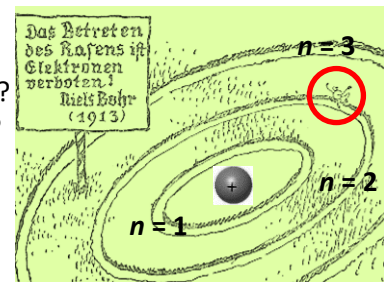


Modul 2: AUFGABEN ZUM DENKEN UND DISKUTIEREN, ZUM REPETIEREN UND RECHNEN**2.1) Kontrollfragen zum Modul 2**

- Seite 2: Welche Größenordnung kann man mit dem Elektronenmikroskop auflösen?
 Seite 5: Wieso braucht Bohr ein Quantenpostulat zusätzlich zur «gewöhnlichen Physik»?
 Seite 6: Welche Mängel hat Bohrs Atommodell?
 Seite 8: Welche Deutung von Bohrs Quantenregel liefert der «jüngere de Broglie»?
 Seite 11: Wieso waren die de Broglie-Wellen bald überholt?
 Seite 12: Wieso war es schwierig, den Wellenaspekt von Elektronen mit einem Doppelspalt zu zeigen?
 Seite 13: Wo im Interferenzmuster zeigt sich der Unterschied Quantenobjekt/Teilchen sehr deutlich?
 Seite 15: Wieso hat noch nie ein Auto die Garage durch Tunneleffekt verlassen?
 Seite 17: Wo nutzen Sie den Tunneleffekt im Alltag?
 Seite 18: Was hat die Stabilität eines Gasplaneten mit derjenigen des Atoms zu tun?
 Seite 19: Wie bewältigen wir das Problem, dass wir Schrödingers Wellen nicht berechnen können?
 Seite 21: Was ist im H-Atom in der Entfernung des Bohrschen Radius los?
 Seite 22: Weshalb kann es zu einer Energiestufe verschiedene Orbitale geben?
 Seite 23: Wie hängen ψ und Wahrscheinlichkeitsdichte nach Born zusammen?
 Seite 25: Was ist faul im Land der Quantenskifahrerin?
 Seite 26: Wie zeigt sich die Komplementarität beim Experiment von Dürr et al.?
 Seite 27: Was geschieht mit seinem Zustand, wenn ein angeregtes Atom seine Energie abgibt?
 Seite 30: Welche Farbe hätte der Quantenpunkt, wenn die klassische Physik für ihn richtig wäre?

2.2) Zum Bohrschen Atommodell

- Was meint man mit «Planetenmodell des Atoms»?
- Welches Element von Bohrs Modell steckt nicht im Planetenmodell?
- Welche Eigenheiten der Abbildung haben im Atom kein Gegenstück?
- Welche Schwachstellen besitzt Bohrs Atommodell?
- Suchen Sie 3 Quellen mit Bohrs Atommodell. Wie alt sind sie?
- Suchen Sie nach Darstellungen eines Moleküls im Bohr-Modell.

**2.3) Rutherford an Bohr im Brief vom 20. März 1913**

I have received your paper safely and read it with great interest, but I want to look it over again (...). Your ideas as to the origin of the spectrum of hydrogen are very ingenious, and seem to work out well; but the mixture of Planck's ideas with the old mechanics makes it very difficult to form a physical idea of what is the basis of it. There appears to me one grave difficulty in your hypothesis (...) how does an electron decide what frequency it is going to vibrate. (...) you have to assume that the electron knows beforehand where it is going to stop.

- Was bedeutet wohl die Formulierung *work out well*?
- Was ist die Mischung von Plancks Idee und klassischer Mechanik?
- Wieso muss ein Elektron von Anfang an wissen, wo es stoppen wird?

2.4) Zum Experiment von Claus Jönsson

- Bestimmen Sie den Sinus des Winkels zwischen der Symmetrieachse und dem ersten Nebenmaximum wenn Jönssons Elektronen $c/3$ schnell waren mit den Angaben der Abbildung in 2.3.3.
- In unserem Bild beträgt die Entfernung zwischen Symmetrieachse und erstem Nebenmaximum etwa 4 mm. Wie gross hätte die Entfernung vom Doppelspalt zum Film sein müssen, wenn Jönsson den Film ohne Elektronenmikroskop direkt hätte belichten müssen?
- Was hätte es in der Mitte des Films, wenn Elektronen klassische Kügelchen wären?

2.5) George Paget Thomson bestätigt die de Broglie-Wellenlänge von Elektronen präzise

1927 strahlte G. P. Thomson Elektronen mit 13 kV auf etwa 10 nm dünne Nickelkristallite, ähnlich wie beim Graphit-Schulexperiment. Für dieses Experiment erhielt er den Nobelpreis.

- Wie schnell waren diese Elektronen? Rechnen Sie klassisch. Wie gross war ihre dB-Wellenlänge?
- Wie gross ist auf Grund dieser Daten der Ablenkungswinkel bei einer Gitterkonstanten von 215 pm?

2.6) Der Tunneffekt

Wir können den Tunneffekt nur qualitativ verstehen. Trotzdem machen wir eine Rechnung zu Gamows Überlegungen: Die Energie beim Alpha-Zerfall ist von der Grössenordnung 4 MeV (4.2 MeV beim U-238). Der zugehörige Impuls darf klassisch berechnet werden. Berechnen Sie die de Broglie-Wellenlänge eines Alphas und schliessen Sie daraus auf die «Dicke» der «Wand» des Atomkerns. Vergleichen Sie mit dem Radius des Urankerns, der etwa $7 \cdot 10^{-15}$ m beträgt.

2.7) Emission und Absorption

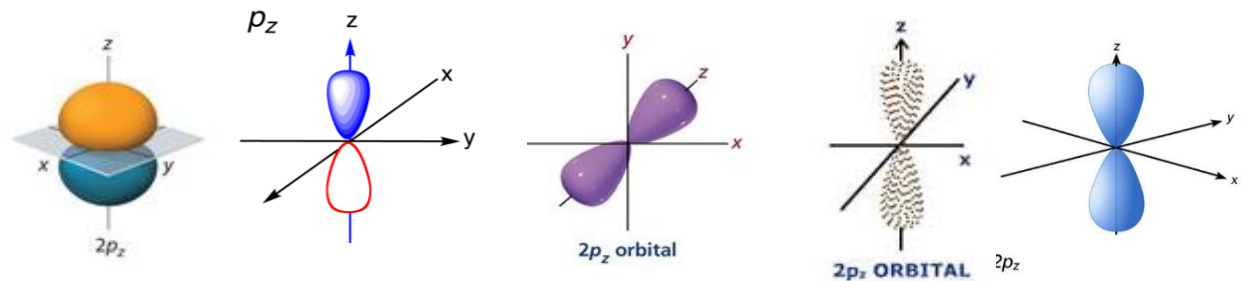
- a) Berechnen Sie zum Übergang vom 2s- in den 1s-Zustand mit den Daten von 2.5.3 das Folgende: die Energie in Joule, die Frequenz und die Wellenlänge des ausgesandten Lichts.
- b) Warum muss Licht, welches das H-Atom vom Grundzustand 1s- in den angeregten Zustand 2s bringt, genau die bei a) berechnete Wellenlänge besitzen?

2.8) Der 2s-Zustand des Wasserstoff-Atoms

Zeichnen Sie im Schnitt das Orbital des 2s-Zustand des Wasserstoffs mit $\psi_2(r) = c \cdot [1 - r/2a] \cdot e^{-r/2a}$.

