

Fachdidaktik II
Portfolio

Thema 19
Quantenphysik

Die Teilchen-Wellen Dualität

Ausarbeitung einer Unterrichtssequenz von sechs Lektionen
für den Physikunterricht am Gymnasium

Autor:

Samuel Bieri

sbieri@phys.ethz.ch

Stud.-Nr. 99-803-447

Lehrdiplom Physik

Mai 2019

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Backward Design	3
2.1	Stufe 1: Erwünschte Ziele	3
2.1.1	Allgemeine Ziele des Unterrichts	3
2.1.2	Zentrale Konzepte	3
2.1.3	Concept-Map	4
2.1.4	Essenzielle Fragen	5
2.1.5	Vorwissen und Lernschwierigkeiten	5
2.1.6	Lernziele	6
2.2	Stufe 2: Evidenz	6
2.2.1	Formative Assessments	6
2.2.2	Prüfung	6
2.3	Stufe 3: Lektionsplanung und Aktivitäten	7
2.3.1	Lernwege im Concept-Map	7
2.3.2	Aktivitäten	8
2.3.3	Lektionsplan	9
2.4	Alignment	9
3	Prinzipien des Lernens	10
3.1	Vorwissen	10
3.2	Motivation	10
3.3	Wissensstruktur	11
3.4	Peer-Learning	11
3.5	Aktivitäten und Feedback	11
3.6	Mastery	11
3.7	Selbstregulierung	12
4	Unterrichtsunterlagen	13
4.1	Rahmenbedingungen	13
4.2	Unterrichtsorganisation	13
4.3	Unterrichtsdispositionen	13
4.3.1	LE 1 & 2: Der Photoeffekt	13
4.3.2	LE 3: Die Elektronenwelle	16
4.3.3	LE 4 & 5: Elektronenbeugungsröhre, Linienspektren & Bohrsches Atommodell	17
4.3.4	LE 6: Das Bohrsche Atommodell (Vertiefung)	20
5	Diskussion	21
6	Anhang mit Unterrichtsunterlagen und Lösungen	21

1 Einleitung

In diesem Portfolio wird Lernmaterial für den gymnasialen Physikunterricht ausgearbeitet. Der Umfang beträgt sechs Lektionen und das Unterrichtsthema ist eine Einführung in die Quantenphysik. Darin wird der Themenbereich «Teilchen-Wellen-Dualität» herausgegriffen und bearbeitet.

2 Backward Design

Das «Backward Design» ist ein iterativer Prozess, bei dem die Lehrperson (der «Designer») vorerst die erwünschten Ziele (Stufe 1) formuliert, d.h. was sollen die Schülerinnen und Schüler am Ende des Unterrichts wissen und können. In einem zweiten Schritt werden Assessment Ansätze ausgearbeitet und auf diese Ziele abgestimmt. Zuletzt (Stufe 3) wird die Feinplanung der einzelnen Lektionen gemacht und die Aktivitäten werden im Detail festgelegt. Während diesem Prozess kann und soll der Designer immer wieder auf vorhergehende Stufen zurückgehen das Ganze auf Stimmigkeit prüfen und allenfalls anpassen. So wird idealerweise schlussendlich ein abgestimmtes und ausgewogenes Unterrichtsdesign entstehen.

2.1 Stufe 1: Erwünschte Ziele

2.1.1 Allgemeine Ziele des Unterrichts

Zum Thema «Quantenphysik» kommen verschiedene Themenbereiche in den Sinn, welche interessant sind und im Unterricht behandelt werden könnten.

In dieser Unterrichtssequenz wird das Thema **Teilchen-Wellen Dualität** herausgegriffen und behandelt. Diese Familie von Phänomenen stellt ein zentraler Eckpfeiler der Quantenphysik dar, der ihr historisch zum Durchbruch verholfen hat. Abgerundet wird das Thema durch das **Bohrsche Atommodell** und der **Linienpektren** der Lichtemission und -absorption, in welchen sich die Teilchen-Wellen Dualität von Elektron und Photon vereinen und manifestieren.

Ein erstes Ziel der Sequenz soll die Erkenntnis sein, dass Licht, welches traditionell als Welle bekannt ist, auch *Teilcheneigenschaften* hat. Umgekehrt zeigen bekannte Materieteilchen wie das Elektron typische *Welleneigenschaften*, und jedem Elektron kann eine Wellenlänge zugeordnet werden. Die SuS verstehen, wie die Teilcheneigenschaft des Lichts und die Welleneffekte der Materie im Experiment nachgewiesen werden können. Der Elektronenwelle kann dann die Stabilität der Atome erklären, welche in der klassischen Physik ein Rätsel ist. Diese Wellennatur des Elektrons führt zu einer Quantisierung der zulässigen «Elektronenbahnen», respektive des Drehimpuls gebundener Elektronen im Atom, sowie zu einem diskreten Spektrum von zulässigen Energieniveaus. Dieser Aufbau des Atoms erklärt die Linienpektren, welche man bei vielen Lichtquellen beobachten kann.

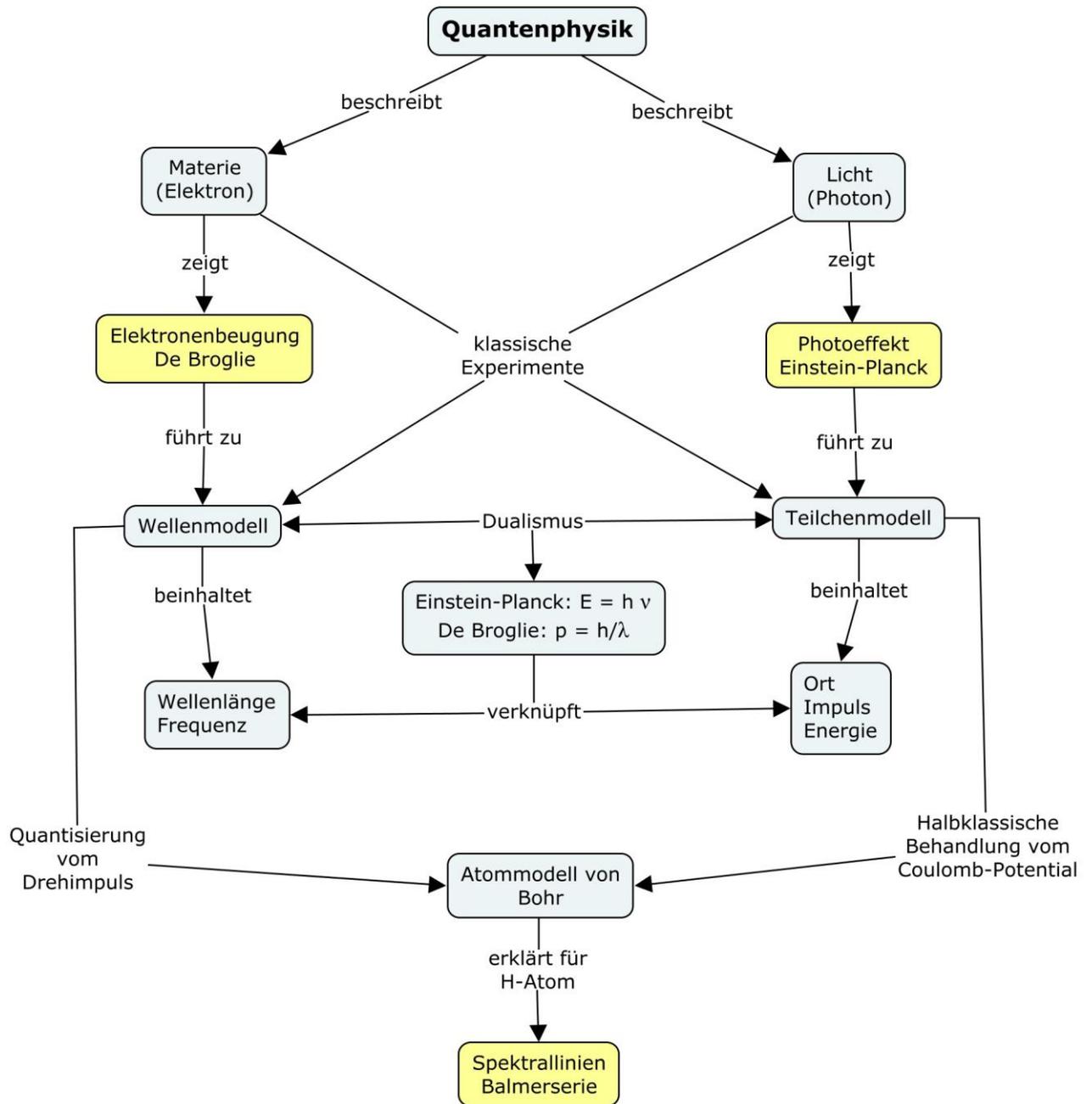
2.1.2 Zentrale Konzepte

Zu den zentralen Konzepten dieser Unterrichtseinheit gehört einerseits das «**Wellenmodell**», welches die Begriffe *Wellenlänge* und *Frequenz* beinhaltet. Dem gegenüber steht das «**Teilchenmodell**», mit der Beschreibung der Teilchen durch *Ort*, *Impuls* und *kinetischer/potentieller Energie*. Andererseits sind das «**Elektron**» als Vertreter der *Materie* und «**Licht**» als massenloses Teilchen (*Photon*) zentrale Begriffe.

Die klassische Physik bringt Licht mit dem Wellenmodell (elektromagnetische Welle) und Materie mit dem Teilchenmodell in Verbindung. In der **Quantenphysik** manifestieren sich nun auf erstaunliche Weise umgekehrt der Teilchencharakter des Lichts und der Wellencharakter der Materie. Diese neuen Quantenkonzepte (Elektronenwelle und Lichtteilchen) fließen in das halbklassische **Modell des Wasserstoffatoms von Bohr** (-Sommerfeld/de Broglie) ein.

Die wichtigen experimentellen Nachweise oder Auswirkungen dieser neuen Konzepte geschehen im «**Photoeffekt**» (*Einstein-Planck Relation*), in der «**Elektronenbeugung**» (*De-Broglie Wellenlänge*) und in den «**Spektrallinien**» des Lichts (*Balmer Serie*).

2.1.3 Concept-Map



2.1.4 Essenzielle Fragen

Zur Motivation des Unterrichts eignen sich folgende Fragestellungen:

1. *Wieso sind Atome stabil?*

und

2. *Aus was besteht Materie und Licht? Aus Teilchen oder aus Wellen?*

Die erste Frage kann zu Beginn der Einheit als übergeordnetes Thema angeführt werden. Dazu gehört auch eine Erklärung zur Instabilität der Atome innerhalb der klassischen Physik. Als Ausblick wird gesagt, dass diese Frage gegen Ende des Unterrichts im letzten Teil (Atommodell von Bohr) beantwortet werden kann.

Die zweite Frage dient der Motivation der *ersten* Unterrichtsteile zum Lichtteilchen und zur Elektronenwelle. Wie oben muss auch diese Fragestellung im Kontext des Wissensstandes der Physik am Ende des 19. Jahrhunderts präsentiert werden.

2.1.5 Vorwissen und Lernschwierigkeiten

Das nötige Vorwissen der Schülerinnen und Schüler (SuS) beinhaltet die **klassischen Newtonsche Mechanik**. Hier müssen die SuS die Begriffe *Impuls, kinetische und die potentielle Energie*, sowie die Eigenschaften der **Kreisbewegungen** kennen (*Zentripetalbeschleunigung/-kraft und Bahngeschwindigkeit*).

Ferner sollten auch die Grundlagen der **Wellenmechanik** bekannt sein, wie *Wellenlänge, Frequenz, Amplitude, Wellenberg und Wellental*, und deren Zusammenhänge, wie etwa *destruktive Interferenz (Auslöschung)*. Die Theorie zur *Wellenbeugung am Gitter* ist zwar im Unterrichtsmaterial als Anhang vorhanden, kann aber im Rahmen dieser Unterrichtseinheit nicht im Detail behandelt werden. Die **Bragg-Bedingung** für die Beugungsmaxima eines Gitters [$d \sin(\vartheta_n) = n \lambda$] sollte den SuS bekannt sein.

Für die Herleitung der Quantisierung im Bohrschen Atommodell müssen die SuS die **Coulombkraft** sowie das **elektrostatische Potential einer Punktladung** bereits kennen.

Wahrscheinlich bringen die SuS wenig Vorwissen zur Quantenphysik in den Unterricht mit. Die in der Literatur besprochenen Fehlkonzepte [1,2] kann ich mir zwar bei Physikstudenten vorstellen, aber nicht so sehr bei Gymnasialschülern. Allerdings könnten trotzdem gewisse Vorstellungen vorhanden sein. Beispielsweise wird in gewissen Kreisen Quantenphysik mit Esoterik oder übernatürlichen Phänomenen in Verbindung gebracht. Im Unterricht muss die Lehrperson dieser Fehlvorstellung entgegenwirken, indem sie klar festhält, dass es sich bei der Quantenphysik um eine experimentell bestätigte, physikalische Theorie handelt. Obwohl die Quantenphysik einige schwer vorstellbaren und erstaunlichen Aussagen macht, ist sie von Esoterik klar abzugrenzen.

Eine zentrale Lernschwierigkeit für die SuS ist wohl die Vorstellung, dass *Quantenobjekte* je nach Versuchsanordnung Teilchen- oder Welleneigenschaften zeigen. In diesem Unterricht werden Quantenobjekte zwar nicht in dieser Allgemeinheit thematisiert, jedoch wird das Konzept an den Beispielen «Licht» und «Elektron» veranschaulicht. Gemäss Ref. [2] ist diese Vorstellung (d.h. «je nach Versuchsanordnung Welle oder Teilchen») zwar an Hochschulen verbreitet, geht aber eigentlich über die Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik hinaus. Eine präzisere Vorstellung (wenn man sich denn überhaupt eine machen will) würde den Begriff der Wellenfunktion voraussetzen: Elementarteilchen (Photonen, Elektronen etc.) sind eben Teilchen (d.h. punktförmig, ohne Ausdehnung und innere Struktur), deren Zustandswahrscheinlichkeiten aber aus einer komplexwertigen Wellenfunktion erhalten werden können. Nicht die Teilchen selbst, sondern deren *Wellenfunktion* (und damit die Aufenthaltswahrscheinlichkeit) zeigt Interferenzphänomene und Beugung etc.

Da in dieser Unterrichtseinheit die Wellenfunktion und dazugehörige Begriffe (Wahrscheinlichkeit, Schrödingergleichung, Messung etc) nicht behandelt werden, muss unsere Vorstellung von Quantenobjekten hier genügen. Für interessierte SuS, denen dieser Zugang Schwierigkeiten bereitet, könnte ein entsprechender Ausblick zur Wellenfunktion präsentiert werden.

[1] D. F. Styer, *Common misconceptions regarding quantum mechanics*, American J. Phys. 64, 31 (1996).

