alle Photonen sind danach gleich polarisiert. Der Weg ist weiterhin nicht erkennbar – das Interferenzmuster bleibt, nur halb so hell.
- **Polfilter gekreuzt** (senkrecht und waagerecht): Die Polarisation verrät jetzt den Spalt. Die Minima verschwinden; übrig bleibt die Summe $P_1 + P_2$. Das gilt, obwohl niemand die Polarisation tatsächlich misst: Es genügt, dass man den Weg *prinzipiell* ablesen könnte.

ABITURRELEVANTE ARGUMENTATION – MUSTERLÖSUNG

Aufgabe (typisch „erläutern“)
Elektronen werden einzeln durch einen Doppelspalt geschickt. Hinter den Spalten wird Licht eingestrahlt: Ein vorbeifliegendes Elektron streut ein Photon, sodass ein Lichtblitz am Spalt 1 oder am Spalt 2 aufleuchtet. Erläutere, wie sich das Schirmbild verändert.

1. Beobachtung ohne Licht: Jedes Elektron erzeugt einen Punkt an zufälliger Stelle; viele Punkte bilden ein Interferenzmuster.
2. Wesenszug benennen: Komplementarität von Weginformation und Interferenz.
3. Bedingung prüfen: Mit Licht verrät der Blitz den Spalt – es liegt Weginformation vor.
4. Folgerung: Das Interferenzmuster verschwindet. Es bleibt eine breite Verteilung ohne Minima: $P = P_1 + P_2$.

?!

Quantenphysik und Weltbild

Zufall ohne Ursache, Eigenschaften ohne festen Wert, Zusammenhänge über große Entfernungen: Was die Quantenphysik für unser Bild von der Wirklichkeit bedeutet.

Nobelpreis für „spukhafte Fernwirkung“

Der Physik-Nobelpreis 2022 ging an drei Forscher, die mit **verschränkten** Photonenpaaren eine erstaunliche Frage geklärt haben: Haben Quantenobjekte ihre Eigenschaften schon, bevor man sie misst – so wie ein Ball seine Farbe hat, auch wenn niemand hinsieht? Die Antwort der Experimente lautet: nein. Genau diese Effekte nutzen heute **Quantencomputer** und abhörsichere **Quantenkommunikation**.

Die Quantenphysik sagt die Ergebnisse von Experimenten sehr genau voraus. Schwierig wird es, wenn wir sie in vertraute Begriffe aus dem Alltag übersetzen wollen. Vier Begriffe sind dabei besonders wichtig. Bei allen vier lohnt sich derselbe Vergleich: Was gilt im Alltag – und was zeigen die Experimente mit Quantenobjekten?

1 Realität, Lokalität, Kausalität, Determinismus (→ Abschnitt 4)

Realität – Haben Dinge ihre Eigenschaften auch ohne Messung?

Im Alltag: Eine Münze unter einem Becher zeigt Kopf oder Zahl, schon bevor man nachsieht. Das Nachsehen verrät nur, was ohnehin feststand.

Quantenphysik: Eigenschaften wie „der Weg durch den Doppelspalt“ sind vor einer Messung im Allgemeinen **nicht festgelegt**. Erst die Messung liefert einen Wert. Wäre der Weg vorher festgelegt, müsste am Doppelspalt $P_1 + P_2$ herauskommen – gemessen wird aber ein Interferenzmuster (Einheit 5).

Lokalität – Wirkt nur, was in der Nähe ist?

Im Alltag: Was in Hamburg geschieht, kann einen Gegenstand in Tokio nicht im selben Augenblick beeinflussen. Wirkungen breiten sich höchstens mit Lichtgeschwindigkeit aus.

Quantenphysik: Bei **verschränkten** Photonenpaaren hängen die Messergebnisse an zwei weit entfernten Orten zusammen – und zwar so, dass sich das nicht mit vorher festgelegten Eigenschaften erklären lässt (nächste Seite). Nachrichten schneller als Licht kann man damit trotzdem nicht senden.