2.9) Das $2p_z$ -Orbital in verschiedensten Darstellungen

- a) Vergleichen Sie die fünf verschiedenen Darstellungen des $2p_z$ -Orbitals!



- b) Wie kommt eigentlich das Elektron vom oberen in den unteren Teil des Orbitals?
- c) Vergleichen Sie in Physikbüchern die Darstellung der Elektronen im Zusammenhang mit der Leitfähigkeit von Metallen und Halbleitern.

2.10) Elektronen im Grundzustand wirbeln nicht um den Kern.

Bei der Heliumatomstrahl-Analyse (Internet-Recherche) werden He-Atome mit einer Energie von ca. 50 meV auf die zerstörungsfrei zu untersuchende Oberfläche geschossen und die Reflexion gemessen.
 – Wieso wäre diese Methode unbrauchbar, wenn die 1s-Elektronen des Heliums um den Kern herum wirbelten, wie im Bohr-Modell vorgeschrieben?

2.11) Albert Einstein möchte lieber Schuster sein als Physiker (2.6.3)

- a) Wie bezeichnen wir den Prozess, bei dem *ein einem Strahl ausgesetztes Elektron aus freiem Entschluss den Augenblick und die Richtung wählt, in der es fortspringen will?*
- b) Der Zeitpunkt zum «Quantensprung» gemäss 2.6.3 wird auch *aus freiem Entschluss* gewählt. Untersuchen Sie die Symmetrie beim «Quantensprung» vorher und nachher und geben Sie an, ob auch eine Richtung *aus freiem Entschluss* gewählt wird.

2.12) Besser als die Quantenskifahrerin: Super-Curling auf dem Bodensee mit $\hbar = 10^{35} \cdot \hbar$

- a) Welche Probleme gibt es nicht, wenn man sich anstelle der Skifahrerin von Figur 2.14 einen 20 kg schweren Curling-Stein denkt, der mit 3 m/s «gesetzt» wird und das Spiel auf dem zugefrorenen Bodensee mit reibungsfreiem Super-Eis stattfindet? Welche Probleme bleiben?
- b) Untersuchen Sie ein «Super-Curling-Zeilinger-Experiment» unter der Annahme, dass Plancks Konstante auf das 10^{35} -fache gewachsen sei.
- c) Wir vergrössern Zeilingers Experiment um 10^4 von Lindau bis Schaffhausen. – Wie breit sind die Spalten? Wieviel verschiebt sich der Detektor? Wie «dick» wären die Neutronen (Kern 10^{-15} m)?

2.13) Könnte die abstrakte ψ -Welle so etwas sein, wie die unsichtbare Grippe-Welle?

KAPITEL 2: KURZ-LÖSUNGEN DER AUFGABEN

2.1 -

- 2.2a Elektronen umkreisen den Kern in bestimmten Bahnen
- 2.2b nur bestimmte Bahnradien wegen Quantisierungspostulat
- 2.2c z. B. Rasen, anstatt Vakuum
- 2.2d flach; falscher Drehimpuls im Grundzustand; nicht brauchbar für komplizierte Atome
- 2.2e teilweise ganz neu
- 2.2f Bild rechts



- 2.3a -
- 2.3b -
- 2.3c -

2.4a $\lambda_{dB} = h/mv = 7.29 \cdot 10^{-12} \text{ m}$; $\sin(\gamma) = \lambda_{dB} / d = 7.29 \cdot 10^{-12} \text{ m} / 2.00 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 3.64 \cdot 10^{-6}$

2.4b $\lambda_{dB}/d = x/y \Rightarrow y = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ m} / 7.29 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 1 \text{ km}$

<https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-elektron/versuche/doppelspaltversuch-von-joensson>

2.4c Keine Elektronen = Schatten, wie in der Strahlenoptik

2.5a Mit $\frac{1}{2} mv^2 = qU$ wird $v = 6.7 \cdot 10^7 \text{ m/s} = 23\%$ von c . Man müsste relativistisch rechnen.
 $\lambda_{dB} = h/mv = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} / (9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 6.7 \cdot 10^7 \text{ m/s}) = 1.1 \cdot 10^{-11} \text{ m} = 11 \text{ pm}$

2.5b $\sin\vartheta = \lambda_{dB} / 2d \Rightarrow \vartheta = 1.5 \text{ Grad}$

Mehr zu historisch bedeutsamen Experimenten finden Sie unter:

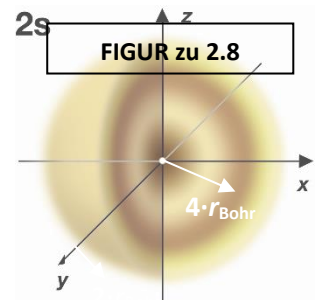
<https://www.leifiphysik.de/quantenphysik/quantenobjekt-elektron/versuche>

2.6 $E = 6.4 \cdot 10^{-13} \text{ J}$; $p = 9.3 \cdot 10^{-20} \text{ mkg/s}$; $\lambda_{dB} = 7.2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
 Tunneleffekt, wenn Wanddicke vergleichbar mit de Broglie-Wellenlänge
 Wand vielleicht ca. 1/10 Radius => Hindurchtunneln ist möglich.

2.7a $E = 10.2 \text{ eV} = 1.63 \cdot 10^{-18} \text{ J}$; $f = E/h = 2.46 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$; $\lambda = c/f = 1.22 \cdot 10^{-7} \text{ m}$

2.7b passender Energieunterschied

2.8 Siehe Figur: Es ist im Vergleich zum 1s-Orbital grösser, hat entsprechend der Nullstelle bei $r = 2a$ eine sogenannte Knotenfläche.
 Auf dieser gilt $w(2a) = 0$. Dann nimmt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit zu bis zum Maximum bei $r = 4a$. Von dort nimmt sie exponentiell ab.
 Das Bild müsste etwas blasser sein, denn die Gesamtmenge der Farbe bedeutet 1 Elektronenladung $w_{\text{aufsummiert}}(\infty) = 1$.



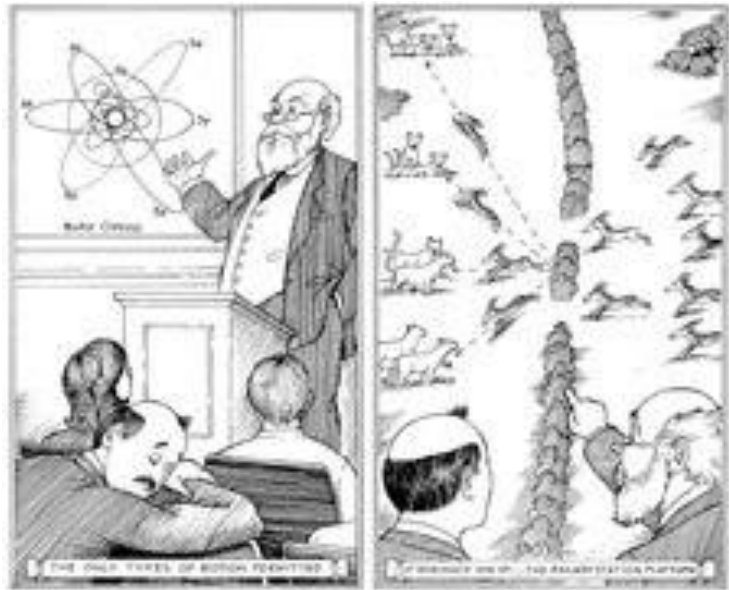
- 2.9a Rotationssymmetrisch um z; spiegelsymmetrisch zu xy; Form umstritten. Doppelmandarine ok.
- 2.9b Falsche Fragestellung! Das Elektron ist überall und nirgends, d.h. in beiden Bereichen gleich oft. Es gibt keine verfolgbare Bahn von «oben» nach «unten». Schrödinger => $\psi_{2p}(0,0,0) = 0$.
- 2.9c Oft werden Elektronen ausserhalb der Quantenphysik als klassische Teilchen dargestellt.