[2] Kircher, Girwidz, Häussler, *Physikdidaktik: Theorie & Praxis* (Springer 2009), Vorstellungen zur Quantenphysik, p. 461ff.

2.1.6 Lernziele

Wissen/Verstehen:

- Lz1: Die SuS wissen, dass Licht in quantisierten Energiepaketen auftritt. Sie verstehen, wie die Beobachtung des Photoeffekts diese Tatsache untermauert.
- Lz2: Die SuS verstehen, dass die Materie, je nach experimenteller Anordnung, sowohl Teilchen- als auch Wellencharakter zeigt. Sie kennen das Experiment der Elektronenbeugung am Gitter und verstehen, wie sich darin die sonderbare Welleneigenschaft des Elektrons manifestiert.
- Lz3: Die SuS verstehen, wie der Wellencharakter der Materie zu einer Quantisierung der Bahnradien (Orbitale) und der Energieniveaus von gebundenen Elektronen im Atom führt. Sie erkennen, dass diese Struktur die Stabilität der Atome erklären kann.
- Lz4: Die SuS können mit dem Bohrschen Atommodell die Spektrallinien im Emissionsspektrum der Atome erklären.

Können (operationalisierte Lernziele):

- Lo1a: Die SuS können die Energie eines Photons bei einer bestimmten Frequenz oder Wellenlänge berechnen.
- Lo1b: Die SuS kennen den Zusammenhang von Frequenz des Lichts, Planck-Konstante, Gegenspannung und Austrittsarbeit im Photoeffekt und können diese anwenden.
- Lo2a: Die SuS können Teilchen mit gegebener Masse und Geschwindigkeit (resp. Impuls) einer Wellenlänge zuordnen (De-Broglie Relation).
- Lo2b: Die SuS kennen den Zusammenhang von Masse, Ladung, Beschleunigungsspannung, kinetischer Energie und Impuls des Elektrons in der Elektronenbeugungsröhre und können diese anwenden.
- Lo3: Die SuS können die zugelassenen Energieniveaus des Elektrons im Wasserstoffatom, innerhalb des Bohrschen Atommodells, berechnen.
- Lo4: Die SuS können die Spektrallinien des Wasserstoffs berechnen.

2.2 Stufe 2: Evidenz

2.2.1 Formative Assessments

In der letzten Lektion ist eine Klicker-Session als formatives Assessment geplant.

2.2.2 Prüfung

Teil A (Textaufgaben)

1. Was beinhaltet die Entdeckung des Photoeffekts? Wieso war dieses Phänomen zentral wichtig für die Wissenschaft des 20. Jahrhunderts? (4pt) [Lz1, Lo1a/b]
2. Beschreiben Sie das Postulat von Louis de Broglie zur Materiewelle. (4pt) [Lz2, Lo2]
3. Erklären Sie, wieso die Vorstellung des Atoms als kleine Version eines Sonnensystems mit den Elektronen als Planeten problematisch ist. Wie wird dieses Problem in der modernen Physik gelöst? (4pt) [Lz3]

Teil B (Rechenaufgaben)

4. Die Ionisierungsenergie des Wasserstoffatoms beträgt 13.6 eV. Welche Frequenz muss elektromagnetische Strahlung mindestens aufweisen, damit sie Wasserstoffatome zu ionisieren vermag? (4pt) [Lz3, Lo1a]
5. Das Elektron im Wasserstoffatom fällt vom dritten Energieniveau auf das zweite ($n: 3 \rightarrow 2$). Welche Wellenlänge hat das emittierte Photon? (4pt) [Lz4, Lo4]
6. Elektronen werden mit einer Spannung von 5.0 kV beschleunigt. Danach werden sie an einem Gitter mit Gitterabstand $d=123 \cdot 10^{-12}$ m gebeugt. Welcher Radius R hat der erste Beugungsring, welcher auf einem $L=200$ mm von der Probe entfernten Schirm beobachtet wird?
Verwenden Sie die Theorie von de Broglie und vernachlässigen Sie relativistische Effekte. Die Bragg-Bedingung für das erste Beugungsmaximum ist: $d \cdot R/L = \lambda$. (6pt) [Lz2, Lo2a/b]
7. Zur Bestimmung des Planck-Konstante wird eine Cäsium-Fotозellen nacheinander mit gelbem Licht der Wellenlänge $5.89 \cdot 10^{-7}$ m und UV Licht der Wellenlänge $2.54 \cdot 10^{-7}$ m bestrahlt. Zur Abbremsung der Photoelektronen sind Gegenspannungen von 0.210 V respektive 3.00 V nötig. Welcher Grössenwert ergibt sich aus diesen Beobachtungen für das Planck'sche Wirkungsquantum h ? (6pt) [Lz1, Lo1a/b]

Maximale Punktzahl: $12 + 20 = 32$

Notenschlüssel: $N = p \cdot 3/12 + 1$

Begründung: Mindestens 3 Fragen korrekt lösen sollte für alle möglich sein.

Musterlösung der Prüfung

1. Im Experiment zum Photoeffekt wird monochromatisches Licht auf eine Metallplatte geschienen. Ab einer gewissen Frequenz werden Elektronen aus dem Metall herausgelöst, welche sich frei fortbewegen. Die kinetische Energie der herausgelösten Elektronen steigt linear mit der Frequenz des Lichts an, ist aber unabhängig von der Lichtintensität. Diese Beobachtung ist inkonsistent mit dem Wellenmodell des Lichts. Das Phänomen kann aber damit erklärt werden, dass Licht aus Energiepaketen besteht, deren Energie proportional zur Frequenz ist (Teilchenmodell). Dieses Experiment war zentral für die Wissenschaft, da es zeigte, dass Licht aus sogenannten Energie-Quanten (Photonen) besteht.
2. De Broglie postulierte, dass auch die Materie (und nicht nur Licht) Wellencharakter hat. Laut dem Postulat von de Broglie ist die Wellenlänge λ eines Teilchens mit Impuls $p = m \cdot v$ gegeben durch $\lambda = h/p$.
3. Eine negative elektrische Ladung (Elektron), welche auf einer kreisförmigen Bahn einen positiv geladenen Kern umkreist, wird auf dieser Bahn ständig in Richtung Kern beschleunigt (Zentripetalbeschleunigung). Laut der klassischen Physik sendet eine beschleunigte Ladung elektromagnetische Wellen und somit Energie aus. Die Ladung verliert damit Energie und kommt dem Kern immer näher. Dieser Prozess ist sehr schnell: Das Elektron würde gemäss den Gesetzen der klassischen Physik innert Bruchteilen einer Sekunde den Kern erreichen und das Atom wäre instabil. In der Quantenphysik wird dieses Problem durch den Wellencharakter des Elektrons gelöst: Eine Elektronenwelle kann nur gewisse Orbitalradien im Atom besetzen, da sie sonst durch destruktive Interferenz ausgelöscht wird.
4. $E_{\text{ion}} = hf_{\text{ion}} \Rightarrow f_{\text{ion}} = E_{\text{ion}}/h = 13.6 \cdot 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J} / (6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}) = 3.29 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$.
Die Frequenz der Strahlung muss also mindestens $3 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$ (3 Petahertz) betragen, damit sie ionisierend auf das Wasserstoffatom wirkt.
5. $hf_{3 \rightarrow 2} = E_3 - E_2 = E_1 \cdot (1/9 - 1/4) = |E_1| \cdot 5/36 \Rightarrow f_{3 \rightarrow 2} = |E_1|/h \cdot 5/36 = 3.29 \cdot 10^{15} \text{ Hz} \cdot 5/36 = 4.57 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$.
6. $eU = p^2/(2m) \Rightarrow p = \sqrt{2meU}$; $R = \lambda \cdot L/d = h/p \cdot L/d = h/\sqrt{2meU} \cdot L/d = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} / \sqrt{2 \cdot 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}} \cdot (0.2 \text{ m}) / (123 \cdot 10^{-12} \text{ m}) = 2.8 \text{ cm}$.
7. $h \simeq (E_2 - E_1)/(f_2 - f_1) = e[U_2 - U_1]/(c[\lambda_2^{-1} - \lambda_1^{-1}]) = (1.602 \cdot 10^{-19} [0.21 - 0.3] \text{ J}) / (2.998 \text{ m/s} [1/(5.89 \cdot 10^{-7} \text{ m}) - 1/(2.54 \cdot 10^{-7} \text{ m})]) = 6.659 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.

2.3 Stufe 3: Lektionsplanung und Aktivitäten

2.3.1 Lernwege im Concept-Map

Erster Weg: Licht \rightarrow Wellenmodell \rightarrow Licht \rightarrow Photoeffekt \rightarrow Teilchenmodell \rightarrow Dualismus.

In den ersten 2 Lektionen soll das Thema «Licht» und der Photoeffekt behandelt werden. Dabei wird kurz auf das klassische Modell von Licht als Welle eingegangen. Danach bearbeiten die SuS ein Arbeitsblatt zum Photoeffekt (Experiment von Hallwachs). Der daraus resultierende Begriff des Photons wird im Plenum besprochen; das Planck'sche-Wirkungsquantum und die Photonenhypothese von Einstein werden eingeführt. In der zweiten Lektion vertiefen die SuS dieses Wissen mit einer Simulation zum Photoeffekt (Experiment von Lenard; Gegenspannungsmethode).

Zweiter Weg: Materie \rightarrow Teilchenmodell \rightarrow Materie \rightarrow Elektronenbeugung \rightarrow Wellenmodell \rightarrow Dualismus

Die nächsten 2 Lektionen gehen auf des «Elektron» bzw. die Materiewelle ein. Hier wird das Thema «Elektronenbeugung» behandelt. Ähnlich wie oben werden zuerst die klassischen Eigenschaften des Elektrons in Erinnerung gerufen (Ladung, Energie, Impuls). Danach lesen die SuS einen Text zu Louis de Broglie und seinem Postulat der Materiewelle. In der zweiten Lektion wird das Demonstrationsexperiment zur Elektronenbeugungsröhre gezeigt und die SuS bestimmen die Wellenlänge einerseits experimentell aus den Beugungsradien, andererseits durch die Beschleunigungsspannung und der postulierten De-Broglie Relation.

Dritter Weg: Dualismus \rightarrow Wellenmodell \rightarrow Quantisierung/Bohrsches Atommodell \rightarrow Spektrallinien

In den letzten 2 Lektionen soll das Atommodell von Bohr eingeführt und hergeleitet werden. Bei dessen Begründung fliesst nun die vorher besprochene Wellennatur vom Elektron ein: Wegen der destruktiven Interferenz sind nur diskrete Bahnradien der Elektronenwellen möglich. Bei der Absorption und Emission von Photonen fliesst schliesslich die Teilchennatur des Lichts ein: Die Übergänge zwischen den entsprechenden Energieniveaus erklären die Linien in den Spektren der Atome, welche bereits in der Einführung zu diesem Unterrichtsteil in einem Hands-on Experiment beobachtet wurden.

2.3.2 Aktivitäten

Akt-1. Lesen eines Lerntexts zum Experiment von Hallwachs und beantworten von Fragen dazu. Funktion: Theoretische Grundlagen erarbeiten.

Akt-2. Simulation mit der Java-App «Der Photoelektrische Effekt» (<https://phet.colorado.edu/de/simulation/photoelectric>). Dazu erhalten die SuS ein Arbeitsblatt, in welchem die Gegenspannungsmethode von Lenard erklärt wird. In der Simulation können die SuS die Parameter im Versuch von Lenard verändern und die Auswirkungen beobachten (Intensität und Wellenlänge der einfallenden Photonen, Zielmaterial und Gegenspannung). Die austretenden Photoelektronen und der resultierende elektrische Strom werden in der Simulation visualisiert. Die Funktion dieser Aktivität ist eine selbstgesteuerte Auseinandersetzung mit dem Photoeffekt.

Akt-3. Lesen eines Lerntexts zur De-Broglie Relation und zur Elektronenbeugungsröhre. Funktion: Theoretische Grundlagen erarbeiten.

Akt-4. Messung der Interferenzradien an der Elektronenbeugungsröhre: Wegen der aufwändigen Apparatur ist dieser Versuch primär als Demonstrationsexperiment geeignet. Die SuS sollten aber die Interferenzradien selber mit dem Massstab messen, so dass einen Hands-on Komponente einfließt. Dies bietet allen SuS die Gelegenheit, die Beugungsröhre aktiv und von nahe zu begutachten. Die De-Broglie Relation und die Teilchen-Wellen Dualität wird in der Gruppe (sozial) vertieft.

Akt-5. Mit Hand-Spektroskopen begutachten die SuS verschiedene Lichtquellen und stellen dabei Spektrallinien fest. Funktion: Hands-on Experiment; Einführung in das Thema Linienspektren und Quantisierung; Vorbereitung auf das Bohrsche Atommodell.

Akt-6. Herleitung der Bohrschen Quantisierungsbedingung der Orbitalradien und der Energien mit Hilfe der De-Broglie Relation. Die Funktion dieser Aktivität ist eine aktive und selbstgesteuerte Auseinandersetzung mit dem Thema.

Akt-7. Simulation mit der Java-App «Modelle des Wasserstoffatoms» (<https://phet.colorado.edu/de/simulation/hydrogen-atom>). Hier werden die Atomradien im Bohrschen Modell sowie einfallende, absorbierte und emittierte Photonen visualisiert. Die SuS können zwischen weißem und monochromatischem Licht wählen. Die Funktion dieser Aktivität ist eine visuelle Vertiefung des Bohrschen Atommodells und der Emissions- resp. Absorptionsspektren.

Akt-8. Klicker-Session; Funktion: formatives Assessment.