Kausalität – Hat alles eine Ursache?

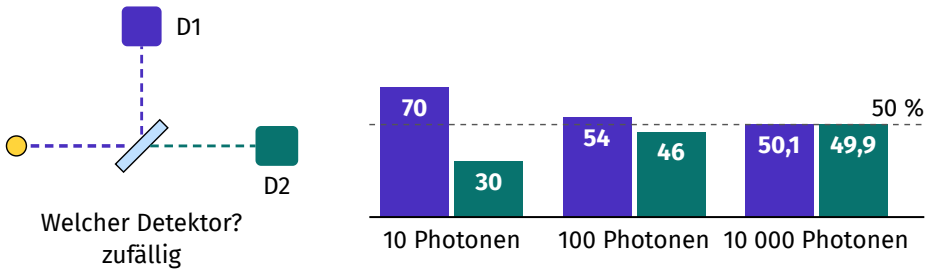
Im Alltag: Jede Wirkung hat eine Ursache, die ihr vorausgeht: Die Tasse fällt, weil sie vom Tisch gestoßen wurde.

Quantenphysik: Ein Photon trifft auf einen halbdurchlässigen Spiegel. Warum *dieses* Photon Detektor 1 auslöst und nicht Detektor 2, hat **keine Ursache**. Kausal bleibt aber die *Verteilung*: Der Versuchsaufbau legt fest, dass auf lange Sicht jeder Detektor die Hälfte bekommt.

Determinismus – Ist die Zukunft festgelegt?

Klassische Physik: Kennt man Ort und Geschwindigkeit einer Billardkugel genau, ist ihr weiterer Weg eindeutig vorherbestimmt.

Quantenphysik: Das einzelne Ergebnis ist **zufällig** (stochastische Vorhersagbarkeit). Festgelegt sind nur die Wahrscheinlichkeiten und damit die Verteilung vieler Ergebnisse (Determiniertheit der Zufallsverteilung).



Am Strahlteiler: Welcher Detektor beim nächsten Photon klickt, ist zufällig. Mit wachsender Zahl stellt sich die vom Aufbau festgelegte Verteilung 50 % zu 50 % immer genauer ein (Anteile in %, Beispielwerte).

MERKE

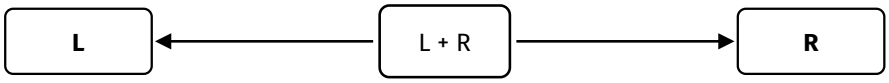
Begriffe aus der Anschauungswelt lassen sich nicht ohne Weiteres auf Quantenobjekte übertragen. Für **einzelne** Ergebnisse gelten Realität, Kausalität und Determinismus nicht im gewohnten Sinn – für die **Verteilung** vieler Ergebnisse dagegen schon.

2 Verschränkung: Handschuhe oder Quantenobjekte?

Packt man ein Paar Handschuhe getrennt in zwei Kisten und schickt sie in zwei Städte, gilt: Wer „links“ auspackt, weiß sofort, dass am anderen Ort „rechts“ liegt. Das ist nicht geheimnisvoll – das Ergebnis stand schon beim Verpacken fest.

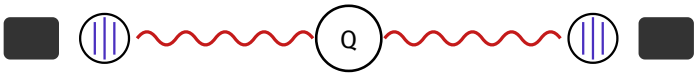
Bei **verschränkten Photonen** sind die Messergebnisse ebenfalls verknüpft: Stehen die Polfilter an beiden Stationen parallel, kommen entweder beide Photonen durch oder keines. Jedes einzelne Ergebnis ist dabei zufällig. Misst man mit verschieden gedrehten Filtern, sind die Zusammenhänge sogar **stärker**, als es mit vorher festgelegten Eigenschaften überhaupt möglich wäre. Die Handschuh-Erklärung scheitert also.