2.10 Anschaulich: Da der Drall unterschiedliche Richtungen hätte, würden die aufprallenden He-Atome zufällig in alle Richtungen abgelenkt. Die Grösse dieses Effekts wäre beträchtlich: Die Rotationsenergie nach Bohr wäre für $k = 1$: $E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{h^2}{(8\pi m r_{\text{Bohr}})^2} = 4 \text{ eV}$, also etwa 1000mal mehr als die Bewegungsenergie. Das würde die Elektronen an der Oberfläche «beschädigen».

2.11a WAS IST LICHT? => Photoeffekt = Elektron, das dem Lichtstrahl ausgesetzt ist, springt fort.

2.11b vorher: 2s ist punktsymmetrisch; nachher: Lichtquant mit Impulsrichtung => nur noch axial-symmetrisch; Richtung von Lichtquant und Rückstossimpuls = aus freiem Entschluss = zufällig

2.12 **Bemerkung zum Bild** aus George Gamows populärwissenschaftlichem Buch aus den 1940er Jahren «Mr. Tompkins in Wonderland»: Wenn der Professor Bohrs Atom-Modell erläutert, schläft Mr. Tompkins (a banker [who] seeks enlightenment in physics). Aber beim Doppelspaltexperiment mit Gazellen, die, von rechts kommend, von Raubtieren gefressen werden, hört er aufmerksam zu. Die Veranschaulichung des Doppelspaltexperiments mit Gazellen ist problematisch, da sie mit dem Boden wechselwirken. Die Zeichnung der 1999-Neuausgabe ist irreführend, da die Gazellen als Teilchen, nämlich als lokalisierbare Objekte ohne Wellenaspekt erscheinen. Die Raubtiere sind unsinnig nahe beim Doppelspalt: *It is completely impossible to create a detailed visual description of what happens in a quantum experiment between the preparation of the system and the final observation*, schreibt Anton Zeilinger in der Buchbesprechung.



- 2.12a Es gibt keine Spuren, denn es gibt keine Wechselwirkung mit dem Super-Eis. Der Curling-Stein ist ein klassisches Objekt ohne Wellenaspekt.
- 2.12b Es gibt ein Hauptmaximum genau in der Mitte der zentralen Schattenzone. De Broglie-Wellenlänge = $66 \text{ Js} / 60 \text{ mkg/s} = 1.1 \text{ m}$
 - 1. Nebenmaxima ca. bei $1.1 \text{ m} / 10 \text{ m} = x / 100 \text{ m} \Rightarrow x = 11 \text{ m} \Rightarrow$ vgl. Fig. 2.5d.
 - 2. Nebenmaxima ca. bei 22 m, d.h. mitten in der geometrischen Hell-Zone
- 2.12c Experiment ca. 100 km; Spalten ca. 1 m; Neutronen ca. 10^{-11} m . Vergrösserte Neutronen wären nur 1/10 Atomdurchmesser gross! So wird deutlich, dass rein teilchenartige Neutronen nicht mit der Spalte wechselwirken könnten, Neutronen als Quantenobjekte hingegen schon!

Vielleicht ist Figur 2.15 die beste Darstellung eines freien Quantenobjekts. Es ist ein Ausschnitt aus der Fisch-Vogel-Metamorphose, die **Maurits Cornelis Escher**, angeregt durch die arabische Ornamentik, 1938 geschaffen hat.

Oben wird das Quantenobjekt zum Vogel, zum Teilchen, das in einem Zähler registriert wird. Unten wird es zum Fisch, zur Welle, die am Doppelspalt gebeugt wird. Es ist unmöglich, beide Teile des Bilds zugleich scharf zu sehen. Beide Modelle lassen je einen wichtigen Aspekt weg! Genauso erlaubt die Natur nicht, beide Aspekte des Quantenobjekts zugleich zu messen: Diese Eigenschaft hat Werner Heisenberg in den **Unbestimmtheitsrelationen** eingefangen, die im Kapitel 3 besprochen wird.

Wolfgang Pauli schrieb Heisenberg 1926: «Man kann die [Quanten-] Welt mit dem *p*-Auge [Teilchen] und man kann sie mit dem *q*-Auge [Welle] ansehen, aber wenn man beide Augen zugleich aufmachen will, wird man irre.»

Experimentelle Bestätigung: Wenn man von jedem zweiten Quantenobjekt misst, durch welchen Spalt es gegangen ist, wird das Interferenzbild unscharf.

Blickt man mitten in Eschers Bild, sind Vogel- und Fischform verschwommen.



2.13 NEIN! Wahrscheinlichkeiten sind auch für das Auftreten von Viren immer positiv oder Null, nie negativ. – Die ψ -Wellen, die nach Schrödinger den Elektronen beim Doppelspaltexperiment zugeordnet werden, müssen aber an gewissen Orten auch negative Werte besitzen, damit sie sich auslöschen können \Leftrightarrow destruktive Interferenz $\Leftrightarrow \psi_1 + \psi_2 = 0$. Mehr dazu in 2.6.3.

KAPITEL 2: MINT AUFGABEN**Ergänzung****M2.1) Atom-Modell von George Gamow**

George Gamow hat den Tunneleffekt in die Quantenphysik gebracht und den Alpha-Zerfall erklären können. Er hat auch das populärwissenschaftliche Buch «Mr. Tompkins' seltsame Reisen durch Kosmos und Mikrokosmos» geschrieben und selbst illustriert. «Nebelhaft-verschwommene Figuren umkreisen ein grosses Objekt» lautet die Legende zum Bild nebenan, das im Kapitel mit dem Pauli-Prinzip auftaucht. Diskutieren Sie es in einer kleinen Gruppe.

**M2.2) Rückstoss bei der spontanen Emission von Licht**

Welchen Rückstoss erfährt ein H-Atom, das spontan vom 3p-Zustand in den 2s-Zustand zurückfällt?
Hinweis: Der Wert ist nur von den Energiestufen $n = 3$ und $n = 2$ abhängig, egal ob 3p oder 3s-Zustand.

- Suchen Sie nach Daten zur «roten Balmer-Linie» und bestimmen Sie Wellenlänge und Frequenz.
- Bestimmen Sie Energie und Impuls des ausgesandten Photons. Ist hier «Photon» korrekt?
- Berechnen Sie Geschwindigkeit, die das Wasserstoffatom durch den Rückstoss erhält und vergleichen Sie diese mit einer thermischen Geschwindigkeit.

M2.3) Emission und Absorption beim H-Atom

- Welche Wellenlänge besitzt die beim Übergang vom 4s- in den 3p-Zustand ausgesandte Strahlung?
- Warum muss Strahlung, welche das H-Atom vom 3p- in den höheren Zustand 4s bringt, genau die bei a) berechnete Wellenlänge besitzen? Was ist das für eine Strahlung?
- Die Anregung vom 3p- in den 4s-Zustand könnte auch durch Übertragung von Bewegungsenergie bei einem Zusammenstoss zwischen zwei H-Atomen passieren. Welche Geschwindigkeit müsste ein H-Atom anfänglich haben, wenn es bei einem solchen Stoss die halbe Energie abgibt?