2.3.3 Lektionsplan

Lerneinheit	Lernziele	Aktivitäten	Methode	Sozialform
LE 1 (DL)	Übersicht und Motivation des Themas; Photoeffekt und Photonenhypothese; Lz1	Theorie/Arbeitsblatt zum Hallwachs Effekt lesen bearbeiten	Advance Organizer, Arbeitsblatt	Lehrervortrag Einzelarbeit Plenumsdiskussion
LE 2 (DL)	Photoeffekt, Gegenspannung, Austrittsarbeit; Lz1, Lo1a/b	Simulation zum Photoeffekt, Arbeitsblatt dazu lesen und bearbeiten	Physlet	Partnerarbeit Plenumsdiskussion
LE 3 (EL)	De-Broglie Relation; Lz2, Lo2a/b	Theorie/Arbeitsblatt zur Materiewelle von de Broglie bearbeiten	Arbeitsblatt	Lehrervortrag Einzelarbeit Plenumsdiskussion
LE 4 (DL)	Elektronenbeugung; Lz2, Lo2b	Messung der Beugungsradien an der Elektronenbeugungsröhre	Demo-Experiment mit Hands-on Charakter	Gruppenarbeit
LE 5 (DL)	Spektrallinien, Bohrsches Atommodell; Lz3, Lo3	Hand-Spektroskop, Theorie/Arbeitsblatt zum Emissionsspektrum von Atomen und dem Bohrschen Atommodell	Hands-on-Experiment, Arbeitsblatt	Partnerarbeit/Einzelarbeit
LE 6 (EL)	Bohrsches Atommodell; Lz4, Lo4	Simulation H-Atom, Arbeitsblatt	Physlet	Partnerarbeit

2.4 Alignment

	Erinnern	Verstehen	Anwenden	Analysieren	Evaluieren	Kreieren
Faktenwissen	Akt-1, Akt-2, Akt-3, Akt-7, Lz1	Akt-1, Akt-2, Akt-3, Akt-5, Akt-7, Lo3	Akt-4, Akt-6, Lz2, Lz3	Akt-2, Lz1	Akt-4	
Konzeptwissen	Akt-6, Akt-7, Akt-8	Akt-1, Akt-2, Akt-3, Akt-5, Akt-8, Lz1, Lz2, Lz3	Akt-2, Akt-3, Akt-4, Akt-6, Lz4	Akt-2, Akt-6, Lz3	Akt-2	
Prozedurales Wissen	Akt-3, Lo1a, Lo2a	Akt-6, Lo1b, Lo2b	Akt-4, Akt-7, Lo1b, Lo2b, Lo3, Lo4			
Metakognition						

Die Lernziele sind mehrheitlich auf der linken Seite, d.h. unter Erinnern-Verstehen-Anwenden lokalisiert, während die Aktivitäten etwas breiter gestreut sind. Unter Umständen könnte man die Unterrichtseinheit etwas ausbauen, damit höhere liegende kognitive Stufen noch stärker gewichtet sind. Metakognitives Wissen wird in dieser Lerneinheit nicht angesprochen.

3 Prinzipien des Lernens

3.1 Vorwissen

In der Einleitung (erste Lektion) werden historische Aspekte der Physik am Anfang des 20. Jahrhunderts besprochen. Hier wird kurz auf einige wichtigen Begriffe der klassischen Physik eingegangen, welche die SuS bereits kennen (Newtonsche Mechanik, Masse, Teilchen, Welle, Frequenz, Atom, Elektron, Beschleunigung). Dieses Vorwissen wird damit aktiviert. Gleichzeitig erfahren die SuS aber auch, dass die klassische Physik die *Instabilität der Atome* voraussagt. Irgendwas kann also mit der klassischen Physik nicht stimmen. Eins war anfangs 20. Jahrhunderts klar: Eine neue Art von Physik war notwendig und musste erarbeitet werden. Diese neue Physik ist die *Quantenphysik*. Den SuS wird der Ausblick präsentiert, dass sie am Ende der Unterrichtseinheit mit Hilfe der Quantenphysik verstehen werden, wieso Atome stabil sind.

Unabhängig von der Diskussion zur Atomstabilität wurden Ende 19. Und Anfangs 20. Jahrhundert äusserst sonderbare Phänomene beobachtet und gemessen, welche mit der klassischen Physik nicht erklärbar waren. Zwei dieser Beobachtungen werden Inhalt der nächsten vier Lektionen sein.

Dank diesem Aufbau wissen die SuS woher sie kommen (aus der klassischen Physik), und wohin sie gehen (Richtung sonderbare Quantenphänomene und einer Erklärung für die Stabilität der Atome).

3.2 Motivation

Zu den positiven Werten der Unterrichtseinheit gehörten einerseits fundamentale wissenschaftliche Aspekte. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts befand sich die Physik in einer Krise, als klar wurde, dass ganz Grundlegende Aspekte nicht verstanden waren:

- Die Stabilität der Atome kann mit der klassischen Physik nicht begründet werden.
- Zwischen dem Teilchenmodell und dem Wellenmodell des Lichts gibt es eine jahrhundertealte Auseinandersetzung (Newton, Huygens etc). Ende des 19. Jahrhunderts hatte sich das Wellenmodell durchzusetzen. Jedoch wurden nun Phänomene beobachtet, welche mit dem Wellenmodell nicht zu vereinbaren waren (Photoeffekt, Schwarzkörperstrahlung, Compton-Effekt).
- Ähnlich war die Situation beim Elektron: Der Millikan-Versuch zeigte, dass es sich beim Elektron um ein unteilbares Teilchen handelt. Erstaunlicherweise fand man auch Wellenverhalten von Elektronen.

So war zu Beginn des 20. Jahrhunderts klar, dass eine revolutionäre neue physikalische Theorie notwendig ist. Wichtige Aspekte dieser modernen Physik, der *Quantenphysik*, lernen die SuS nun kennen.

Andererseits stellte sich später heraus, dass es viele konkrete Anwendungen der neu entdeckten Quantenphänomene gibt. Heute ist Quantenphysik aus unserer modernen Welt und Technologie nicht wegzudenken. Deren Anwendungen sind zahlreich: Laser, Photovoltaik, Computer, Transistoren, Datenspeicher, um nur einige zu nennen. Die Quantenphysik selbst macht zwar überraschende Aussagen und ist nicht ganz einfach zu verstehen. Die Fülle an Anwendungen machen die Beschäftigung damit aber ein lohnendes Unterfangen.

Einige dieser Anwendungen könnten im Unterrichtsverlauf punktweise zur Sprache kommen.

- Der Photoeffekt findet Verwendung in Photovoltaikzellen, mit denen Sonnenlicht in elektrische Energie umgewandelt wird. Diese erneuerbare Energiequelle hat das Potential, die gefährliche Abhängigkeit der Menschheit von fossilen Energiequellen zu verringern.
- Die Materiewelle findet in neuartigen Quantencomputern Anwendung. Dieses Forschungsgebiet wird von öffentlichen und privaten Forschungseinrichtungen (z.B. Microsoft und Google) stark vorangetrieben. Man erhofft sich, damit neuartige Probleme zu lösen, welche für heutige Computer unlösbar sind.
- Die Emissionsspektren der Atome sind die Fingerabdrücke der Elemente. Mit deren Hilfe können wir beispielsweise die chemische Zusammensetzung der Sonne und anderer Sterne bestimmen. Aber auch auf kleinen Skalen erlaubt es die Spektroskopie, Stoffanalysen zu machen.

Neben dieser positiven Wertehaltung gilt es aber auch, den SuS glaubhaft zu machen, dass ein Verständnis von zentralen Aspekten der Quantenphysik in dieser Unterrichtseinheit möglich ist. Dazu ist aber eine aktive Mitarbeit nötig.

3.3 Wissensstruktur

Der Advance Organizer am Anfang der Unterrichtseinheit ist eine leichte Vereinfachung der vorgestellten Concept-Map. Der Advance Organizer wird am Ende der Unterrichtseinheit nochmal gezeigt, damit die SuS das nun Gelernte in der Struktur integrieren können. Damit wird den SuS ein sinnvolles und gezieltes Hinarbeiten und Erreichen einer neuen Wissensstruktur erleichtert und auch graphisch illustriert.

Alle Aktivitäten der SuS innerhalb der Unterrichtseinheit sind mit der Hoffnung und der Intention angelegt, dass sie den Aufbau einer sinnvollen Wissensstruktur fördern. Beispielsweise findet in der Simulation zum Photoeffekt und der Messung an der Elektronenbeugungsröhre eine aktive Auseinandersetzung mit der vorher erarbeiteten Theorie statt. Die SuS integrieren ihr neues Wissen über die Elektronenwelle und das Lichtteilchen selbstgesteuert in der angeleiteten Aufgabe zur Herleitung des Bohrschen Atommodells und der Linienspektren. Diese Aktivität wird einerseits durch den geschichtlichen Hintergrund motiviert (Stabilität des Atoms), andererseits wird durch das Hands-on Experiment zu den Linienspektren darauf vorbereitet.

3.4 Peer-Learning

Peer-Learning findet in Form einer Gruppenarbeit und verschiedener Partnerarbeiten statt: Die Messungen und Berechnungen zur Elektronenbeugung werden in Gruppen gemacht. Die Simulationen zum Photoeffekt und zum Bohrschen Atommodell, sowie das Hands-on Experiment (Spektrallinien) und das Arbeitsblatt zur Quantisierung der Orbitalradien werden in Zweiergruppen gelöst.

3.5 Aktivitäten und Feedback

Die selbstgesteuerten Aktivitäten (Simulation Photoeffekt, Elektronenbeugung und geleitete Aufgabe bzw. Simulation zum Bohrschen Atommodell) erlauben der Lehrperson, die SuS genau zu beobachten und entsprechend gezieltes Feedback zu geben. So kann die Lehrperson auf die individuellen Lernschwierigkeiten eingehen und allenfalls allgemeine Massnahmen treffen. In diesem Zusammenhang ist wichtig, dass die Lernziele zu Beginn der Aktivitäten für die SuS transparent sind.

Darüber hinaus sind, bis auf die Klicker-Session am Ende der Unterrichtseinheit, keine formativen Assessments mit Feedback geplant. Allenfalls könnte nach den 3 Lerneinheiten (Lichtteilchen, Elektronenwelle, Atommodell) von den SuS jeweils ein «Muddiest Point» auf ein Papier notiert und von der Lehrperson eingezogen werden. Die Lehrperson könnte so auf Lernschwierigkeiten möglicherweise noch besser reagieren.

3.6 Mastery

Es scheint ehrgeizig, in einer kurzen Unterrichtssequenz von 6 Lektionen und für ein spezialisiertes und fortgeschrittenes Thema wie die Quantenphysik Mastery erlangen zu können. Dennoch ist der Unterricht so aufgebaut, dass die elementaren Lerninhalte schrittweise und aufbauend eingeführt werden: Zuerst wird das Lichtteilchen behandelt, danach die Elektronenwelle als Gegenstück dazu. Diese Wissensbausteine werden einzeln in der Simulation zum Photoeffekt resp. in der Gruppenarbeit zur Elektronenbeugungsröhre geübt.

Schlussendlich werden die beiden neuen Konzepte (Lichtteilchen & Materiewelle) im Bohrschen Atommodell vereint, d.h. die SuS wenden die gelernten Fertigkeiten im Kontext der Atomphysik an. Daraufhin wird dieses kombinierte Wissen durch die Simulation am Bohrschen Atommodell weiter eingeübt und vertieft. Unsere Hoffnung ist, dass durch diese Integration und Anwendungen der neu gelernten Konzepte eine gewisse Mastery erlangt werden kann.

3.7 Selbstregulierung

Ein grosser Teil der Erarbeitung von Theorie zu den drei behandelten Themenbereichen (Lichtteilchen, Elektronenwellen, Bohrsches Atommodell/Linienspektren) wird in Leseaufträgen und auf Arbeitsblättern von den SuS selbstständig resp. angeleitet erarbeitet.

Metakognitives Wissen oder Selbstreflexion wird in dieser Unterrichtssequenz nicht explizit gefördert. Dies könnte aber ausgebaut werden. Beispielsweise könnte man die SuS auf ein Papier notieren lassen, welchen Lerninhalt sie am besten und welchen am schlechtesten verstanden haben («Muddiest Point») und dieses einzusammeln.

4 Unterrichtsunterlagen

4.1 Rahmenbedingungen

Es handelt sich um eine 4 Klasse des Kurzgymnasiums mit 20 SuS, je 10 Mädchen und Knaben. Die SuS benötigen Laptops mit Java-VM, um damit Java-Simulationen (jar-Files) starten und ausführen zu können.

4.2 Unterrichtsorganisation

Für den Unterricht bringen die SuS Schreibzeug, Taschenrechner und Formelsammlung mit. Die Laptops für die Simulationen sowie das Material für die Experimente werden von der Lehrperson zur Verfügung gestellt. Der vermittelte Stoff wird grösstenteils auf Arbeits- und Theorieblättern festgehalten. Zusätzlich machen die SuS sich Notizen.

4.3 Unterrichtsdispositionen

4.3.1 LE 1 & 2: Der Photoeffekt

Lernziele: Lz1, Lo1a/b

Die SuS kennen den Photoeffekt und sie verstehen, dass dieses Phänomen durch Licht als quantisierte Energiepakete (Photonen) erklärt werden kann und nicht durch das Modell der elektromagnetischen Welle. Sie haben eine Vorstellung von der Austrittsarbeit und sie wissen, wie man diese durch das Anlegen einer Gegenspannung messen kann. Sie können das Planck'sche Wirkungsquantum aus vorgegebenen Messwerten (Spannung, Frequenz/Wellenlänge) berechnen.

Ablauf

Unterricht	Lehreraktivität	SuS-Aktivität	Sozialform	Zeit
1. Lektion				
IU	Lehrervortrag, Advance Organizer	Zuhören, Fragen stellen	Lehrerzentriert	10'
Hallwachs Experiment (Arbeitsblatt)	Hilfestellung	Text lesen, Arbeitsblatt bearbeiten	Einzelarbeit, 2er Gruppen	25'
Einstein'schen Photonenhypothese, Austrittsarbeit	Lehrervortrag, Wissenssicherung	Notizen	Lehrerzentriert, Plenum	10'
2. Lektion				
Simulation Photoeffekt	Hilfestellung	Auftrag Lesen	Einzelarbeit	10'
Simulation Photoeffekt	Hilfestellung, Diskussion	Arbeitsblatt lösen	2er Gruppen	25'
Abschluss und Diskussion	Lehrervortrag, Wissenssicherung	Notizen, Diskussion	Lehrerzentriert, Plenum	10'

Medien

In dieser Unterrichtseinheit verwenden die SuS einen Laptop mit Internetanschluss und Java Virtual Machine (JVM). Die Applikation kann auch vorher auf die Laptops kopiert werden, so dass kein Internetanschluss nötig ist. Je ein Laptop für 2 SuS.

Experimente

Simulation «Photoelektrischer Effekt» von
<https://phet.colorado.edu/de/simulation/photoelectric>

Quellen

- QuantenErgänzungenLeitprogramm.docx, Martin Mohr, ETH Physik FD 1 (2018).
- VL8_P_Physlets.pdf, Andreas Lichtenberger, ETH Physik FD 2 (2019).
- «Exploring Quantum Physics Through Hands-on Projects», D. & S. Prutchi, Wiley (2012).
- https://www.brainkart.com/article/Hallwachs-Experiment--photo-electric-effect_2943/

Didaktische und methodische Überlegungen

In der Einführung am Anfang der ersten Lektion wird von der Lehrperson der geschichtliche Hintergrund und die Ziele dieser Unterrichtseinheit präsentiert. Dazu werden auch das Vorwissen und notwendigen Begriffe der klassischen Physik aktiviert. Die Funktion ist der Aufbau von Motivation und Aktivierung für das neue Thema.