Handschuhpaar (Alltag)



Welcher Handschuh wohin reist, steht schon beim Verpacken fest.

Verschränktes Photonenpaar (Quantenphysik)



Station A Station B

Ergebnisse zufällig, aber korreliert – vorher nicht festgelegt.

Oben: Beim Handschuhpaar steht das Ergebnis von Anfang an fest. Unten: Bei verschränkten Photonen ist jedes Ergebnis zufällig – trotzdem passen die Ergebnisse an beiden Stationen zusammen.

3 Teilchen, Welle, Bahn – Modelle mit Grenzen

Begriffe wie *Teilchen*, *Welle* oder *Bahn* stammen aus der makroskopischen Welt. Für Quantenobjekte sind sie nur **Modelle**: Jedes beschreibt bestimmte Beobachtungen gut und versagt bei anderen.

Modell	beschreibt gut …	versagt bei …
Teilchenmodell	den Nachweis an *einer* Stelle, die festen Energieportionen $E = h \cdot f$ (Fotoeffekt)	der Interferenz einzelner Quantenobjekte am Doppelspalt
Wellenmodell	die Verteilung vieler Nachweise, Beugung und Interferenz, $\lambda = h/p$	dem punktförmigen Nachweis und dem Fotoeffekt (Grenzfrequenz, keine Verzögerung)
Bahn	Bälle, Planeten, Elektronenstrahlen in großen Röhren	dem Doppelspalt ohne Weginformation und dem Elektron im Atom (Einheit 9)

4 Diskutieren: Was ist ein Quantenobjekt? (→ Abschnitt 6)

Tipps für Argumentationen zur Quantenphysik:

- Trenne sauber zwischen *Einzelereignis* (zufällig) und *Verteilung* (determiniert).
- Sprich von „Nachweis“ bzw. „Nachweiswahrscheinlichkeit“ statt von „Aufenthalt“, wenn es um Messungen geht.
- Vermeide Bahnbegriffe („fliegt durch Spalt 1“) für Situationen ohne Weginformation.
- Nutze Modelle bewusst: „Im Wellenmodell lässt sich … beschreiben, im Teilchenmodell …“.

VERDACHT?!

„Ein Elektron ist in Wirklichkeit ein kleines Kügelchen – wir wissen nur nicht, durch welchen Spalt es fliegt.“ Dann hätte jedes Elektron einen festen Weg, und auf dem Schirm müsste $P_1 + P_2$ entstehen. Gemessen wird aber ein Interferenzmuster mit Stellen, an denen nie ein Elektron ankommt. Die Aussage widerspricht also dem Experiment.

SO BESCHREIBST DU EIN QUANTENOBJEKT (Z. B. PHOTON ODER ELEKTRON)

- Es wird immer **als Ganzes an einer Stelle** nachgewiesen – nie „halb“ oder verschmiert.
- Wo und wann ein einzelnes Quantenobjekt nachgewiesen wird, ist **zufällig**; die **Verteilung** vieler Nachweise ist durch den Aufbau festgelegt.
- Gibt es mehrere ununterscheidbare Möglichkeiten, zeigt die Verteilung **Interferenz** – auch wenn die Objekte einzeln kommen.
- **Weginformation und Interferenz** schließen sich aus.