M2.4) Versuche zur «Rettung der Stabilität» des Atoms

Bohr rettete mit dem Quantenpostulat das Elektron vor dem Absturz in den Atomkern. De Broglie rettete es mit stehenden Wellen. Wir retten es mit dem Wellenaspekt.

- Wie gross wäre die de Broglie-Wellenlänge, wenn das Elektron infolge der elektrischen Anziehung aus dem Unendlichen kommend vollkommen in ein punktförmiges Proton stürzte? Wie gross wären dann seine Geschwindigkeit und seine Bewegungsenergie?
- Wie gross wären de Broglie-Wellenlänge, Impuls und Geschwindigkeit eines Elektrons, das in einem Atomkern der Grösse 1 fm eingeschlossen wäre? (Nichtrelativistische Rechnung)
- Im Modul 3 werden wir die Lokalisierungsenergie $E_{\text{Lokal}} = 3h^2/8ma^2$ berechnen. Das ist die Energie, die man aufwenden muss, um ein Quantenobjekt mit der Masse m in einem Würfel der Kantenlänge a einzusperren. Wenn ein Elektron aus dem Unendlichen auf den H-Kern abstürzt, setzt es Energie frei, die für die Lokalisierung genutzt werden kann. Schätzen Sie damit a und den Radius des H-Atoms ab.

M2.5) Theoretische Probleme bei den de Broglie-Wellen

À toute particule matérielle de masse m et de vitesse v doit être associée une onde réelle. Diese «onde réelle» sollte eigentlich die «particule matérielle» begleiten und die Beziehung $c_{\text{dB}} = \lambda_{\text{dB}} \cdot f_{\text{dB}}$ erfüllen.

- Wenn die Welle gleich schnell ist wie das Teilchen, gilt $c_{\text{dB}} = v$. Was für eine Frequenz hätte sie?
- Wenn die Gleichberechtigung von Licht und Materie gilt, müsste für die Frequenz der de Broglie-Welle auch $E = hf$ gelten. Was für eine Geschwindigkeit ergibt sich daraus, wenn man die kinetische Energie des Teilchens klassisch ansetzt?
- Der Widerspruch zwischen a) und b) hat auch mit der Differenzierung zwischen Phasengeschwindigkeit und Gruppengeschwindigkeit einer Welle zu tun. Diskutieren Sie diese anhand einer Simulation wie in der Simulation https://en.wikipedia.org/wiki/Group_velocity
- Schrödinger schreibt 1926 an Geheimrat Willi Wien in Anlehnung an Sommerfeld von der «Einstein-Einstein-Beziehung» und meint damit $E = mc^2 = hf$. Welche Beziehung hat sie zu de Broglie?

M2.6) Die kalten Neutronen von Zeilinger et al.

- Berechnen Sie die kinetische Energie eines kalten Neutrons mit 220 m/s.
- Wie gross ist gemäss der Beziehung $E_{\text{kin}} = 3/2 \cdot kT$ die zur Energie von a) gehörige Temperatur?
- Könnten Stösse mit flüssigem Wasserstoff die Neutronen auf diese Temperatur abkühlen?
- Die sog. thermischen Neutronen strömen anfänglich 2200 m/s schnell aus dem Reaktor. Welchen Anteil der ursprünglichen Energie haben die die sog. kalten Neutronen noch?

M2.7) Geometrische Optik beim Zeilinger-Experiment (2.3.5)

Der Spalt, aus dem die Neutronen kommen, ist 20 μm breit. Nach 5 m treffen sie auf den Doppelspalt mit den Abmessungen 20 μm und 100 μm und 20 μm . Nach der Beugung am Doppelspalt werden sie in nochmals 5 m Entfernung im Detektor nachgewiesen. Genau wäre: 21.9 μm , 104 μm , 22.5 μm ; de Broglie-Wellenlänge der Neutronen = 1845 pm.

- Vergleichen Sie die Spaltbreiten mit der de Broglie-Wellenlänge der Neutronen.
- Wie wäre die Verteilung $w(x)$ von Figur 2.6, wenn die «Neutronen» klassische Kügelchen mit dem Durchmesser 1845 pm wären?
- Wie wäre es mit klassischen Kügelchen von 19.9 μm ?

M2.8) Veränderung beim Zeilinger-Doppelspalt durch Einbau einer «Tor»kamera

Angenommen, beim linken Spalt wäre eine Beleuchtung und eine Kamera, die melden würde, wenn ein Neutron durchgeht. Was würde sich bei der Beschreibung von 2.4.5 ändern?

M2.9) Grenzübergang zur Teilchenphysik, respektive zur Hochenergiephysik

- Bestimmen Sie die Wellenlänge von Gammastrahlung mit 100 TeV.
- 2035 sollen im CERN Teilchen einen Impuls von 100 TeV/c erreichen. – Überprüfen Sie diese Masseinheit und bestimmen Sie die de Broglie-Wellenlänge. Benützen Sie dabei die Tatsache, dass (2.2) gültig bleibt, wenn man den relativistischen Impuls nimmt. Vergleichen Sie die de Broglie-Wellenlänge mit dem Wert von M2.9a und mit der Grösse eines n.
- Inwiefern zeigen a) und b), dass in der Hochenergiephysik der Wellenaspekt oft keine Bedeutung hat und die Teilchen schlicht als Teilchen betrachtet werden können?

M2.10) Aufenthaltswahrscheinlichkeit im Potentialtopf

Bestätigen Sie mit einem numerischen Integralrechner, dass im Grundzustand das Elektron mit einer Wahrscheinlichkeit von ca 2/3 im mittleren Drittel des Potentialtopfs von 2.6.4 zu finden ist. Sie können den Integralrechner auch ersetzen durch «physikalische Integration»: Schneiden Sie die entsprechende Kurve aus und wägen Sie die entsprechenden Teile.

M2.11) Tunneliode

Diese spezielle Diode zeigt einen Quanteneffekt ohne weitere Hilfsmittel. – Was tunnelt wo durch?

M2.12) Quantenfussball

Quelle: Nairz, Arndt & Zeilinger, Am. Journal of Physics, 4. April 2003, S. 319-325

- Berechnen Sie die Masse des C_{60} und seine de Broglie-Wellenlänge bei 117 ± 20 m/s.
- Berechnen Sie den Winkel zum 1. Nebenmaximum bei einem Gitter mit 100 nm Periode und 50 nm Spaltbreite. Das nur 200 nm dicke Gitter war aus hartem Si_3N_4 hergestellt.
- Wie sieht alles bei einer Vergrösserung um 10^5 aus? Der Abstand von der Quelle (Ofen & Geschwindigkeitsfilter & Spalte) zum Gitter war etwa 1 m, von dort zum Detektor waren es 1.25 m. Der Detektor mass auf einer Breite von 8 μm und wurde in Schritten von 2 μm verschoben.
- Das C_{60} kühlt sich unterwegs durch Abgabe von Mikrowellenstrahlung. – Könnte sie empfangen werden und zur Ortsmessung dienen?

**M2.13) Orbitale des Elektrons im eindimensionalen Potentialtopf**

Zeichnen Sie die Orbitale der ersten fünf Zustände als Wahrscheinlichkeitsdichten.