Nach der allgemeinen Einführung steigt man gleich mit dem ersten Thema ein: dem Photoeffekt. Damit die SuS nicht weiter nur passiv zuhören müssen, erarbeiten sie sich das Wissen zum Hallwachs Experiment mit einem Arbeitsblatt selber. Gegen Ende der ersten Lektion fasst die Lehrperson dieses zusammen und klärt Fragen dazu im Plenum.

Ein der zweiten Lektion kommt die Gegenspannungsmethode im Experiment von Lenard zum Zuge. Auch hier lesen die SuS zuerst einen Text und starten dann individuell (resp. in Gruppen) mit der Simulation zum Photoeffekt. Die Lehrperson kann individuelles Feedback geben. Am Schluss werden die Ergebnisse im Plenum festgehalten.

Eine andere Möglichkeit wäre, dass die Lehrperson die Theorieinhalte der Arbeitsblätter in einem Lehrervortrag vermittelt. Die SuS müssten dazu aber etwas lange zuhören. Eine «Sandwich Struktur» (Lehrervortrag -- Theorietext Lesen -- Arbeitsblatt/Simulation) scheint mir angemessener.

Materialien zu LE 1

AO_Quant.pdf: Slide als Advance Organizer

AB_Hallwachs.pdf: Lesetext mit Fragen zum Hallwachs Experiment.

Inhalt des IU-Lehrervortrags (Stichwortartig, Kurzfassung)

1. In den nächsten 6 Lektionen werden wir ein Thema der modernen Physik behandeln: *die Quantenphysik*.
2. Um die Jahrhundertwende vom 19. zum 20. Jahrhundert war die Physik in einer Krise. Einerseits gab es äusserst erfolgreiche physikalische Theorien: von Newton zur Bewegung von Körpern und der Gravitation, von Maxwell zum Elektromagnetismus und zum Licht, die Wärmelehre. Fast alle natürlichen Phänomene konnten mit diesen (heute «klassisch» genannten) Theorien erklärt werden. Gleichzeitig gab es aber verschiedene neue Messungen und Phänomene, die zu den etablierten Theorien im Widerspruch standen.
3. Beispielsweise kann die Stabilität der Atome mit der klassischen Physik nicht erklärt werden. Man wusste, dass Atome aus einem positiv geladenen Kern und negativ geladenen Elektronen bestehen. Die Elektronen werden durch die Coulomb-Kraft am Kern festgehalten. Wenn man sich das Atom wie ein Sonnensystem vorstellt, so werden diese Elektronen ständig gegen den Kern hin beschleunigt (Zentripetalbeschleunigung). Beschleunigte Ladungen (siehe Antenne) senden aber elektromagnetische Strahlung aus, und Elektronen im Atom verlieren so ständig Energie. Die Lebensdauer eines solchen Atoms würde nur Bruchteile von Sekunden betragen. Wir werden darauf noch etwas genauer zu sprechen kommen. Um die Stabilität von Atomen zu erklären war also eine neue Theorie nötig.
4. Es gab aber weitere sonderbare Beobachtungen. Einerseits zeigt die Wärmestrahlung heisser Körper (die sog. Schwarzkörperstrahlung) ein komplett anderes Verhalten als von der klassischen Physik vorausgesagt. Ein weiterer Aspekt war, dass Licht, welches als Wellenphänomen beschrieben wurde, in gewissen Experimenten sich wie Teilchen verhält. Auch stellte sich heraus, dass klassische Teilchen, wie etwas das Elektron, manchmal

typische Wellenverhalten zeigen, wie etwa Interferenz und Beugung. Diese sonderbaren Phänomene werden «Teilchen-Wellen-Dualität» genannt und es wird ein zentraler Teil dieser Unterrichtseinheit sein.

5. Im 20. Jahrhundert wurde dann mit der Quantenphysik eine neue physikalische Theorie entwickelt, welche diese Phänomene erklären konnte. In diesem Advance Organizers habe ich die zentralen Begriffe notiert, welche wir im Unterricht behandeln werden. Drei Aspekte werden wir besprechen: Zuerst das Teilchenverhalten des Lichts, welches aus sogenannten Lichtquanten oder Photonen besteht. Der dazugehörige Versuch ist der «Photoeffekt», der zeigt, dass die Energie, welche vom Photon getragen wird von seiner Frequenz abhängt. Im zweiten Teil des Unterrichts werden wir sehen, dass Materie wie z.B. Elektronen nicht nur klassische Eigenschaften (wie Masse, Impuls etc) besitzt, sondern auch Welleneigenschaften (Wellenlänge, Frequenz etc); Dies wird in der De-Broglie Gleichung ausgedrückt. Schlussendlich werden wir diese 2 neuen Konzepte im Bohrschen Atommodell vereinen: Der Wellencharakter des Elektrons kann die Stabilität der Atome erklären. Weiter wurden sonderbare Linienspektren im Licht beobachtet, welches von Atomen ausgesendet wird. Auch dieses kann mit dem Bohrschen Atommodell und dem Teilchenmodell von Licht erklärt werden. Dies wird im dritten Teil des Unterrichts behandelt.

6. Die Quantenphysik war sehr erfolgreich und hatte fand bis heute zahlreiche technologische Anwendungen (Laser, Computer, Speicher, etc). Hier wollen wir aber nicht stark darauf eingehen. Für uns sollen folgende grundlegenden Fragestellungen im Raum stehen. Anschrift: «Wieso sind Atome stabil?» und «Aus was bestehen nun Licht und Materie eigentlich? Aus Wellen oder aus Teilchen?»

7. Lernziele der verbleibenden Doppellektion bekannt geben. Dann sollen die SuS das Arbeitsblatt zum Hallwachs Effekt lesen und bearbeiten.

Danach: *Schüleraktivität* (Lesen, Arbeitsblatt besprechen)

Inhalt der Abschlussdiskussion

1. Das Arbeitsblatt «Der Hallwachs Effekt» wird im Plenum korrigiert (siehe Korrektur im Anhang).
2. Das Experiment von Hallwachs zeigte also, dass Licht eine Energie trägt, die von der Frequenz abhängig ist. Später stellte A. Einstein die sogenannte Photonenhypothese auf: Er sagte, dass Licht aus keinen Energiepaketen besteht (den sogenannten Photonen), welche eine Energie $E = h f$ haben, wobei $f = c/\lambda$ die Lichtfrequenz ist und h eine Naturkonstante, genannt das Planck'sche Wirkungsquantum oder Planck Konstante. Im Photoeffekt kann der Wert dieser Konstanten bestimmt werden und ist etwa $h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J s} = 4.136 \cdot 10^{-15} \text{ eV s}$.
3. Um Elektronen aus den Metallplatten herauszulösen, braucht es eine gewisse Energie (die sog. Austrittsarbeit). Erst wenn die Frequenz und damit die Energie des Lichtquantums genügend gross ist, kann es ein Elektron herauslösen und einen elektrischen Strom fliessen lassen. Dies erklärt die von Hallwachs beobachtete Grenzfrequenz.
4. Im nächsten Arbeitsauftrag und einer Simulation zum Photoeffekt werden Sie mehr dazu erfahren.

Materialien zu LE 2

AB_Photoeffekt.pdf: Lesetext mit Aufträgen zur Simulation «Photoelektrischer Effekt»
https://phet.colorado.edu/sims/photoelectric/photoelectric_de.jar

Inhalt der Abschlussdiskussion

Ist auf dem Arbeitsblatt «AB_Photoeffekt.docx» vermerkt (Siehe Lösung im Anhang).

4.3.2 LE 3: Die Elektronenwelle

Lernziele: Lz2, Lo2a/b

Die SuS kennen die De-Broglie Relation und sie wissen, dass der Wellencharakter der Materie sich in Interferenzmustern manifestiert. Sie verstehen den Aufbau und die Funktionsweise der Elektronenbeugungsröhre.

Ablauf

Unterricht	Lehreraktivität	SuS-Aktivität	Sozialform	Zeit
IU	Lehrervortrag	Zuhören, Notizen	Lehrerzentriert	5'
De-Broglie Relation (TH_DeBroglie, S. 1-2)	Hilfestellung	Text lesen	Einzelarbeit	10'
Besprechung	Diskussionsleitung, Wissenssicherung	Diskussion	Lehrerzentriert, Plenum	5'
Wellenerscheinung bei Elektronenbeugung (TH_DeBroglie, S. 3-5)	Hilfestellung	Text lesen	Einzelarbeit	15'
Besprechung	Diskussionsleitung, Wissenssicherung	Diskussion	Lehrerzentriert, Plenum	10'

Medien

In dieser Unterrichtseinheit verwenden die SuS das Arbeitsblatt «TH_DeBroglie.pdf»

Experimente

Das Experiment zur Elektronenbeugung folgt in der nächsten Lektion.

Quellen

- QuantenErgänzungenLeitprogramm.docx, Martin Mohr, ETH Physik FD 1 (2018).
- «Exploring Quantum Physics Through Hands-on Projects», D. & S. Prutchi, Wiley (2012).

Didaktische und methodische Überlegungen

In einem kurzen Lehrervortrag werden die Lernziele und der Inhalt der Lektion kurz vorgestellt. Danach lesen die SuS in Einzelarbeit einen Text zur Materiewelle von de Broglie (s. 1-2). Nach ca. 10 Minuten werden die Aufgaben dazu und evtl kurz der Inhalt im Plenum besprochen. Daraufhin lesen die SuS weiter über den Aufbau der Elektronenbeugungsröhre, welche in der nächsten Lektion dann verwendet werden soll. Am Schluss wird dieses Wissen von der Lehrperson kurz zusammengefasst und allfällige Fragen werden in Plenum besprochen.

Eine Möglichkeit wäre, die SuS die Texte teilweise laut vorlesen zu lassen. Ein Vorteil dieses Vorgehens ist, dass die Lehrperson gleich «in Echtzeit» Bemerkungen oder Vertiefungen zum Text anbringen kann, und nicht erst am Schluss. Ein Nachteil ist, dass die SuS so «im Gleichschritt», also ohne Selbststeuerung, lernen müssen.

Materialien zu LE 3

TH_DeBroglie.pdf: Theorie und Aufgaben zur De-Broglie Wellenlänge und zur Elektronenbeugung.

Inhalt des UI

1. In den letzten 2 Lektionen haben wir durch den Photoeffekt erfahren, dass Licht aus Energiepaketen, den sogenannten Photonen besteht. Licht und alle elektromagnetischen Wellen zeigen also Teilcheneigenschaften. Louis de Broglie hat diese Idee weitergedacht und vorgeschlagen, dass umgekehrt Materieteilchen auch Welleneigenschaften zeigen können. Als nächstes lernen Sie in einem Arbeitsblatt, was es damit auf sich hat. Lernziele dieser und der nächsten Lektion bekannt geben.

Inhalt der ersten Besprechung: Ist dem Arbeitsblatt «TH_DeBroglie.docx» notiert.

Inhalt der Abschlussbesprechung:

1. De Broglie postulierte 1924 also, dass jedem Materieteilchen eine Welle zugeordnet werden muss und dass deren Wellenlänge gegeben ist durch die De-Broglie Relation. Das bedeutet aber auch, dass Materie typische Wellenphänomene wie Interferenz oder Beugung zeigen sollte. Nicht viel später wurden solche Wellenphänomene tatsächlich im Experiment festgestellt. Wir werden dies in der nächsten Lektion an der Elektronenbeugungsröhre tun.
2. Aufbau des Experiments und Beugung am Kristallgitter wird kurz im Plenum besprochen (Material im Arbeitsblatt «TH_DeBroglie.doc»)

4.3.3 LE 4 & 5: Elektronenbeugungsröhre, Linienspektren & Bohrsches Atommodell

Lernziele: Lz2, Lo2a/b, Lz3, Lz4, Lo3

Die SuS vertiefen ihr Wissen über den Wellencharakter des Elektrons (De-Broglie Relation) anhand der Messung der Interferenzradien bei der Elektronenbeugungsröhre. Die SuS wissen, dass ausgesendetes Licht von bestimmten Lichtquellen (Elemente) charakteristische Linien im Spektrum aufweisen. Sie verstehen, dass der Wellencharakter des Elektrons eine natürliche Erklärung für das beobachtete Linienspektrum sowie die Stabilität der Atome liefert. Sie kennen die zugelassenen Orbitalradien und Energieniveaus im Bohrsche Atommodell. Sie können daraus Spektrallinien berechnen.

Ablauf

Unterricht	Lehreraktivität	SuS-Aktivität	Sozialform	Zeit
1. Lektion				
IU zur Elektronenbeugungsröhre	Lehrervortrag	Zuhören	Lehrerzentriert	10'
Elektronenbeugung Experiment	Hilfestellung	Radien Messen, Arbeitsblatt bearbeiten	3-4er Gruppen	25'
Auswertung	Diskussionsleitung, Wissenssicherung	Notizen, Fragen	Lehrerzentriert, Plenum	10'
2. Lektion				
Beobachten vom Linienspektrum in verschiedenen Lichtquellen	Instruktionen geben, besprechen	Hands-on (Hand-Spektroskop)	2er Gruppe	10'
Text zum Bohrschen Atommodell (historisch).	Hilfestellung	Lesen	Einzelarbeit	10'
Arbeitsblatt «Quantisierung/Bohrsches Atommodell»	Hilfestellung	Arbeitsblatt lösen	Partnerarbeit	20'
Wissenssicherung	Arbeitsblatt wird besprochen	Notizen, Fragen	Lehrerzentriert, Plenum	5'

Medien

In der 1. Lektion arbeiten die SuS mit dem ausgedruckten Arbeitsblatt «AB_EBeugung.pdf». Das Theorieblatt der letzten Lektion sollten Sie auch zur Hand haben.

In der 2. Lektion arbeiten die SuS mit dem Text «TH_Bohr.pdf» und dem Arbeitsblatt «AB_BohrDeBroglie.pdf».

Experimente

Die Elektronenbeugungsröhre wird in der ersten Lektion (LE 4) als Demonstrationsexperiment verwendet, wobei die SuS aber selbst die Radien der Beugungsringe messen. In der zweiten Lektion (LE 5) brauchen die SuS Hand-Spektroskope (ca. 1 pro 2 SuS) und geeignete Lichtquellen zum Beobachten der Linienspektren (Hands-on Experiment)

Quellen

- QuantenErgänzungenLeitprogramm.docx, Martin Mohr, ETH Physik FD 1 (2018).
- «Exploring Quantum Physics Through Hands-on Projects», D. & S. Prutchi, Wiley (2012).
- «A Classical Approach to the De Broglie-Wave Based on Bohr's H-Atom-Model»,
<http://article.sciencepublishinggroup.com/html/10.11648.j.ijamtp.20160201.11.html>

Didaktische und methodische Überlegungen

Im Unterrichtseinstieg werden die Theorie von de Broglie und der Aufbau der Elektronenbeugungsröhre aktiviert und nochmal in Erinnerung gerufen, wobei letztere nun real im Klassenzimmer aufgebaut ist und angeschaltet wird. Die Lehrperson kann durch Anbringen eines Hand-Magneten auch zeigen, dass die erzeugte Strahlung in der Tat aus elektrisch geladenen Teilchen (Elektronen) besteht und nicht etwa aus Licht. Danach wird das Graphitgitter eingefügt und das Beugungsmuster kann beobachtet werden. Im zweiten Teil der LE 4 bearbeiten die SuS selbstständig das Arbeitsblatt, messen die Beugungsringe, berechnen die entsprechende Wellenlängen und vergleichen sie mit der De-Broglie Wellenlänge. Sie verifizieren so die Theorie von de Broglie zur Materiewelle. Zum Abschluss werden die Resultate von der Lehrperson zusammengetragen und im Plenum diskutiert.