E_n

Atome leuchten in ihren eigenen Farben

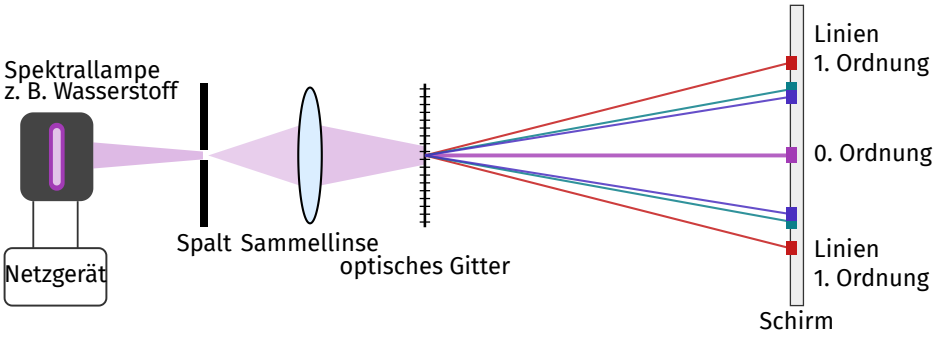
Linienspektren, Energieniveaus, Emission und Absorption: Wie Atome Energie nur portionsweise aufnehmen und abgeben.

Feuerwerk, Polarlicht und ein Element aus der Sonne

Das Rot im Feuerwerk stammt von Strontium, das Grün von Barium oder Kupfer, das Gelb von Natrium; Polarlichter leuchten grün und rot, weil angeregte Sauerstoffatome bestimmte Farben aussenden. Jedes Element hat seinen eigenen „Fingerabdruck“ aus Spektrallinien: 1868 entdeckten Astronomen im Sonnenlicht eine gelbe Linie, die zu keinem bekannten Element passte – so wurde **Helium** gefunden, Jahrzehnte bevor man es auf der Erde nachwies.

1 Linienspektren: Fingerabdrücke der Elemente (→ Abschnitt 1)

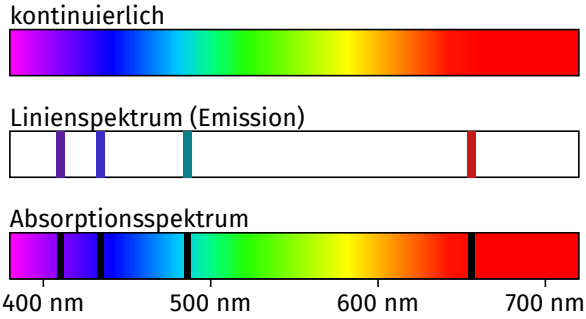
Bringt man ein Gas in einer **Gasentladungsröhre** (Spektrallampe) zum Leuchten und zerlegt das Licht mit einem Gitter, sieht man kein lückenloses Farbband, sondern einzelne, scharfe farbige Linien: ein **Linienspektrum** (diskretes Spektrum).



Aufbau zur Beobachtung eines Linienspektrums (von oben, nicht maßstäblich). Jede Wellenlänge wird unter einem anderen Winkel abgelenkt: Es entstehen einzelne farbige Bilder des Spalts, die **Spektrallinien**.

Woher der Unterschied kommt, hängt davon ab, *was* da leuchtet:

- **Kontinuierliches Spektrum:** Glühende Festkörper und dichte Gase (Glühlampe, Sonnenoberfläche) senden **alle** Wellenlängen aus – die Atome stehen eng zusammen und beeinflussen sich ständig.
- **Linienspektrum:** Leuchtende Gase geringer Dichte (einzelne Atome) senden nur **bestimmte**, für das Element charakteristische Wellenlängen aus.
- **Absorptionsspektrum:** Schickt man weißes Licht durch ein kühles Gas, fehlen genau diese Wellenlängen: dunkle Linien auf hellem Grund.



Spektren im Vergleich; Linien- und Absorptionsspektrum von Wasserstoff

2 Das Energiestufenmodell (→ Abschnitt 3)

Linienspektren lassen sich so erklären: Ein Atom kann nur in bestimmten Zuständen mit festen Energien existieren. Diese Zustände stellt man in einem **Energieniveauschema** dar.