KAPITEL 2: KURZ-LÖSUNGEN ZU DEN MINT AUFGABEN

M2.1 -

M2.2a Energieabnahme von -1.61 eV auf -3.40 eV, also um $E = 1.79 \text{ eV} = 2.9 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

$$f = E/h = 4.4 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \Rightarrow \lambda = f/c = 6.8 \cdot 10^{-7} \text{ m} = 680 \text{ nm}$$

M2.2b M2.4a $\Rightarrow E = 1.79 \text{ eV} = 2.9 \cdot 10^{-19} \text{ J}$; $p = E/c = hf/c = h/\lambda = 9.7 \cdot 10^{-28} \text{ kgm/s} = 9.7 \cdot 10^{-28} \text{ Ns}$

Ja, hier handelt es sich um eine Situation, die im Sinne der QED definiert ist.

M2.2c Der Rückstoss-Impuls ist gleich dem Impuls des Photons respektive Lichtquants.

$$\text{Nichtrelativistisch: } p_{\text{Atom}} = m_{\text{Atom}} \cdot v_{\text{Atom}} \Rightarrow v_{\text{Atom}} = [9.7 \cdot 10^{-28} \text{ kgm/s}] / [1.7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}] = 0.6 \text{ m/s.}$$

Eine thermische Geschwindigkeit ist viel grösser, typisch 1 km/s.

M2.3a 4.9 mm

M2.3b Absorptions- und Emissionsenergie besitzen nur umgekehrte Vorzeichen. Mikrowelle.

M2.3c 16 km/s

M2.4a 0; ∞ ; ∞ .M2.4b $\lambda_{\text{dB}} = 1 \text{ fm} \Rightarrow p_{\text{Elektron}} = m_{\text{Elektron}} \cdot v_{\text{Elektron}} = 6.6 \cdot 10^{-19} \text{ kgm/s} \Rightarrow v = 2400 \cdot c \Rightarrow \text{unmöglich}$ M2.4c Die elektrische Energie $E = -e^2/4\pi\epsilon r$ wird frei; a könnte etwa $4r$ sein. Einsetzen $\Rightarrow r \approx 50 \text{ pm}$.M2.5a $E_{\text{kinetisch}} = \frac{1}{2} mv^2 = 4.04 \cdot 10^{-18} \text{ J}$ M2.5b $T = 2.0 \text{ K}$

M2.5c Nein, auch flüssiges He mit Siedepunkt um 4 K genügt nicht!

M2.5d quadratisch mit Geschwindigkeit $\Rightarrow 1 \%$.M2.6a $v = \lambda_{\text{dB}} \cdot f_{\text{dB}} = (h/mv) \cdot f_{\text{dB}} \Rightarrow f_{\text{dB}} = mv^2/h$ M2.6b $c_{\text{dB}} = \lambda_{\text{dB}} \cdot f_{\text{dB}} = (h/mv) \cdot (E/h) = E/mv = \frac{1}{2} mv^2/mv = v/2$

M2.6c Die Idee, das Teilchen könnte durch ein de Broglie-Wellenpaket dargestellt werden, hat Schrödinger übernommen. Sie erwies sich als falsch, weil solche Pakete innert kürzester Zeit über den ganzen Raum zerfließen, während das Teilchen lokalisiert bleibt.

M2.6d 1. = aus Einsteins Relativitätstheorie; 3. = aus Einsteins Quantenphysik; 2. = aus de Broglies Forderung nach Gleichberechtigung.

M2.7a Spaltbreite $20 \mu\text{m} = \text{rund } 11'000\text{mal } 1.845 \text{ nm}$ M2.7b Die Grösse der «Neutronen» spielt keine Rolle, solange $< 20 \mu\text{m}$; reine Strahlenoptik.Symmetrie um $x = 0$. \Rightarrow Maximale Helligkeit für $110 \mu\text{m} < x < 130 \mu\text{m}$;Übergangsschattenzonen $90 \mu\text{m} < x < 110 \mu\text{m}$ und $130 \mu\text{m} < x < 150 \mu\text{m}$.Zentralschatten $0 \mu\text{m} < x < 90 \mu\text{m}$; Aussenschatten $150 \mu\text{m} < x$ M2.8 $\psi_{\text{Quanty links}}$ und $\psi_{\text{Quanty rechts}}$ werden durch die Beleuchtung und den Messprozess total verändert. $\psi_{\text{Quanty links neu}} + \psi_{\text{Quanty rechts neu}} = \psi_{\text{Quanty links neu}} + 0$ führt zu einer Überlagerung ohne Interferenz.

Nach dem Doppelspalt ist die Überlagerung so, wie wenn nur am Spalt links ein Quantenobjekt starten würde. Mehr im Kapitel 3.

M2.9a ca 10^{-20} m M2.9b $J/(m/s) = (m^2\text{kg/s}^2)/(m/s) = \text{mkg/s} = [\text{Impuls}]$;

$$\lambda_{\text{dB}} = h/p = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} / [(100 \cdot 10^{14} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}) / 3.0 \cdot 10^8 \text{ m/s}] = \text{ca. } 10^{-20} \text{ m} = 10^{-5} \cdot \text{Neutron}$$

M2.9c Die Wellenlängen sind viel kleiner als Protonen oder Neutronen.

Es ist in dieser Dimension ähnlich wie mit den Staubteilchen im Alltag. Vgl. Abschnitt 2.2.

M2.10

 $p = 61\%$ <https://www.integralrechner.de>

M2.11

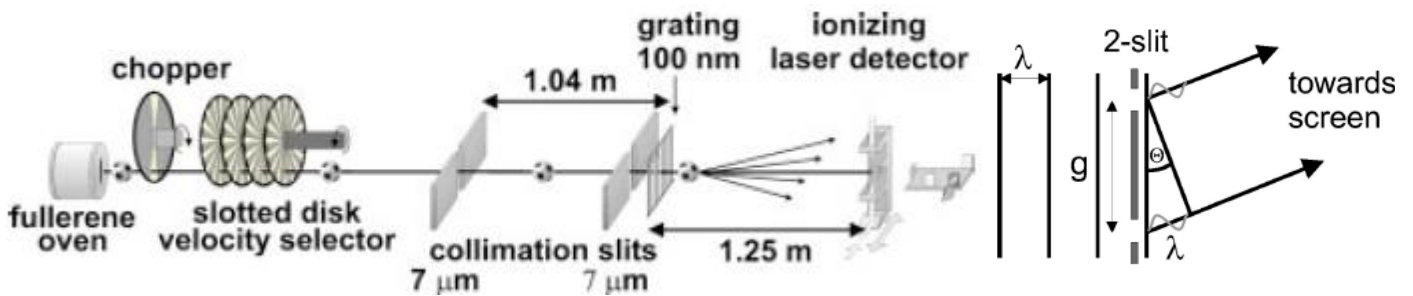
Die englische WIKIPEDIA ist klarer als die deutsche.

https://en.wikipedia.org/wiki/Tunnel_diode

M2.12a $m = 60 \cdot 12.0 \cdot 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1.20 \cdot 10^{-24} \text{ kg};$
 $\lambda_{dB} = h/mv = 4.7 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 4.7 \text{ pm}$
 mit minimaler Geschwindigkeit aber 5.7 pm
 mit maximaler Geschwindigkeit nur 4.0 pm

Die mit verschiedenen Molekülen verbundenen Geschwindigkeiten verwaschen die Interferenzen. Die Figur unten links zeigt, dass ein grosser Aufwand dafür getrieben wird, die ursprüngliche Schwankungsbreite von 60 % zu reduzieren.