In der zweiten Lektion (LE 5) werden als Einführung zum Bohrschen Atommodell in einen Hands-on Experiment die Linienspektren diverser Lichtquellen begutachtet. Dabei wird der geschichtliche Kontext der Physik Ende 19. Jahrhunderts nochmal in Erinnerung gerufen. Die SuS lesen das Theorieblatt zum Bohrschen Atommodell. Durch das Arbeitsblatt angeleitet sollen sie die Quantisierungsbedingung für den Orbitalradius und die Energieniveaus des Wasserstoffatoms selbst herleiten. Dazu verwenden sie die De-Broglie Relation, welche in den vorhergehenden Lektionen eingeführt und vertieft wurde. Am Ende der Lektion fasst die Lehrperson das erarbeitete Wissen zum Bohrschen Atommodell und den Spektrallinien im Plenum zusammen.

Materialien zu LE 4

TH_DeBroglie.pdf: Theorie und Aufgaben zur De-Broglie Wellenlänge und zur Elektronenbeugung (Erinnerung).

AB_EBeugung.pdf: Arbeitsblatt zum Elektronenbeugungsexperiment.

Experiment: Die Elektronenbeugungsröhre muss vorhanden sein und laufen.

Inhalt des IU zur Elektronenbeugungsröhre

1. In der letzten Lektion haben wir das Postulat von Louis de Broglie zur Materiewelle besprochen und auch schon über das Beugungsexperiment von Elektronen in der Braunschen Röhre gelesen. Heute werden wir dieses Experiment durchführen und die Wellennatur des Elektrons nachweisen. Hier ist die Elektronenbeugungsröhre aufgebaut. An der heissen Kathode treten Elektronen aus und werden durch eine Spannung U beschleunigt. Dann treffen sie hier auf eine polykristalline Graphitprobe auf, wo die Materiewelle gebeugt wird. Auf dem fluoreszierenden Schirm werden die Elektronen absorbiert und erregen so sichtbare Photonen, welche wir mit unseren Augen wahrnehmen können.

2. Nun schalten wir die Röhre mal an. Die Beschleunigungsspannung ist regulierbar; wir können so die kinetische Energie der Elektronen resp. deren Impuls ändern (Vorführung). Man sieht nun auf dem Schirm, wie die Beugungsringe entstehen. Das Graphit ist polykristallin, d.h. die Gitterebenen schauen in alle möglichen Richtungen. Aus diesem Grund entsteht ein kreisförmiges Beugungsmuster.

3. Wenn wir einen Stabmagneten an die Röhre halten, so sehen wir, dass der Strahl abgelenkt wird. Es handelt sich also in der Tat um geladene Teilchen (Elektronen) und nicht etwa Licht.

4. Nun bitte ich Sie das Arbeitsblatt zur Elektronenbeugung anzuschauen. Bilden Sie Gruppen von je 4-5 Schüler. Jede Gruppe misst die Beugungsradien bei einer bestimmten Beschleunigungsspannung. Die Gitterparameter

des Graphits sind gegeben. Aus den Gitterparameter und den Beugungsradien können Sie die Wellenlänge bestimmen. Andererseits können Sie aus den Beschleunigungsspannung den Impuls der Elektronen und mit Hilfe der De-Broglie-Relation die Wellenlänge auch theoretisch berechnen. Das Ziel ist festzustellen, ob diese beiden Resultate übereinstimmen.

Inhalt der Schlussdiskussion: Schülerresultate zur Elektronenbeugung werden gesammelt und im Plenum besprochen.

Materialien zu LE 5

Hand-Spektrometer und Lichtquellen für das Hands-on Experiment zur Beobachtung der Spektrallinien.

TH_Bohr.pdf: Theorieblatt zum Bohrschen Atommodell (historisch).

AB_BohrDeBroglie.pdf: Arbeitsblatt zur Herleitung der Quantisierung von Bahnradien und Energien im Bohrschen Atommodell durch die De-Broglie-Wellenlänge.

Inhalt der Einstiegsdiskussion: Lernziele der letzten 2 Lektionen bekannt geben (Verstehen, woher die Spektrallinien kommen und ein stabiles Modell des Atoms herleiten).

Inhalt der Schlussdiskussion: Der Inhalt des Theorieblatts «TH_Bohr.pdf» wird zusammengefasst und der Auftrag (s. 1) wird diskutiert. Der Inhalt des Arbeitsblatts «Quantisierung/Bohrsches Atommodell» wird zusammengefasst und diskutiert.

Alternativen: Die Fraunhoferlinien im Spektrum der Sonne könnten auch beobachtet werden. Es sind Absorptionslinien durch Gase in der Atmosphäre der Sonne. Damit man nicht direkt in die Sonne schauen muss, kann man die Spektroskopie durch Reflexion an einer Compact Disc (CD) machen.

4.3.4 LE 6: Das Bohrsche Atommodell (Vertiefung)

Lernziele: Lz4, Lo3, Lo4

Die SuS vertiefen das Bohrsche Atommodell und die Linienspektren anhand einer Simulation. Sie repetieren und üben die Konzepte der Unterrichtseinheit. Der Bogen zur Einführung der Unterrichtseinheit wird geschlossen.

Ablauf

Unterricht	Lehreraktivität	SuS-Aktivität	Sozialform	Zeit
IU	Lehrervortrag	Zuhören	Lehrerzentriert	5'
Simulation Bohrsches Atommodell	Hilfestellung	Arbeitsblatt lösen	2er Gruppen	15'
Wissenssicherung, Überblick (Advance-Org)	Gesprächsleitung, Zusammenfassung	Diskussion, Notizen	Lehrerzentriert, Plenum	10'
Kicker-Fragen zur Unterrichtseinheit	Komentieren	Abstimmen	Präsentation & Besprechung der Fragen	15'

Medien

In dieser Unterrichtseinheit verwenden die SuS das Arbeitsblatt «AB_Modelle.pdf» für die Simulation. Die SuS brauchen einen Laptop (ca. einer pro 2 SuS) mit Internetanschluss und Java VM.

Die Klicker-Fragen befinden sich in «Klicker.pdf»; sie werden auf Socrative.com aufgeschaltet und die SuS verwenden zur Beantwortung der Fragen ihr Smartphone.

Experimente

Die Simulation «Modelle des Wasserstoffatoms» befindet sich auf <https://phet.colorado.edu/de/simulation/hydrogen-atom>

Didaktische und methodische Überlegungen

Nach einer kurzen Einführung sollen die SuS eine Simulation zu Modellen des Bohrschen Atommodells starten und ein Arbeitsblatt dazu lösen. Zuerst wird die Instabilität des Atoms in der klassischen Physik visualisiert. Danach wird das Bohrsche resp. Bohr-de-Broglie Atommodell visualisiert und die Absorption und Emission der Photonen bei einer bestimmten Wellenlänge werden repetiert. Die Simulation dient also primär dazu, die eher formalen theoretischen Inhalte der vorhergehenden Lektionen zu visualisieren.

Im letzten Teil der Lektion wird nochmal ein Überblick über die Unterrichtseinheit präsentiert und die wesentlichen Punkte werden zusammengefasst. Dazu wird der Advance Organizer nochmal aufgelegt. Dazu gehörten auch die Klicker-Fragen als formatives Assessment, welche je nach Schülerleistung von der Lehrperson nochmal im Plenum oder in Kleingruppen diskutiert werden.

Materialien zu LE 6

AB_Modelle.pdf: Arbeitsblatt zur Simulation «Modelle des Wasserstoffatoms».
Klicker.pdf: Klicker Fragen

5 Diskussion

Grundsätzlich scheint es mir sinnvoll, Unterrichtsböcke und -themen in einem Backward Design zu konstruieren. Dazu gehört sicher, dass man sich die **Stufe 1** (*Erwünschte Ziele*) klar macht. In dieser Stufe scheinen mir alle Elemente wichtig und hilfreich, um eine grössere Klarheit in Unterricht und in der Vorbereitung zu erlangen (Concept-Map, essentielle Fragen, Lernziele etc.). Eine detaillierte Planung von **Stufe 2** (*Evidenz*) hingegen scheint mir weniger sinnvoll. Natürlich muss eine gute Lehrperson einen soliden Grundstock an möglichen Fragestellungen für formative und summative Assessments zur Verfügung haben. Wie die Prüfungen und formativen Assessments dann konkret und im Detail genau aussehen, ist aber von so vielen Faktoren abhängig (Klassenart und -stärke, Lernzeit, was kann man im Unterricht wirklich behandeln, Schülerfragen und -schwierigkeiten etc.), dass es mir fast unmöglich scheint, diese vorgängig im Detail zu planen. Es scheint mehr Sinn zu machen, die Assessments während resp. nach dem Unterricht zu erstellen. Ähnlich sehe ich es in **Stufe 3** (Lektionsplanung und Aktivitäten): Sinnvolle Lernwege suchen, sowie einen Grundstock an Aktivitäten überblicken und diese gezielt einsetzen können ist sicher notwendig. Aber eine Detailplanung bis auf die einzelnen Lektionen herunter für einen ganzen Themenblock zu machen scheint mir sehr aufwändig. Man muss davon ausgehen, dass die meisten Lektionen sowieso anders verlaufen als geplant, und jede Lektion muss wieder neu gedacht werden. Allerdings macht es die Unterrichtsvorbereitung viel angenehmer und schneller, wenn die Lernmaterialien bereits vorhanden sind und nur noch neu geordnet und angepasst werden müssen. In diesem Sinne macht ein detailliertes Backward Design auch hier durchaus Sinn für einen Themenblock, den man in Zukunft weitere Male unterrichten will.

Für die vorliegende Unterrichtsausarbeitung finde ich es schwer zu sagen, welche Lektionen besonders gut gelungen sind und an welchen man noch arbeiten müsste. Um das herauszufinden müsste ich die Unterrichtseinheit zuerst echt im Klassenzimmer halten. Grundsätzlich denke ich, dass Unterrichten ein iterativer Prozess ist, bei dem die Unterrichtsmaterialien und das Design nach jedem Durchlauf verbessert werden können.

Trotzdem wage ich hier eine Einschätzung und Prognose: Ich vermute, dass der Teil zum Photoeffekt womöglich die grössten konzeptuellen Schwierigkeiten für die SuS darstellen wird. Es ist wohl der interessanteste aber auch der schwierigste Teil für die Schüler sein. Im Bereich der Elektronenbeugung gibt es einige technische Fragen zum Beugungsmuster, welche im echten Unterricht Probleme bereiten könnten. Abgesehen davon finde ich die Lektion, wo die SuS die Beugungsringe vermessen und die De-Broglie Relation testen müssen (LE 4), recht gelungen und sollte Spass machen. Der Teil zum Bohrschen Atommodell beinhaltet eine ziemlich algebraisch-formale Lernaufgabe (LE 5), welche möglicherweise nicht für alle Klassen geeignet ist.

Im echten Unterricht würde ich an diese Lerneinheit womöglich noch 1-2 Übungslektionen anhängen, in denen Rechenaufgaben zu den behandelten Lerninhalten gelöst werden. Zu jedem der 3 Themengebiete (Lichtteilchen, Materiewelle, Atommodell) gäbe es interessante quantitative Aufgaben, die im vorliegenden Rahmen nicht besprochen werden konnten.

6 Anhang mit Unterrichtsunterlagen und Lösungen

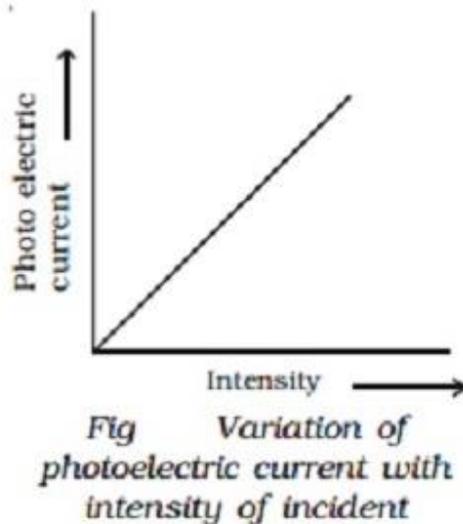
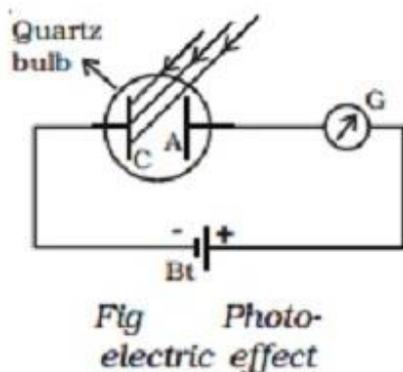
Auftrag: Lesen Sie folgenden Text und beantworten Sie anschliessend die Fragen dazu.

Der Hallwachs Effekt

Wilhelm Hallwachs (Assistent bei *Heinrich Hertz*) entdeckte 1886 einen physikalischen Effekt, der nach ihm benannt ist. Heute wird er eher als (*äussere*) *photoelektrische Effekt* (oder einfach Photoeffekt) bezeichnet. Seine Entdeckung war massgeblich mit daran beteiligt, dass man an der Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert die Physik neu denken musste. Erst 1905 gelang *Albert Einstein* schließlich eine fundierte Erklärung des Fotoeffekts. Für diese bekam er 1921 den Nobelpreis (und nicht für die Relativitätstheorie oder $E = m c^2$!).

Das Hallwachs Experiment

Zwei unoxidierte Metallflächen (z.B. Zinkplatten) werden in einer evakuierten Quarzröhre gegeneinander ausgerichtet. Über eine Batterie wird eine Spannung angelegt (A: Anode, C: Kathode). Ein hochsensibles Amperemeter (G) misst den elektrischen Strom, der durch den Schaltkreis fliesst. Siehe Abbildung unten.



Hallwachs und seine Mitarbeiter stellten folgendes fest:

- Wenn kein Licht auf die Metallplatten fällt, so fliesst kein Strom und das Amperemeter zeigt null an.
- Bestrahlt man die Kathode (C; negativ geladen) mit «geeignetem» Licht, so beginnt ein Strom zu fließen (genannt: «photoelektrischer Strom»). Je stärker die Intensität des Lichts (in Watt/m^2), desto stärker der gemessene elektrische Strom.
- Wird die Kathode mit «ungeeignetem» Licht bestrahlt, so fliesst kein Strom.
- Bestrahlt man die Anode (A; positiv geladen) mit Licht, so fliesst kein Strom.