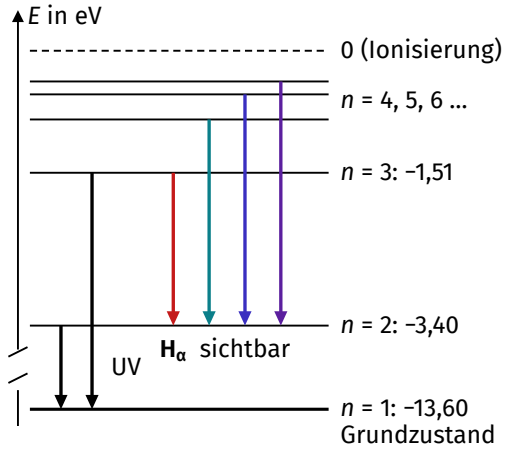
So liest du ein Energieniveauschema

- **Die senkrechte Achse ist die Energie des Atoms.** Je weiter oben eine Linie, desto mehr Energie hat das Atom.
- **Jede waagerechte Linie ist ein erlaubter Zustand** (Energieniveau). Dazwischen gibt es keine erlaubten Energien – wie auf einer Treppe.
- **Die waagerechte Richtung hat keine Bedeutung** – kein Ort, keine Bahn des Elektrons.
- **Nummerierung** von unten nach oben (n = 1, 2, 3 …); nach oben rücken die Niveaus immer enger zusammen.
- **Pfeile zeigen Übergänge:** nach oben Energieaufnahme (Anregung), nach unten Energieabgabe, meist als Photon. Die Pfeillänge ist die Energiedifferenz.

2 Das Energiestufenmodell (Fortsetzung) (→ Abschnitt 3)

- **Grundzustand:** Zustand niedrigster Energie, in dem sich ein Atom normalerweise befindet.
- **Angeregte Zustände:** Atome verlassen sie nach kurzer Zeit (typisch 10^{-8} s) unter Aussendung eines Photons; der genaue Zeitpunkt ist zufällig.
- **Ionisierungsenergie:** Mindestenergie, um ein Elektron ganz aus dem Atom zu lösen (Wasserstoff: 13,6 eV). Ein gerade freies Elektron hat $E = 0$; gebundene Zustände haben negative Energie.

$$h \cdot f = |\Delta E| = E_{\text{oben}} - E_{\text{unten}}$$
Photonenenergie bei Emission bzw. Absorption (Quantensprung)



Energieniveauschema des Wasserstoffatoms mit Übergängen: Die sichtbaren Linien enden alle auf $n = 2$ (Balmer-Serie), die Übergänge auf $n = 1$ liegen im UV.

VERDACHT?!
„Elektronen kreisen auf festen Bahnen um den Kern." Dieses Planetenmodell ist **falsch** – Elektronen haben im Atom keine Bahnen. Gültig bleibt das **Energiestufenmodell**: Die Energieniveaus kann man messen.

3 Emission und Absorption am Wasserstoffatom (→ Abschnitt 4)

Für Wasserstoff gilt $E_n \approx -13{,}6\ \text{eV}/n^2$ (die Formel musst du nicht kennen – im Abitur werden Niveauwerte angegeben):

n	1	2	3	4	5	6	∞
E_n in eV	−13,60	−3,40	−1,51	−0,85	−0,54	−0,38	0

Absorption: Atome eines kühlen Gases absorbieren genau die Photonen, deren Energie zu einem Übergang *aus dem besetzten Zustand nach oben* passt. Die angeregten Atome senden die Energie zwar wieder aus – aber in *alle* Richtungen, sodass in Durchstrahlrichtung Licht fehlt (**Absorptionsspektrum**; im Sonnenspektrum: **Fraunhofer-Linien**). **Resonanzabsorption:** Eine Natriumflamme wirft im Licht einer Natriumdampflampe einen dunklen Schatten; im Licht einer anderen Lampe ist sie nahezu durchsichtig.