Hinweis: Das C60 ist etwa 800 pm klein, aber immer noch viel grösser als seine de Broglie-Wellenlänge!



M2.12b Das Gitter muss man sich als Gartenzaun vorstellen. Siehe dazu das Gedicht unten. Die Figur oben rechts zeigt, wie man das Gitter analysieren kann: Das erste Nebenmaximum entsteht dort, wo sich die Teilstrahlen aus zwei benachbarten Lücken überlagern: $\sin\vartheta = \lambda_{dB}/g$
 Der Ablenkungswinkel ϑ ist winzig, also gilt $\lambda_{dB}/g = x/A \Rightarrow 4.7 \text{ pm}/100 \text{ nm} = x/1.25 \text{ m}$
 Daraus wird: $x = 59 \mu\text{m}$

M2.12c Die Fussbälle werden bei der **FIFA** in Zürich durch einen luftleeren Tunnel in Richtung Bern (ca 100 km entfernt) abgeschossen. Auf der Bundeshauskuppel ist der 2 cm dicke Lattenzaun befestigt. Im Abstand von 1 cm sind seine Stäbe montiert, die 0.5 cm Zwischenraum lassen. Das Tor, der Detektor, steht im **CERN**, etwa 125 km entfernt. Das Tor ist 8 dm breit und wird beim Messen je um 2 dm verschoben. Das erste Nebenmaximum ist 5.9 m neben der Symmetrieachse zu finden.

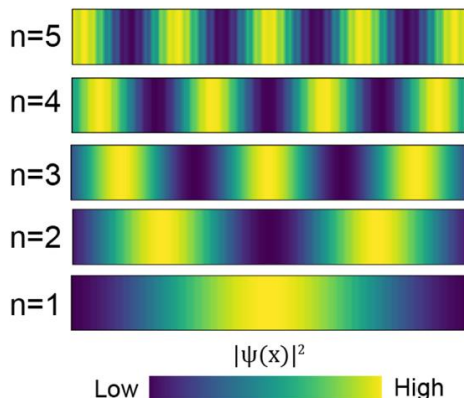
M2.12d Die Mikrowellenstrahlung hat eine Wellenlänge in der Grössenordnung von mm, kann also die C60 nicht lokalisieren, denn **die Fussbälle sind nur 80 µm klein**. Mehr zur Unbestimmtheitsrelation, die eine solche Messung verbietet, steht im Kapitel 3.

M2.13

Siehe Figur unten.

Wie würde ein «Katzenzustand» gemischt aus $n = 1$ und $n = 2$ aussehen?

Simulated Quantum Well States



Quelle: NATURE COMMUNICATIONS | <https://doi.org/10.1038/s41467-021-24561-3>

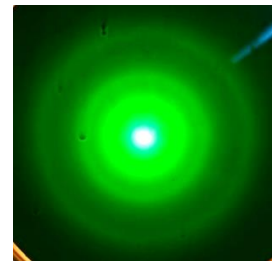
ABSCHNITT 2.3: VON DAVISSON UND GERMER ZU ELEKTRONENWELLEN IN DER SCHULE

UMFELD: Clinton J. Davisson (1881-1958) und Lester H. Germer (1896-1971) halten eine Vakuum-Elektronenröhre in der Hand, wie sie alle Verstärker vor der Erfindung des Transistors benötigen. Bei BELL sollen die Physiker nach dem ersten Weltkrieg die Qualität solcher Röhren verbessern. Wenn sie



die Glühkathoden mit Ionen bombardieren, finden sie keinen Einfluss auf die Röhrenqualität. Sie bauen ihre Apparatur um und schießen Elektronen auf Nickelkristalle, weil sie hoffen, damit die Schalenstruktur der Elektronenhülle messen zu können. Das erweist sich als Trugschluss. Doch sie entdecken, dass die Kristallstruktur einen Einfluss auf diejenigen Elektronen hat, die durch **Bragg-Reflexion** zurückgeschleudert werden. Sie haben keine Ahnung davon, dass de Broglie im fernen Paris Elektronenwellen ausheckt. 1923 publizieren sie ihre «uninteressanten» Messwerte und hören mit Messen auf. Im Sommer 1926 geht Davisson mit seiner Frau nach England, nimmt in Oxford an der Tagung der British Association for the Advancement of Science teil und hört Max Born über die neusten Entwicklungen der Quantenmechanik berichten. Dabei zitiert er zu Davissons grosser Überraschung seine Ergebnisse von 1923. Davisson und Germer messen bei 54 V Beschleunigungsspannung einen Peak. Dafür erhält Davisson 1937 den Nobelpreis.

EXPERIMENT: Elektronen werden auf etwa 2 kV beschleunigt und in einer Vakuumröhre durch eine Graphitschicht geschickt. (Eine kleinere Spannung gibt eine erwünschte grössere Wellenlänge, aber keine Fluoreszenz.) Anschliessend erzeugen sie auf dem Fluoreszenzschirm das Bild rechts. Der geschärfte Blick erkennt ein Muster von hellen und dunklen Ringen. Dieser Wechsel weist auf konstruktive und destruktive Interferenz hin.



AUSWERTUNG: (1) qualitativ: Wo es hell ist, prallen offensichtlich viele, wo es dunkler ist, nur wenige Elektronen auf die Leuchtschicht. Interessant sind die Helligkeitswechsel: Wären Elektronen gewöhnliche, klassische Teilchen, müsste die Helligkeit von innen nach aussen monoton abnehmen, wie bei einem Sandstrahl, den man durch ein Sieb bläst. Die beobachteten Hell-Dunkel-Wechsel kann man sich nur durch konstruktive und destruktive Interferenz entstanden denken. Hier wird der Wellenaspekt der Elektronen offensichtlich. Die Folgerung lautet: **Elektronen sind Quantenobjekte.**



Die Ringe erinnern zurecht an die Himmelserscheinung im Bild links. Bei der Halo lenken viele ungerichtete Eiskristallplättchen (Pulverschnee in einer hohen Wolke) das Sonnenlicht um bestimmte Winkel ab. Die «Versuchsanordnung» ist **rotationssymmetrisch** bezüglich der Achse vom Auge der Betrachterin zur Sonne. Bei der Elektronen-Beugungs-Röhre liefert der Elektronenstrahl die Symmetrieachse. Graphitkriställchen übernehmen die Rolle der Eiskristalle. Die Ablenkung erfolgt durch **Bragg-Reflexion** statt durch Brechung.

Die Abnahme der Radien mit der Beschleunigungsspannung U ergibt sich aus der Energiebetrachtung. $E_{\text{elektrisch}} = qU = E_{\text{kinetisch}} = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{p^2}{2m} \Rightarrow p^2 = 2mqU$ und mit (2.2) wird $\lambda_{\text{dB}} = h/p = h/(2mqU)^{1/2}$. Bei einer viermal kleineren Spannung erhält man also eine verdoppelte Wellenlänge und Ringgrösse.