Wir wissen bereits, dass elektrische Ladung von negativ geladenen Elektronen getragen wird. Eine plausible Erklärung des Versuchs ist, dass Elektronen auf der Kathode vom einfallenden Licht «herausgeschlagen» werden und sich dann zur Kathode bewegen. Auf diese Weise wird ein elektrischer Strom erzeugt, der vom Amperemeter gemessen wird. Bestrahlt man hingegen die Anode, so können keine Elektronen herausgeschlagen werden, da keine vorhanden sind.

Welches Licht ist «geeignete» oder «ungeeignet»?

Hallwachs stellte fest, dass der Photoeffekt erst ab einer gewissen Frequenz f des einfallenden Lichts auftritt. Bei monochromatischem Licht mit kleiner Frequenz (oder grosser Wellenlänge; d.h. im Infrarot-Bereich) wird *kein Strom* gemessen, auch bei intensiver Bestrahlung. Vergrössert man die Frequenz (Richtung Ultraviolett), so werden *ab einer Grenzfrequenz* f_{Grenz} Elektronen aus der Platte gelöst und erzeugen einen elektrischen Strom. Bei weiter steigender Frequenz wird auch der gemessene Strom immer grösser.

Der Photoeffekt tritt für Platten aus unterschiedlichen Metallen auf. Die Grenzfrequenz ist je nach Metall verschieden.

Frage 1: Zeichnen Sie (qualitativ) ein Diagramm, welches zeigt, wie im Experiment von Hallwachs der *gemessene Strom* von der *Intensität des einfallenden Lichts* abhängt. (Unterscheiden Sie die Fälle $f < f_{\text{Grenz}}$ und $f > f_{\text{Grenz}}$)

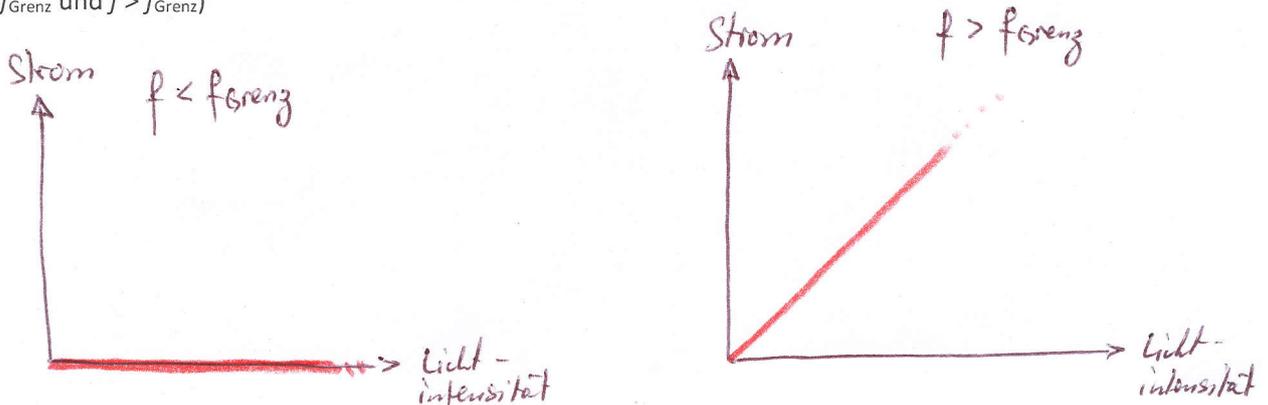
Frage 2: Im *klassischen Modell des Lichts* als elektromagnetische Welle ist die *Lichtintensität* (Leistung pro Fläche) proportional zur Amplitude der Welle ($|E|^2$), und die Lichtintensität ist unabhängig von deren Frequenz f . Wieso steht das Experiment von Hallwachs mit dem klassischen Modell des Lichts im Widerspruch? Mit welcher Hypothese zum Licht könnte man dieses Experiment erklären? Diskutieren Sie mit Ihrem Nachbarn.

Welches Licht ist «geeignete» oder «ungeeignet»?

Hallwachs stellte fest, dass der Photoeffekt erst ab einer gewissen Frequenz f des einfallenden Lichts auftritt. Bei monochromatischem Licht mit kleiner Frequenz (oder grosser Wellenlänge; d.h. im Infrarot-Bereich) wird *kein Strom* gemessen, auch bei intensiver Bestrahlung. Vergrössert man die Frequenz (Richtung Ultraviolett), so werden *ab einer Grenzfrequenz* f_{Grenz} Elektronen aus der Platte gelöst und erzeugen einen elektrischen Strom. Bei weiter steigender Frequenz wird auch der gemessene Strom immer grösser.

Der Photoeffekt tritt für Platten aus unterschiedlichen Metallen auf. Die Grenzfrequenz ist je nach Metall verschieden.

Frage 1: Zeichnen Sie (qualitativ) ein Diagramm, welches zeigt, wie im Experiment von Hallwachs der gemessene Strom von der Intensität des einfallenden Lichts abhängt. (Unterscheiden Sie die Fälle $f < f_{\text{Grenz}}$ und $f > f_{\text{Grenz}}$)



Frage 2: Im klassischen Modell des Lichts als elektromagnetische Welle ist die Lichtintensität (Leistung pro Fläche) proportional zur Amplitude der Welle ($|E|^2$), und die Lichtintensität ist unabhängig von deren Frequenz f . Wieso steht das Experiment von Hallwachs mit dem klassischen Modell des Lichts im Widerspruch? Mit welcher Hypothese zum Licht könnte man dieses Experiment erklären? Diskutieren Sie mit Ihrem Nachbarn.

- Im klassischen Modell sollte ein Strom unabhängig von der gewählten Lichtfrequenz fliessen. Allenfalls sollte es eine Grenzintensität geben, ab der ein Strom fliesst.
- Das Experiment zeigt, dass die Lichtintensität von der Frequenz abhängt (und nicht nur von der Amplitude). Es zeigt aber auch, dass Licht kein kontinuierliches Fliess von Energie (wie bei einer Welle) sein kann. Mit der Annahme, dass Licht aus Energiepaketen besteht, deren Energie proportional zur Lichtfrequenz ist, kann das Experiment erklärt werden. (Einsteinsche Photonenhypothese).

Simulation zum Photoeffekt

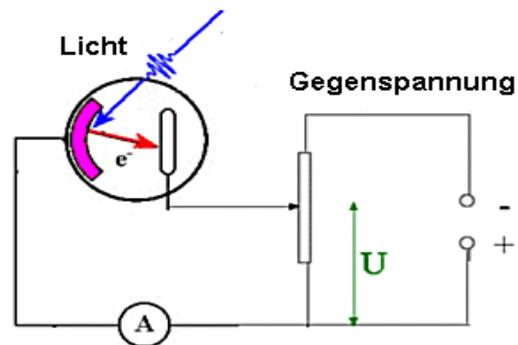
1. Einleitung

Im der letzten Lektion wurde das Experiment von Hallwachs besprochen. Wir haben festgestellt, dass sich die Beobachtungen von Hallwachs nicht mit dem klassischen Modell von Licht als elektromagnetische Welle erklären lassen. Als Erklärungsansatz haben wir die *Einstein'sche Photonenhypothese* kennengelernt. Diese werden Sie nun mit Hilfe einer Simulation des Experiments von Philipp Lenard, einer Weiterführung des Experiments von Hallwachs, vertiefen.

2. Das Experiment von Philipp Lenard

Der deutsche Physiker Philipp Lenard baute das Experiment von Hallwachs weiter aus und machte 1889 entscheidende Messungen zum Photoeffekt, für die er später den Nobelpreis bekam. Lenard konnte nicht nur für verschiedene Metalle die Grenzfrequenzen bestimmen, ab denen Elektronen aus der Platte herausgelöst werden. Darüber hinaus konnte er die *kinetische Energie* der herausgelösten Elektronen messen.

Der Versuchsaufbau ist in der untenstehenden Abbildung skizziert. Die herausgelösten Elektronen verlassen das Material (z.B. Kalium) und erreichen die gegenüberliegende Platte: Es fließt ein elektrischer Strom. Dieser Strom ist ein Mass für die Rate der herausgelösten Elektronen. Durch das Anlegen einer Gegenspannung U kann man die maximale kinetische Energie der herausgelösten Elektronen bestimmen, denn nur wenn die kinetische Energie $E_{\text{kin}} > eU$ ist, können die Elektronen das jetzt vorhandene Potential noch durchlaufen (schiefe Ebene hoch!). Bei jener Spannung, bei welcher der Strom gerade null wird, ist die maximale kinetische Energie der Elektronen genau so gross wie die potentielle Energie eU .



3. Auftrag

Öffnen Sie die Seite <https://phet.colorado.edu/de/simulation/photoelectric> und starten Sie die Simulation. Arbeiten Sie in Zweiergruppen.

Wählen Sie eine Natriumplatte, einfallendes Licht der Wellenlänge 400 nm und Intensität von 50%, sowie eine Spannung von 0 Volt. Ändern Sie danach die Parameter entsprechend den gestellten Aufgaben. Bei allen Fragestellungen überlegen Sie sich zuerst, was Sie aufgrund der Einstein'schen Photonenhypothese erwarten, bevor sie die «Messung» in der Simulation durchführen.

Frage 1: Wie hängt die Rate der herausgelösten Elektronen (d.h. der elektrische Strom) von der Intensität der Lichtquelle ab?

Erklären Sie die Beobachtung mit Hilfe der Einstein'schen Photonenhypothese. (Tipp: Was bedeutet eine erhöhte Lichtintensität hinsichtlich der Photonenrate, welche die Lampe emittiert?)

Was wäre klassisch erwartet worden?

Frage 2: Wie hängt die (maximale) kinetische Energie der Elektronen von der *Intensität des Lichts* ab?

Erklären Sie die Beobachtung mit Hilfe der Einstein'schen Photonenhypothese.

Was wäre klassisch erwartet worden?

Frage 3: Wie hängt die (maximale) kinetische Energie der herausgelösten Elektronen von der *Frequenz des Lichts* ab? Erstellen Sie einen qualitativen Graphen, der E_{kin} in Abhängigkeit der Frequenz angibt.

Erklären Sie die Beobachtung mit Hilfe der Einstein'schen Photonenhypothese.

Was wäre klassisch erwartet worden?

Frage 4: Was ändert sich in den untersuchten Fragestellungen, wenn Sie statt Natrium ein anderes Metall verwenden? Bestimmen Sie die Austrittsarbeit für Natrium, Zink und Kupfer.

Zusatzfrage A: Wie hängt die Rate der herausgelösten Elektronen – bei konstanter Intensität – von der Wellenlänge ab? Skizzieren Sie den Verlauf des Stroms für zunehmende Wellenlängen, beginnend ab 100 nm.

Erklären Sie den Verlauf mit Hilfe der Einstein'schen Photonenhypothese.

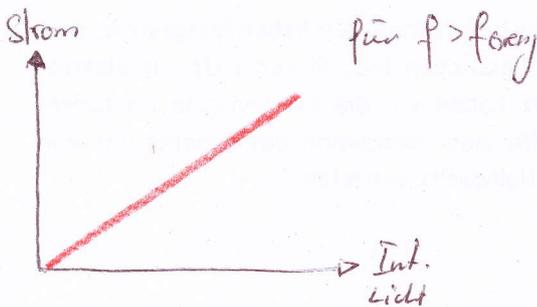
Vorüberlegung: Was bedeutet eine zunehmende Wellenlänge bei konstanter Lichtintensität für die ausgesandte Photonenrate der Lampe. (Tipp: Unter «Optionen» können Sie die Photonen einblenden)

Zusatzfrage B: Wählen Sie im Menu des Programms unter «Optionen» die Alternative «Photonenzahl statt Intensität ändern» aus.

Wie hängt die Rate und die (maximale) kinetische Energie der herausgelösten Elektronen von der Photonenrate des Lichts ab?

Frage 1: Wie hängt die Rate der herausgelösten Elektronen (d.h. der elektrische Strom) von der Intensität der Lichtquelle ab?

Erklären Sie die Beobachtung mit Hilfe der Einstein'schen Photonenhypothese. (Tipp: Was bedeutet eine erhöhte Lichtintensität hinsichtlich der Photonenrate, welche die Lampe emittiert?)



$$Int = \frac{\Delta n}{\Delta t} \cdot h \cdot f \quad ; \quad \frac{\Delta n}{\Delta t} : \text{Photonenrate}$$

$$Strom = \frac{\Delta n}{\Delta t} \cdot e \quad (\text{falls } f > f_{sreg})$$

$$\Rightarrow \text{Strom} \propto Int. \quad (\text{falls } f > f_{sreg})$$

Was wäre klassisch erwartet worden?

Ab einer kleinen Lichtintensität würde kein Strom mehr fließen, da keine Elektronen mehr herausgeschlagen werden können.

Frage 2: Wie hängt die (maximale) kinetische Energie der Elektronen von der Intensität des Lichts ab?

Die kinetische Energie der austretenden Elektronen ist unabhängig von der Intensität des Lichts.

Erklären Sie die Beobachtung mit Hilfe der Einstein'schen Photonenhypothese.

Die Energie der Photonen, welche nicht für die Austrittsarbeit aufgewendet wird, geht in die kinetische Energie der Elektronen. Bei konstanter Frequenz ($E_{ph} = hf = \text{konst}$) ändert sich mit der Lichtintensität nur die Anzahl einfallender Photonen resp. die Anzahl herausgeschlagener Elektronen. Deren Energie bleibt aber gleich.

Was wäre klassisch erwartet worden?

Klassisch würde man erwarten, dass eine Erhöhung der Lichtintensität eine Erhöhung der kinetischen Energie der herausgeschlagenen Elektronen mit sich bringt.

Frage 3: Wie hängt die (maximale) kinetische Energie der herausgelösten Elektronen von der Frequenz des Lichts ab? Erstellen Sie einen qualitativen Graphen, der E_{kin} in Abhängigkeit der Frequenz angibt.



Erklären Sie die Beobachtung mit Hilfe der Einstein'schen Photonenhypothese.

Jedes Photon mit Frequenz $f > f_{\text{Grenz}}$ kann ein Elektron heraus schlagen. Die Photonenenergie über der Austrittsarbeit geht in die kinetische Energie des Elektrons über, d.h.

$$E_{\text{kin}} = h(f - f_{\text{Grenz}}) \quad \text{wenn } f > f_{\text{Grenz}}.$$

Was wäre klassisch erwartet worden?

Die kinetische Energie der Elektronen wäre unabhängig von der Frequenz des Lichts, da in der klassischen Elektrodynamik die Lichtintensität nur von der Amplitude ($|E|^2$) abhängt, aber nicht von der Frequenz.