4 Rechnen mit Energieniveauschemata (→ Abschnitt 6)

Quecksilber (Energien bezogen auf den Grundzustand, vereinfachter Ausschnitt aus dem Termschema):

Niveau	A (Grundzustand)	B	C	D	E	Ionisierung
E in eV	0	4,67	4,89	5,46	7,73	10,44

ABITURRELEVANTE RECHENANSÄTZE – MUSTERRECHNUNGEN

Wellenlänge der H_α-Linie ($n = 3 \to n = 2$)

Ansatz: $\frac{h \cdot c}{\lambda} = E_3 - E_2 \Rightarrow \lambda = \frac{h \cdot c}{E_3 - E_2}$

$E_3 - E_2 = -1{,}51\ \text{eV} - (-3{,}40\ \text{eV}) = 1{,}89\ \text{eV}$

$\lambda = \frac{6{,}626 \cdot 10^{-34}\ \text{J s} \cdot 3{,}00 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{1{,}89 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J}} \approx$ **657 nm**

(rot; gemessen: 656 nm)

Zuordnung einer Hg-Linie (gemessen: $\lambda = 546$ nm)

Ansatz: $\Delta E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6{,}626 \cdot 10^{-34}\ \text{J s} \cdot 3{,}00 \cdot 10^{8}\ \text{m/s}}{546 \cdot 10^{-9}\ \text{m}}$

$\Delta E \approx 3{,}64 \cdot 10^{-19}\ \text{J} \approx 2{,}27\ \text{eV}$

passt zum Übergang E → D: 7,73 eV − 5,46 eV = **2,27 eV**

1s

Wo ist das Elektron? Orbitale des Wasserstoffatoms

Elektronen kreisen nicht auf Bahnen um den Kern. Orbitale zeigen stattdessen, wo man das Elektron mit welcher Wahrscheinlichkeit nachweisen kann.

Kann man ein Atom sehen?

Mit einem **Rastertunnelmikroskop** lassen sich einzelne Atome auf einer Oberfläche sichtbar machen. Auf den Bildern erscheinen sie als weiche, verschwommene Hügel – nicht als Kugeln, um die Elektronen wie kleine Planeten kreisen. Das passt genau zu dem, was die Quantenphysik über das Elektron im Atom sagt: Es hat dort keine Bahn. Wo es sich zeigt, ist nur mit einer bestimmten **Wahrscheinlichkeit** vorhersagbar.

1 Vom Planetenmodell zum Orbital

Das bekannte Bild vom Atom zeigt einen Kern, um den Elektronen auf Kreisbahnen laufen – wie Planeten um die Sonne. Dieses **Planetenmodell** ist anschaulich, aber falsch. Elektronen sind **Quantenobjekte**. Schon am Doppelspalt haben wir gesehen: Ohne Weginformation kann man einem Elektron keine Bahn zuschreiben (Einheit 5). Im Atom ist das genauso.

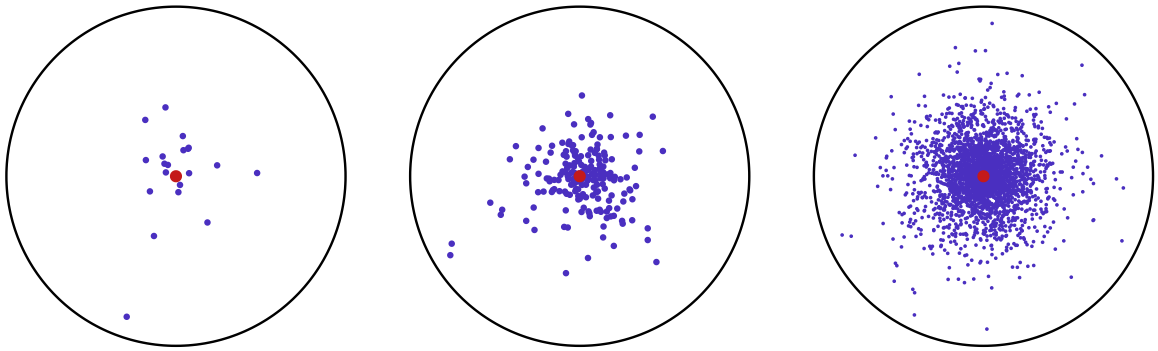
Was man sinnvoll fragen kann, ist: **Mit welcher Wahrscheinlichkeit wird das Elektron an einer bestimmten Stelle nachgewiesen?** Die Antwort darauf geben die **Orbitale**.