(2) quantitativ: Bei einer Beschleunigungsspannung von 4.0 kV erwartet man gemäss der obigen Rechnung eine Wellenlänge von $\lambda_{\text{dB}} = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{Js} / (2 \cdot 9.1 \cdot 10^{-31} \text{kg} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{C} \cdot 4.0 \cdot 10^{+3} \text{V})^{1/2} = 1.9 \cdot 10^{-11} \text{m}$. Die de Broglie-Wellenlänge kann man aus der Spannung und der Geometrie des Experiments bestimmen, wenn auch die Grösse d vom Graphit bekannt ist. In Tabellenwerken findet man für Graphit die zwei Gitterkonstanten $d_1 = 213 \text{ pm}$ und $d_2 = 123 \text{ pm}$. Der Öffnungswinkel des Strahlkegels beträgt im konkreten Fall $\tan^{-1}(2\text{cm}/13.5\text{cm}) = 8.4^\circ$. Dies ist $2 \cdot \vartheta_1$, wobei $\vartheta_1 = 4.2^\circ$ die erste, flachste Bragg-Reflexion ist. Aus $\sin \vartheta_1 = \lambda/2d$ erhält man $\lambda_{\text{dB}} = 2d_1 \sin \vartheta_1 = 2 \cdot 1.23 \cdot 10^{-11} \text{m} \cdot \sin 4.2^\circ = 1.8 \cdot 10^{-11} \text{m}$.

Mit einer Elektronen-Beugungs-Röhre kann durch konstruktive und destruktive Interferenz der Wellenaspekt von Elektronen qualitativ nachgewiesen werden.
Bei bekannter Gitterkonstante kann die de Broglie-Wellenlänge quantitativ überprüft werden.

Bilanz: Nur mit viel Aufwand kann man den Wellenaspekt des Elektrons nachweisen!

ABSCHNITT 2.3: SIMULATION MIT QUANTENOBJEKTEN AM DOPPELSPALT

Gehen Sie zum Angebot milq der Universität Braunschweig in Deutschland:

<http://milq.tu-bs.de/>

Wählen Sie im Menu **MATERIALIEN** und im Pulldown **SIMULATIONSPROGRAMME**.

<http://milq.tu-bs.de/materialien/simulationsprogramme/>

Als Ergänzung zum Kapitel 2 eignet sich die Simulation:

Simulationsprogramm zum Doppelspaltexperiment

Laden Sie die entsprechenden Dateien auf Ihren Computer:



Doppelspaltversuch
V4.0(2).exe

registrieren, wenn nötig

Starten Sie die Simulation und bestätigen Sie **Deutsch**.

Sie landen im Labor mit einer Quelle als «Superstrahler», einem Doppelspalt und einem Schirm. Die «Superlampe» soll Sie anfänglich nicht interessieren.

Klicken Sie auf die drei Elemente und Informieren Sie sich.

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 verschiedene Simulationen mit **klassischen Teilchen** durch.

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

| |
|---|
| Wie unterscheiden sich Photonen von klassischen Teilchen? |
|---|

Eine Simulation von der Uni Colorado (USA) zum gleichen Thema (PhET):

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

You-tube zum Wellen-Teilchen Dualismus:

<https://www.youtube.com/watch?v=uva6gBEpfDY>

You-tube zu den Orbitalen:

<https://www.youtube.com/watch?v=BMIvWz-7GmU>

ABSCHNITT 2.6: SIMULATION ZUR WAHRSCHEINLICHKEITSVERTEILUNG

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 Kapitel 2 eignet sich die Simulation:

Klassischer Oszillator

<https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/de/simulations/sims/classical-oscillator-de/classical-oscillator-de.html>

Hinweis: Klicken auf die **Fragezeichen** hilft manchmal weiter.

Auch in der klassischen Mechanik ist es möglich, die Wahrscheinlichkeitsdichte zu bestimmen, die sich aus Borns Regel für die Quantenmechanik ergibt.

In der klassischen Mechanik arbeitet man nicht mit Wahrscheinlichkeitsdichten, weil man Ort, Geschwindigkeit usw. eines Tennisballs, Satelliten usw. für jeden Zeitpunkt genau angeben kann.

Lesen Sie die kurzen Texte in den **Blöcken mit den Fragezeichen** sorgfältig.

Starten Sie eine **neue Messreihe**.

Wechseln Sie zwischen **Anzahl der beobachteten Ereignisse** und **Histogramm der Wahrscheinlichkeitsdichte**.

Beobachten Sie den Einfluss der **Intervallbreite**.

Wenn Sie Lust haben, wechseln Sie in der Menuleiste von Simulation zu **Herausforderung**.

Wahrscheinlichkeiten können
auf Längen (eindimensionales Federpendel...),
auf Flächen (Trommenfell, Quantenpferch...),
oder in Räumen (Fliege in der Küche, **Atom**...) verteilt sein.

Die zugehörigen Wahrscheinlichkeitsdichten haben die Masseinheiten:

Länge → $1/m$

Fläche → $1/m^2$

Raum → $1/m^3$

ABSCHNITT 2.7: YOUTUBE ANGEBOT ZUR REPETITION UND ALS VORSCHAU AUF MODUL 3

(If You Don't Understand Quantum Physics, Try This; Dauer ca. 13 Minuten)

<https://www.youtube.com/watch?v=Usu9xZfabPM>

NACHDENKEN ÜBER PHYSIK 2: THEORIE UND EXPERIMENT IN DER PHYSIK

Experiment und Theorie in der Schule

In der Schulphysik wird kaum Neues entdeckt. Es geht darum, in möglichst kurzer Zeit möglichst allen Lernenden Einsicht in ein Naturgesetz zu vermitteln. Ein typisches Beispiel ist das Gesetz von Ohm. In einem qualitativen Experiment wird Anfängerinnen und Anfängern deutlich gemacht, dass die Stromstärke mit der Spannung wächst. Diese Beobachtung wird nach einem quantitativen Experiment zu einer Messreihe komprimiert und via grafische Darstellung zum theoretischen Gesetz verallgemeinert. Glücklicherweise ist der Graph eine Gerade und das Gesetz $U = R \cdot I$ linear.

Die Geschichte hinter dem Gesetz ist kompliziert: Vor bald 200 Jahren arbeitete Georg Simon Ohm als Gymnasiallehrer, als er sich mit dem Thema herumschlug. Die schwankenden Spannungen der Batterien und die mangelhaften Stromstärkenmessgeräte machten ihm zu schaffen. Aber am meisten behinderte ihn eine falsche Theorie. Er glaubte, der Zusammenhang müsse logarithmisch sein. Das Verhältnis zwischen Theorie und Experiment ist also oft **komplexer** als in der Schule dargestellt.

Der Wellenaspekt des Elektrons war zuerst reine Theorie.

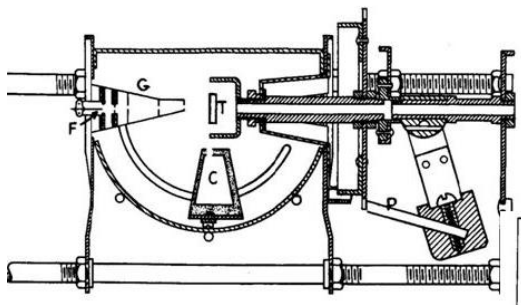
Es könnte sein, dass die Arbeit mit den elektromagnetischen Wellen als Militärfunker auf dem Eiffelturm Louis de Broglie zur Idee angeregt hat, mit der Materie könnten Wellen verbunden sein. Der dokumentierte, logische Ausgangspunkt für de Broglies Wellen ist aber Einsteins *Relativitätstheorie*. Sicher ist, dass de Broglie das Experiment von Ramsauer nicht gekannt hatte: Ramsauer hatte 1920 beobachtet, dass langsame Elektronen ein Gas besser durchdringen können, als schnelle. Das konnte später mit der zur Atomgröße passenden de Broglie-Wellenlänge erklärt werden. De Broglie wusste auch von Davisson nichts. Der theoretische Physiker war froh, dass er retrospektiv der kühnen Hypothese seiner Dissertation eine experimentelle Basis geben konnte, indem er mit geschlossenen de Broglie-Wellen Bohrs Quantenpostulat respektive Balmer's Formel ableitete.