Frage 4: Was ändert sich in den untersuchten Fragestellungen, wenn Sie statt Natrium ein anderes Metall verwenden? Bestimmen Sie die Austrittsarbeit für Natrium, Zink und Kupfer.

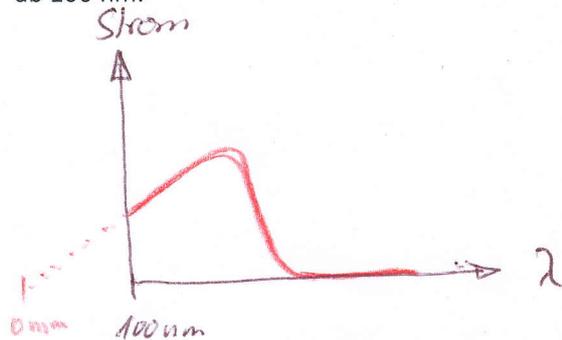
Die Grenzfrequenz resp. die Austrittsarbeit ändert sich bei anderen Metallen.

Für Natrium: $W_{\text{Aus}} \approx 2.3 \text{ eV}$, $f_{\text{Grenz}} \approx 0.6 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$

Zink (Zn): $W_{\text{Aus}} \approx 4.3 \text{ eV}$, $f_{\text{Grenz}} \approx 10^{15} \text{ Hz}$.

Kupfer: $W_{\text{Aus}} \approx 4.4 \text{ eV}$, $f_{\text{Grenz}} \approx 1.1 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$.

Zusatzfrage A: Wie hängt die Rate der herausgelösten Elektronen – bei konstanter Intensität – von der Wellenlänge ab? Skizzieren Sie den Verlauf des Stroms für zunehmende Wellenlängen, beginnend ab 100 nm.



Erklären Sie den Verlauf mit Hilfe der Einstein'schen Photonenhypothese.

Vorüberlegung: Was bedeutet eine zunehmende Wellenlänge bei konstanter Lichtintensität für die ausgesandte Photonenrate der Lampe. (Tipp: Unter «Optionen» können Sie die Photonen einblenden)

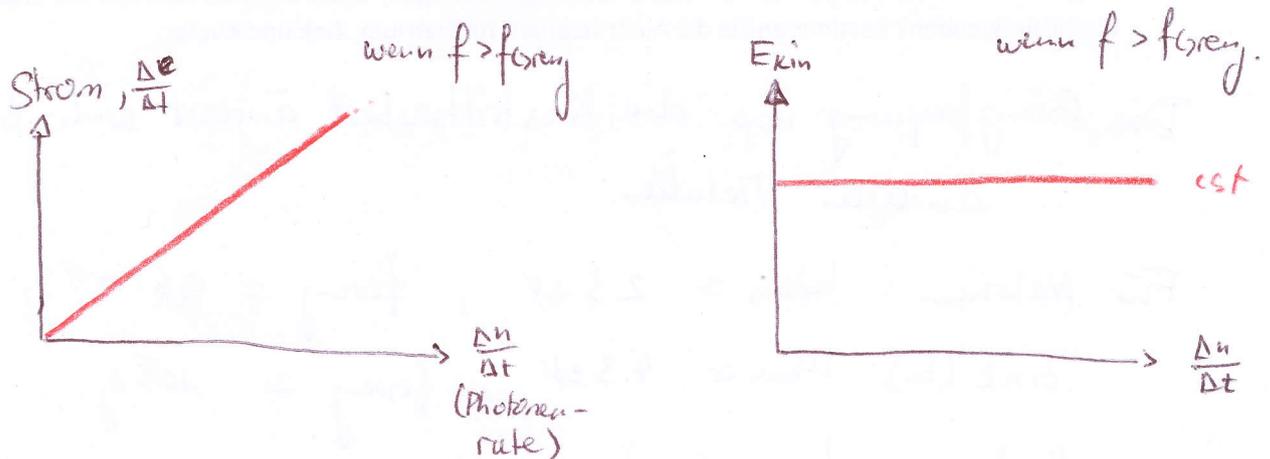
$$\text{Int} \sim \frac{\Delta n}{\Delta t} \cdot hf = \frac{\Delta n}{\Delta t} \frac{hc}{\lambda} = \text{const} \Rightarrow \lambda \propto \frac{\Delta n}{\Delta t} \quad (\text{Photonenrate})$$

$$\text{Strom} \sim \frac{\Delta n}{\Delta t} \cdot e \Rightarrow \text{Strom} \propto \lambda \quad \text{so lange } \frac{c}{\lambda} < f_{\text{Grenz}}$$

Dies erklärt den Verlauf oben.

Zusatzfrage B: Wählen Sie im Menu des Programms unter «Optionen» die Alternative «Photonenzahl statt Intensität ändern» aus.

Wie hängt die Rate und die (maximale) kinetische Energie der herausgelösten Elektronen von der Photonenrate des Lichts ab?



Die Materiewelle von de Broglie

Einstein'sche Photonenhypothese

Einstein stellte 1905 die Photonenhypothese auf. Diese Hypothese postuliert die Existenz des masselosen Teilchens «Photon» mit der Energie

$$E_{\text{photon}} = h f.$$

Die Naturkonstante

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J s} = 4.136 \cdot 10^{-15} \text{ eV s}$$

ist das *Planck'sche Wirkungsquantum* oder einfach die *Planck Konstante*. Licht (oder elektromagnetische Strahlung) der Frequenz f besteht aus Photonen, welche die Energie $E_{\text{photon}} = h f$ tragen. Mit seiner Hypothese konnte Einstein den photoelektrischen Effekt erklären. In der Folge wurden weitere Teilcheneigenschaften des Lichts festgestellt. 1923 konnte Arthur H. Compton zeigen, dass das Photon auch einen *Impuls* besitzt, mit dem Wert

$$p_{\text{photon}} = \frac{h}{\lambda}.$$

Die Arbeit von Compton überzeugte viele Physiker davon, dass Licht tatsächlich aus Teilchen besteht. Compton erhielt für seine Entdeckung 1927 den Nobelpreis. Trotzdem gab es viele Kritiker, welche weiterhin an der Teilchennatur des Lichtes zweifelten. Grund war, dass Licht gleichzeitig auch die Eigenschaften einer Welle zeigte: Beugung und Interferenz. Wie konnte Licht aus Teilchen bestehen und gleichzeitig solche Welleneigenschaften zeigen? Dieses erstaunliche Phänomen wurde die «Teilchen-Wellen Dualität des Lichts» genannt.

De-Broglie-Relation

Noch bevor die Physiker die eigenartige Doppelnatur des Lichts tiefer verstanden hatten, stellte der französische Physiker Louis Victor de Broglie (Bild) im Jahr 1924 in seiner Doktorarbeit eine kühne Hypothese auf:

Ebenso wie das wellenartige Licht sich unter bestimmten Bedingungen wie ein Strom von Teilchen verhält, sollen umgekehrt auch Elektronen und alle teilchenartigen Objekte unter bestimmten Umständen sich wellenartig bemerkbar machen.



Louis de Broglie, 1892 - 1987

Wenn alle Teilchen Welleneigenschaften aufweisen, dann müsste man ihnen auch eine Wellenlänge zuordnen können. De Broglie hatte also die Kühnheit zu behaupten, die oben für das Licht gegebene Beziehung zwischen Impuls und Wellenlänge gelte auch für Teilchen:

$$\text{Wellenlänge von Teilchen} \quad p = \frac{h}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{h}{p}$$

Hier ist $p = m v$ der klassische Impuls des Teilchens mit Masse m und Geschwindigkeit v . Diese Wellenlänge wird als *De-Broglie-Wellenlänge* bezeichnet. Beachten Sie folgendes: de Broglie hatte es gewagt, dieses Ergebnis seiner theoretischen Arbeit in seiner Dissertation zu publizieren, ohne den geringsten experimentellen Hinweis auf Wellenphänomene zu haben. Deshalb wusste der Prüfungsausschuss in Paris zunächst nicht, was er damit anfangen sollte. Zur Stellungnahme wurde auch Einstein angegangen. Dessen positive Reaktion verhalf dann schliesslich de Broglie zu seinem Dokortitel. Dass dies zu Recht geschehen war, zeigte sich bereits 1927, als die postulierte Wellennatur von Elektronen im Experiment durch C. J. Davisson und L. H. Germer nachgewiesen werden konnte.

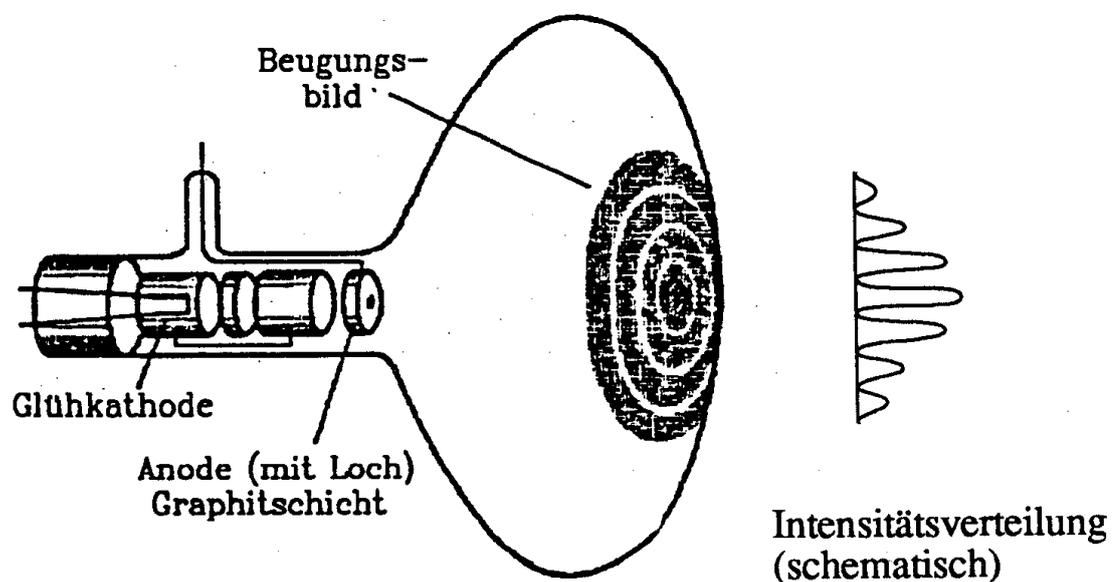
Aufgabe 1: Berechnen Sie die De-Broglie-Wellenlänge eines Elektrons, welches sich mit 10% der Lichtgeschwindigkeit fortbewegt.

Aufgabe 2: Berechnen Sie die De-Broglie-Wellenlänge eines rennenden Menschen (75 kg, 10 km/h).

Wellenerscheinung bei Elektronenbeugung

In folgendem Versuch werden wir die Wellennatur des Elektrons direkt beobachten können. Der Versuch wird mit einer sog. Braun'schen Röhre durchgeführt: Aus einer heissen Kathode treten Elektronen in die vakuumierte Röhre aus und werden durch eine Beschleunigungsspannung zur Anode hin beschleunigt. Die Anode hat ein Loch, so dass der Elektronenstrahl ungehindert durchtreten kann. Der Elektronenstrahl passiert dann eine dünne Schicht von polykristallinem (aus vielen winzigen Kriställchen aufgebautem) Graphit. Schlussendlich treffen die Elektronen auf eine die fluoreszente Beschichtung der Röhre auf und erzeugen dort Photonen. Mit unseren Augen sehen wir dann auf der Röhre die Stellen, an denen Elektronen auftreffen.

Wäre der Elektronenstrahl nichts weiter als ein Teilchenstrahl, so würde nach unserer Vorstellung ein Teil der Elektronen vom Graphit eingefangen, der Rest mehr oder weniger stark weggelenkt. (Stellen Sie sich etwa ein Sieb vor, auf welches ein Strahl von Zuckerkörnern fällt!) Man würde einen vergrösserten Leuchtflecken erwarten, möglicherweise mit einem diffusen Schattenbild des Graphits. Tatsächlich werden Sie aber etwas anderes sehen: Ein heller Flecken in der Mitte ist von konzentrischen, hellen Kreisringen umgeben. Dazwischen liegen dunkle Ringe. Zudem werden Sie feststellen können, dass die Radien dieser Ringe mit der Geschwindigkeit der Elektronen zusammenhängen: Je grösser die Spannung zwischen Kathode und Anode gewählt wird, je schneller also die Elektronen sind, desto kleiner sind diese Radien.



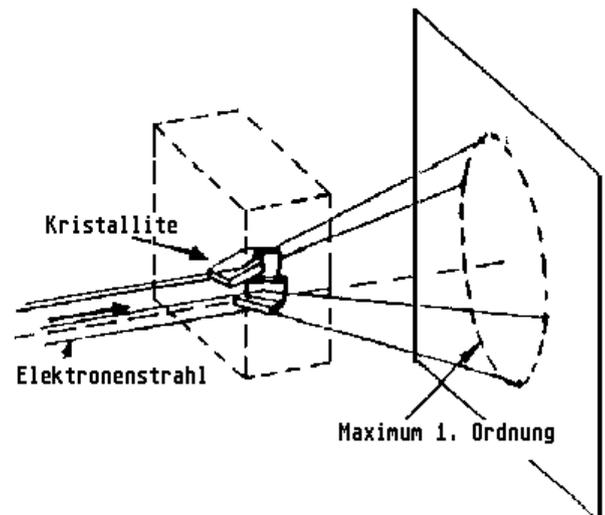
Diese Ringe, besonders die dunklen, können zwanglos nicht anders erklärt werden als durch die Annahme, dass Elektronenstrahlen *Interferenzeffekte* zeigen, wie sie für Wellenobjekte typisch sind: Dort, wo es dunkel ist, treffen "Elektronenwellenberge" und "Elektronenwellentäler" gleichzeitig zusammen und löschen sich aus!

Experiment:

1) Wir stellen eine bestimmte Beschleunigungsspannung an der Röhre ein (U). Diese Spannung entspricht einer bestimmten Geschwindigkeit der Elektronen und damit einer bestimmten De-Broglie-Wellenlänge, λ_{theor} . Diese Wellenlänge berechnen wir aus der Beschleunigungsspannung.

2) Wir messen den Radius der Beugungsringe auf dem Leuchtschirm. Aus diesem Radius und bekannten Daten über die Geometrie der Röhre und der Graphitkristalle bestimmen wir die tatsächlich beobachtbare Wellenlänge, λ_{beob} .

Es sollte sich zeigen, dass der theoretische und der beobachtete Wert gleich gross sind.