VERDACHT?!

„Das Elektron kreist auf einer festen Bahn um den Kern." Nein – Elektronen haben im Atom keine Bahn. Fest liegen nur die **Energieniveaus** (Einheit 8) und die **Verteilung** der Nachweiswahrscheinlichkeit.

2 Orbitale: Wolken der Nachweiswahrscheinlichkeit (→ Abschnitt 8)

Stell dir vor, man könnte in sehr vielen gleichen Wasserstoffatomen im Grundzustand jeweils einmal nachsehen, wo das Elektron ist, und jeden Nachweisort als Punkt einzeichnen. Das ist dasselbe Vorgehen wie beim Doppelspalt mit einzelnen Elektronen:



20 Nachweise | 200 Nachweise | 3.000 Nachweise

Nachweisorte des Elektrons im Wasserstoffatom (Grundzustand, Schnittbild durch den Kern, simuliert). Roter Punkt: Kern. Der Kreis hat einen Radius von etwa 0,24 nm.

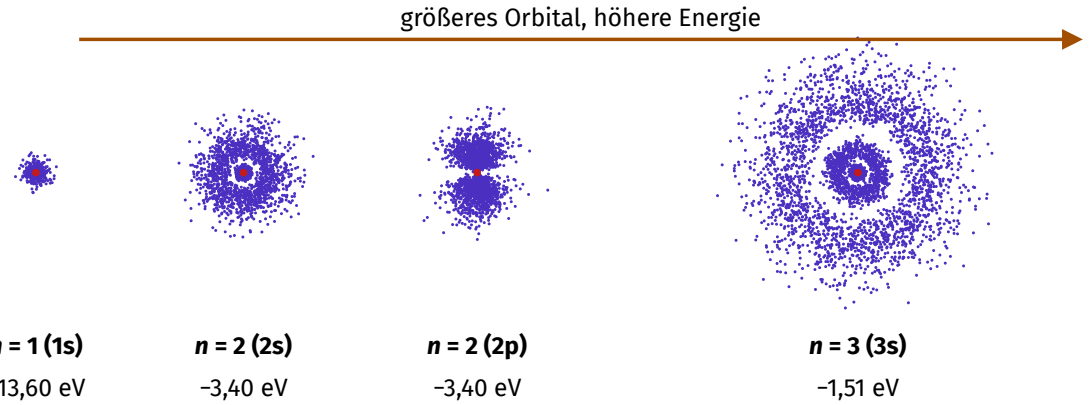
- **Jeder einzelne Nachweis ist zufällig.** Wo das Elektron im nächsten Atom gefunden wird, lässt sich nicht vorhersagen.
- **Die Verteilung vieler Nachweise ist festgelegt.** Nach vielen Messungen entsteht immer dieselbe „Wolke": dicht in der Nähe des Kerns, nach außen immer dünner.
- **Die Wolke hat keinen scharfen Rand.** Deshalb zeichnet man Orbitale oft als Fläche, innerhalb derer das Elektron mit z. B. 90 % Wahrscheinlichkeit nachgewiesen wird.

MERKE

Ein **Orbital** veranschaulicht die **Nachweiswahrscheinlichkeit** des Elektrons im Atom: Wo die Wolke dicht ist, wird das Elektron häufig nachgewiesen, wo sie dünn ist, selten. Ein Orbital zeigt *nicht*, wo das Elektron „herumfliegt".