Clinton Davisson wollte anfänglich ganz andere Dinge messen.

Die Lebensdauer von Vakuum-Röhren ist zentral für die Qualität der Verstärker auf den transkontinentalen Telefonlinien der USA. In der Ingenieurabteilung der Western Electronic Corporation fanden Clinton Davisson und sein erster Mitarbeiter Charles Kunsman keinen Einfluss eines Ionenbeschusses auf die Elektronenemission und damit die Qualität der Röhren-Kathoden. Später bauten sie die abgebildete Apparatur für den Beschuss mit Elektronen um (Kanone G). Weil die Elektronen so klein sind, dachten sie, auch die glatteste Oberfläche (Target T) müsse zu einer diffusen Reflexion führen. Sie fanden aber, dass einige sogar seitwärts zum beweglichen Elektronensammler C reflektiert wurden. Das ist irgendwie ähnlich wie beim Rutherford-Versuch.

Sie wechselten von der Technik zur Physik und beschossen Nickel mit langsamen Elektronen. Sie hofften, man könne so Bohrs Schalenstruktur der Elektronenhülle zeigen. 1923 publizierten sie Daten, gaben aber ihre Hoffnung auf, Bohrs Modell zu stützen. Erst 1925 nahm Davisson mit dem neuen



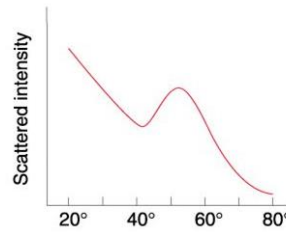
Mitarbeiter Lester Germer das Forschungsprogramm wieder auf. Weil der das Material nach einer Panne glühte, enthielt der Nickel nun grosse Kristalle und erzeugte ein Intensitätsmaximum. Davisson kam zur Erkenntnis, dass mit ihrer Methode nicht die Struktur der Elektronenhülle eines Atoms, sondern die des Kristalls als Ganzem untersucht werden kann.

Im Sommer 1926 ging Davisson mit seiner Frau nach England in die Ferien und nahm in Oxford an der Tagung der *British Association for the Advancement of Science*

teil. Die Neuigkeiten von de Broglie, Schrödinger usw. interessierten ihn. In Oxford referierte Max Born über die neusten Entwicklungen der Quantenphysik. Er zitierte zu Davissons grösster Überraschung seine Publikation von 1923 und interpretierte die Messresultate als Bestätigung der de Broglie-Wellen, so wie Borns Assistent Walter

Elsasser dies schon früher vorgeschlagen hatte.

Nach intensiven Diskussionen in Oxford, analysierte Davisson (mit der Röhre) zuhause die neuen Messwerte von Germer (rechts) und verbesserte die Apparatur. Im Januar 1927 konnten die beiden mit langsamen Elektronen von 54 eV Energie eine hervorragende experimentelle Bestätigung der de Broglie-Wellenlänge via Bragg-Reflexion messen: Beachten Sie den «Quantum bump» beim 53°-Winkel zwischen G und C in der Abbildung nebenan. Ihre Ergebnisse wurden am Physikerkongress in Como und an der Solvay-Tagung hoch gelobt. Mit dem neuen theoretischen Hintergrund konnten Davisson und Germer gezielter experimentieren.



1937 erhielt Davisson den Physik-Nobelpreis zusammen mit G. P. Thomson, dem Sohn des Entdeckers des Elektrons, der Elektronenbeugung an Metallfolien demonstriert hatte, wie man es mit Röntgenstrahlen schon früher gemacht worden war. Lester Germer ging leer aus!

Die genauere Betrachtung des Beispiels «Wellenaspekt des Elektrons» zeigt: Das Verhältnis zwischen Theorie und Experiment beim Fortschreiten der Physik ist kompliziert. Das Ziel beim Experimentieren kann sich ändern, experimentelle Pannen können sich als Glücksfall erweisen, ebenso persönliches Zusammentreffen an Konferenzen. Den einen lacht im Leben das Glück, andere haben das Nachsehen. Die Abhängigkeit zwischen Theorie und Experiment ist jedenfalls wechselseitig.

Grundsätzliches

Physik ist eine Naturwissenschaft. Am Schluss entscheidet das Experiment: Wenn es der Theorie widerspricht, ist diese falsch oder zumindest verbesserungsbedürftig. Doch was man misst, darüber entscheide die Theorie, meint Einstein. Das Verhältnis zwischen den beiden Säulen physikalischer Erkenntnis hat Planck treffend zusammengefasst:

Max Planck: **Theorie ohne Experiment ist leer und Experiment ohne Theorie ist blind.**

Neue Theorien sind dann besser, wenn sie die Experimente genauer erklären können und in einem grösseren Rahmen gültig sind. Die spezielle Relativitätstheorie ist das Musterbeispiel für eine aus dem Erfindergeist geborene, erfolgreiche Theorie. Die Gefahr neuer, schöner, aber leerer Theorien droht am ehesten in der Kosmologie, der Wissenschaft von Universum als Ganzem. Experimente sind keine möglich. Albert Einstein hat das mit seinen verschiedenen, nicht immer langlebigen Ausgestaltungen der Allgemeinen Relativitätstheorie erlebt.

Blindes Experimentieren darf es im Labor nicht geben. Das Problem sind häufig veraltete oder zu stark vereinfachende Theorien. Beispielsweise hat Philipp Lenard den Photoeffekt ohne Lichtquanten erklärt. Seine Erklärung erweist sich nachträglich schlicht als falsch. Ähnlich ist es auch den Versuchen ergangen, die Eigenschaften der Wärmestrahlung ohne Quanten zu erklären. Als 1922 Otto Stern und Walter Gerlach ihre Messdaten erklären mussten, gerieten sie in Probleme, denn das Konzept des Spins war noch nicht ausgedacht.

Neue Experimentieranordnungen zu finden und neue Theorien zu formulieren sind beides kreative Tätigkeiten. Nicht umsonst dauert es ein halbes Jahrhundert, bis Jönsson in einem Experiment den Wellenaspekt der Elektronen nachweisen kann. Nicht umsonst ist die «grosse Verallgemeinerung», die «Theory of Everything» immer noch in den Wolken.

Fragen zum Recherchieren, Nachdenken und Diskutieren:

- 1) Der Philosoph Georg Wilhelm Friedrich Hegel hat 1800 in seiner Dissertation theoretisch gezeigt, dass es nicht mehr als die sieben damals bekannten Planeten geben könne. Bald entdeckte man die Planetoiden und Neptun. – Wie lange hatte Hegel recht? Diskutieren Sie die Rolle der Philosophie.
- 2) Wie fand man die Spektrallinien des Wasserstoffs und wie kam Johann Jakob Balmer zu seinem Gesetz, das für Bohr und de Broglie als experimentelle Rechtfertigung diente?
- 3) In welchem Umfang bildete Maxwells Theorie der elektromagnetischen Wellen die Grundlage für die Experimente einerseits von Heinrich Hertz und andererseits von Guglielmo Marconi?
- 5) Astronomie, Meteorologie und Geologie sind ebenfalls Naturwissenschaften. - Welche Schwierigkeiten ergeben sich in diesen Disziplinen bei der Überprüfung von Theorien?