3 Orbitale und Energieniveaus

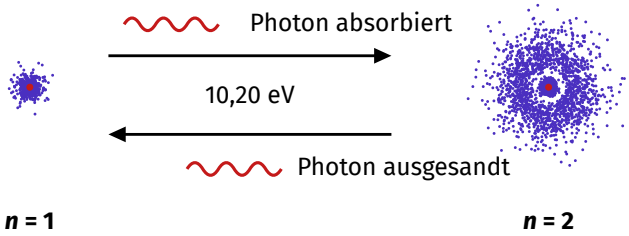
Zu jedem Energieniveau des Wasserstoffatoms (Einheit 8) gehören eigene Orbitale. Die Abbildung zeigt sie im **gleichen Maßstab**, darunter die Energie des Atoms im jeweiligen Zustand:



Orbitale des Wasserstoffatoms (Schnittbilder durch den Kern, gleicher Maßstab, simuliert; roter Punkt: Kern). Bei $n = 2$ gibt es Orbitale verschiedener Form mit derselben Energie (2s und 2p); bei $n = 3$ ist nur eines dargestellt.

- **Grundzustand ($n = 1$):** Das 1s-Orbital ist kugelförmig und klein. Das Elektron wird meist sehr nah am Kern nachgewiesen, typischerweise innerhalb von etwa 0,1 nm.
- **Höheres n:** Die Orbitale werden deutlich größer. Das Elektron wird im Mittel weiter vom Kern entfernt nachgewiesen, und die Energie ist höher (weniger negativ).
- **Knotenflächen:** Ab $n = 2$ gibt es Bereiche, in denen das Elektron *nie* nachgewiesen wird (beim 2s eine Kugelschale, beim 2p eine Ebene durch den Kern) – ähnlich wie die Minima am Doppelspalt.
- **Für das Abitur** genügt die Hauptquantenzahl n. Die Bezeichnungen s und p musst du nicht kennen.

Anregung im Orbitalbild: Absorbiert ein Wasserstoffatom im Grundzustand ein Photon mit genau 10,20 eV, wechselt es in den Zustand $n = 2$. Das Elektron wird danach in einem der größeren Orbitale nachgewiesen. Sendet das Atom die Energie später als Photon wieder aus, ist es zurück im kleinen 1s-Orbital. Mit mindestens 13,6 eV wird das Elektron ganz vom Atom gelöst (Ionisierung).



Anregung und Emission im Orbitalbild (gleicher Maßstab)

ABITURRELEVANTE RECHENANSÄTZE – MUSTERRECHNUNGEN

Anregung 1 → 2 ($E_1 = -13{,}60$ eV, $E_2 = -3{,}40$ eV)

Ansatz: $E_{Ph} = E_2 - E_1$ und $\lambda = \dfrac{h \cdot c}{E_{Ph}}$

$E_{Ph} = -3{,}40\text{ eV} - (-13{,}60\text{ eV}) = 10{,}20\text{ eV} \approx 1{,}634 \cdot 10^{-18}\text{ J}$

$\lambda = \dfrac{6{,}626 \cdot 10^{-34}\text{ J s} \cdot 3{,}00 \cdot 10^{8}\text{ m/s}}{1{,}634 \cdot 10^{-18}\text{ J}} \approx$ **122 nm** (UV)

Ionisierung aus dem Grundzustand (13,60 eV)

Ansatz: $E_{Ph} = 0 - E_1 = 13{,}60\text{ eV} \approx 2{,}179 \cdot 10^{-18}\text{ J}$

$\lambda = \dfrac{6{,}626 \cdot 10^{-34}\text{ J s} \cdot 3{,}00 \cdot 10^{8}\text{ m/s}}{2{,}179 \cdot 10^{-18}\text{ J}} \approx$ **91,2 nm**

Photonen mit kürzerer Wellenlänge ionisieren ebenfalls; der Rest der Energie bleibt dem Elektron als Bewegungsenergie.

So beschreibst du ein Orbital: „Das Orbital gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Elektron an einem Ort nachgewiesen wird. In dichten Bereichen ist die Nachweiswahrscheinlichkeit groß, in dünnen klein. Das Elektron hat keine Bahn."