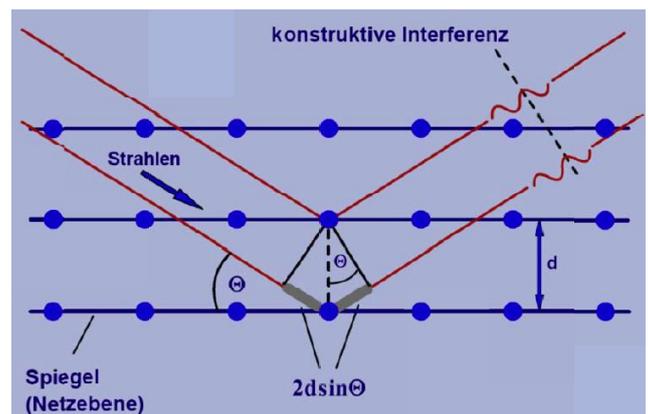


Grundlagen:

Interferenz am Kristallgitter:

Eine von links oben einfallende Welle wird an den einzelnen Gitterebenen des Kristalls wie an einem Spiegel reflektiert. Die Wellen, die an benachbarten Gitterebenen gespiegelt werden, zeigen dann *konstruktive Interferenz*, wenn sie einen *Gangunterschied von λ* (oder einem Vielfachen davon) haben.

Es gilt dann also: $\lambda = 2d \sin \alpha$

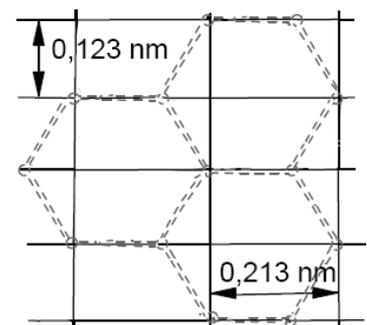


Graphitgitterstruktur:

Das Graphitgitter hat zwei Gitterabstände, die in unserem Experiment eine konstruktive Interferenz erlauben:

$$d_1 = 0.123 \text{ nm (1 nm = 1 Nanometer = } 10^{-9} \text{ m)}$$

$$d_2 = 0.213 \text{ nm}$$



Beim kleinen Gitterabstand tritt die Interferenz bei einem grösseren Winkel auf (und umgekehrt).

Entstehung der Ringe:

Die Graphitfolie besteht aus sehr vielen einzelnen Kristalliten, die völlig ungeordnet sind. Ein Teil dieser Kristallite liegt dann gerade so, dass die Interferenz-bedingung erfüllt ist. Dies gilt natürlich für jede mögliche Strahl-Ebene durch die Symmetrieachse der Röhre, deshalb entstehen auf dem Leuchtschirm nicht Punkte, sondern Ringe.

Berechnung der Wellenlänge aus dem Ringradius:

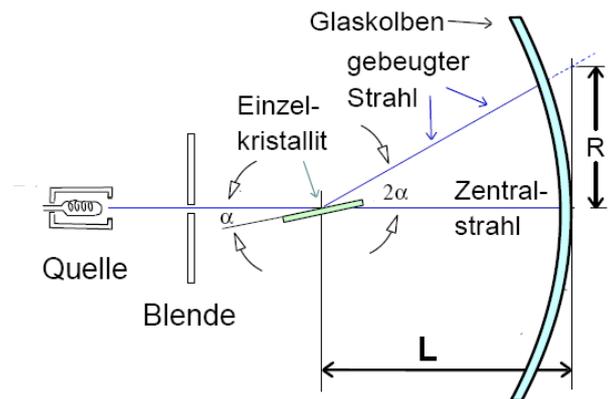
Gemessen wird der Radius R_1 bzw. R_2 (entsprechend den beiden Gitterabständen).

Zusätzlich benötigen wir folgende Angaben:

Abstand Graphitfolie – Schirm: $L = 0.135 \text{ m}$

Dann gilt natürlich: $\tan(2\alpha) = R/L$

Mit der Interferenzbedingung (vgl. oben) erhalten Sie dann die Wellenlänge.



Berechnung der Wellenlänge nach de Broglie:

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

Der Impuls eines Elektrons ($p = mv$) hängt mit der Beschleunigungsspannung U zusammen: Nachdem das Elektron eine Spannung U durchlaufen hat, ist seine kinetische Energie gegeben durch

$$\frac{1}{2} mv^2 = eU .$$

Also ist $p = \sqrt{2meU}$

Zusätzlich benötigen wir:

Elektronenmasse: $m = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Elektronenladung: $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Planck Konstante: $h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$



Louis de Broglie, 1892 - 1987

Wenn alle Teilchen Welleneigenschaften aufweisen, dann müsste man ihnen auch eine Wellenlänge zuordnen können. De Broglie hatte also die Kühnheit zu behaupten, die oben für das Licht gegebene Beziehung zwischen Impuls und Wellenlänge gelte auch für Teilchen:

$$\text{Wellenlänge von Teilchen} \quad p = \frac{h}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{h}{p}$$

Hier ist $p = m v$ der klassische Impuls des Teilchens mit Masse m und Geschwindigkeit v . Diese Wellenlänge wird als *De-Broglie-Wellenlänge* bezeichnet. Beachten Sie folgendes: de Broglie hatte es gewagt, dieses Ergebnis seiner theoretischen Arbeit in seiner Dissertation zu publizieren, ohne den geringsten experimentellen Hinweis auf Wellenphänomene zu haben. Deshalb wusste der Prüfungsausschuss in Paris zunächst nicht, was er damit anfangen sollte. Zur Stellungnahme wurde auch Einstein angegangen. Dessen positive Reaktion verhalf dann schliesslich de Broglie zu seinem Dokortitel. Dass dies zu Recht geschehen war, zeigte sich bereits 1927, als die postulierte Wellennatur von Elektronen im Experiment durch C. J. Davisson und L. H. Germer nachgewiesen werden konnte.

Aufgabe 1: Berechnen Sie die De-Broglie-Wellenlänge eines Elektrons, welches sich mit 10% der Lichtgeschwindigkeit fortbewegt.

$$\lambda = \frac{h}{m_e v} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ Kg} \cdot 0,1 \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \underline{\underline{2,4 \cdot 10^{-11} \text{ m}}}$$

Aufgabe 2: Berechnen Sie die De-Broglie-Wellenlänge eines rennenden Menschen (75 kg, 10 km/h).

$$\lambda = \frac{h}{m v} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{75 \text{ kg} \cdot \frac{10}{3,6} \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \underline{\underline{3,2 \cdot 10^{-36} \text{ m}}}$$

(< Planck-Länge !)

Messung an der Elektronenbeugungsröhre – die De-Broglie Relation

(a) Bragg-Bedingung ($n = 1$): $\lambda_{\text{beob}} = \frac{R}{L} d$

Netzabstände Graphit: $d_1 = 213 \text{ pm}$, $d_2 = 123 \text{ pm}$

R : Radius vom Beugungsring (zwei kleinsten Ringe; $R_1 < R_2$)

$L = 135 \text{ mm}$: Abstand Probe – Leuchtschirm

(b) De-Broglie Relation: $\lambda_{\text{theor}} = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2meU}}$

Für Elektronen: $\frac{h}{\sqrt{2me}} = 38.8 \text{ (kV)}^{1/2} \text{ pm}$

U : Beschleunigungsspannung

Messungen:

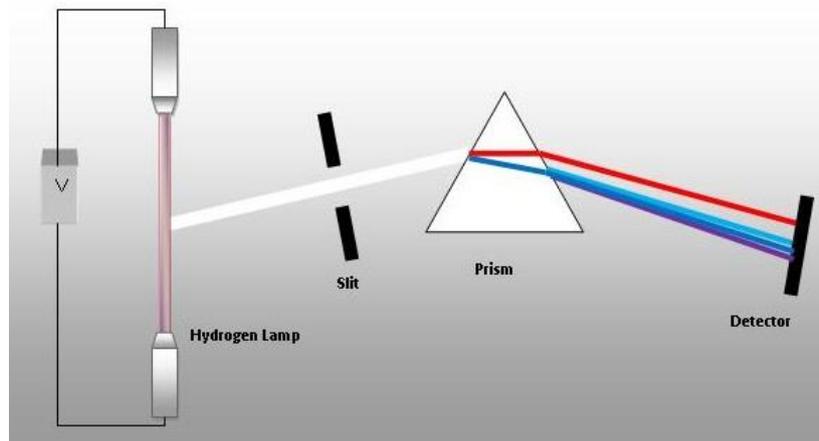
Grösse	Einheit	Messung 1	Messung 2	Messung 3
U	[kV]			
R_1	[mm]			
R_2	[mm]			
		λ^1	λ^2	λ^3
$\frac{R_1 d_1}{L}$	[pm]			
$\frac{R_2 d_2}{L}$	[pm]			
$\frac{h}{\sqrt{2meU}}$	[pm]			

Messen resp. berechnen Sie die beobachtete Wellenlänge λ_{beob} und die theoretische (De Broglie) Wellenlänge λ_{theor} für Ihre Versuchsspannung U !

Das Emissionsspektrum von Atomen

Spektroskopie

Wie wir bereits besprochen haben besteht Licht aus Photonen, die unterschiedliche Frequenzen f resp. Wellenlängen λ haben können ($f = c/\lambda$). Mit Hilfe eines *Prismenspektroskops* lässt sich Licht sehr einfach in seine Frequenzkomponenten zerlegen. Im Bild sehen Sie schematisch, wie ein solches Spektroskop aufgebaut ist.



Auftrag

Beobachten Sie verschiedene Lichtquellen durch das Hand-Spektroskop. Was stellen Sie fest?

Wie könnte man die beobachteten Spektren erklären?

Tip: Beim Photoeffekt haben wir gesehen, dass in Metallen gebundene Elektronen durch einfallende Photonen herausgelöst werden können («herausgeschlagen»). Dabei absorbiert das Elektron die Energie des Photons ($E = h f$) und überwindet damit ihre Bindungsenergie im Metall (Austrittsarbeit W_A). Bei der beobachteten *Emission* von Photonen läuft ein *umgekehrter* Prozess ab: Energiereiche (gebundene) Elektronen im Atom verlieren einen Teil ihrer Energie und emittieren dabei Licht. Wie müssten die Energiezustände der gebundenen Elektronen im Atom aussehen, um das beobachtete Spektrum zu erklären?

Das Atommodell von Bohr

Anfang 20. Jahrhunderts stand die Physik vor einem Rätsel was den Aufbau des Atoms betrifft. Es war bekannt, dass Atome aus einem kleinen und dichten, positiv geladenen Kern bestehen (Protonen und Neutronen). Darum herum befinden sich negativ geladene Elektronen, welche durch die Coulombkraft

$$F_c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

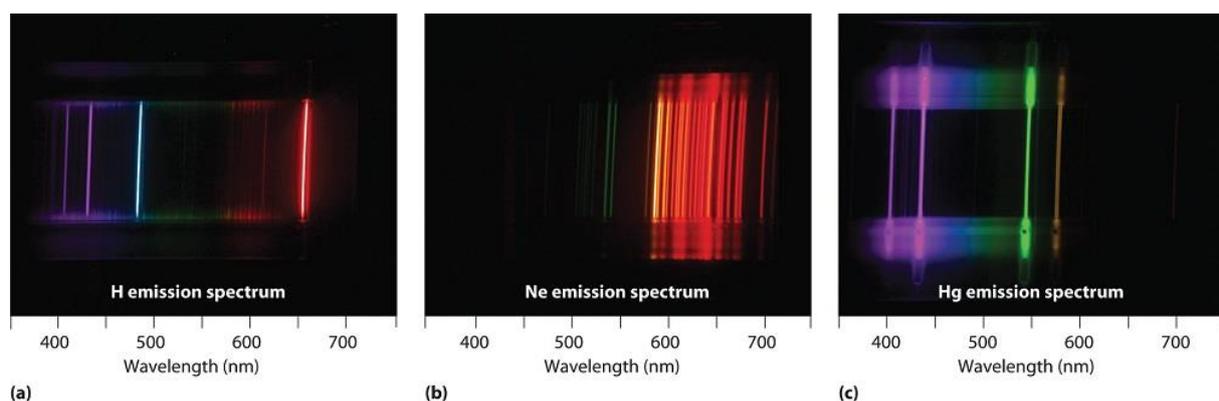
an den Kern gebunden sind. Man stellte sich das Atom ähnlich wie ein Sonnensystem vor, mit dem zentralen Atomkern und Elektronen als Planeten. Auch andere Modelle des Atoms existierten. Kein Modell konnte aber alle Beobachtungen überzeugend erklären. Wichtige Kritikpunkte am Planetenmodell waren:

Stabilität der Atome

Im Planetenmodell werden die Elektronen ständig gegen das Zentrum hin beschleunigt. Gemäss der Elektrodynamik emittieren beschleunigte Elektronen aber Licht (Photonen) und verlieren so an Energie. Durch diesen Energieverlust erreichen die Elektronen immer kleinere Kreisbahnen und fallen schliesslich auf den Atomkern. Dieser Prozess würde blitzschnell ablaufen: Die Lebensdauer eines Planeten-Atoms beträgt nur rund 10^{-8} Sekunden!

Emissionsspektra

Bereits 1862 entdeckte der schwedische Physiker Anders Ångström sonderbare Linien im Emissionsspektrum von Wasserstoff, ähnlich wie Sie mit dem Hand-Spektroskop beobachten können. Die Linien liegen im sichtbaren Bereich des Lichts und wurden zu Ehren des Schweizer Mathematikers Johann Jakob Balmer benannt (die sog. Balmer Serie). Später beschrieb Johannes Rydberg weitere Linien, welche ausserhalb des sichtbaren Spektrums lagen. Rydberg und Balmer stellten fest, dass die Linien im Emissionsspektrum von Wasserstoff eleganten mathematischen Regeln folgten. Ähnliche Linienspektren wurden für viele andere Elemente auch festgestellt.



(a) Emissionsspektrum von Wasserstoff; (b) Neon; (c) Spektrum einer Quecksilberlampe.

Anfang 20. Jahrhundert konnte kein bekanntes Atommodell die beobachteten Linienspektren erklären. Das Planetenmodell zum Beispiel würde ein stetiges Spektrum (ohne Linien) über alle Farben vorhersagen (dazu kommt, dass es instabil ist).

Im Jahr 1913 postulierte der junge dänische Physiker *Niels Bohr*, dass sich die Elektronen nur auf kreisförmigen Bahnen mit gewissen diskreten Radien um den Atomkern bewegen dürfen. Bei Emission von einem Photon springt das Elektron von einem grösseren Bahnradius mit Energie E_2 auf einen kleineren Bahnradius der Energie E_1 . Dabei verliert das Elektron diese Energiedifferenz an das ausgesendete Photon der Frequenz f :

$$E_2 - E_1 = h f.$$

Die zugelassenen Energien der Elektronen (E_n , $n=1, 2, 3, \dots$) werden *Energieniveaus* genannt. So konnte Bohr die beobachteten Linienspektren erklären. Für seine Arbeit erhielt er 1922 den Nobelpreis.

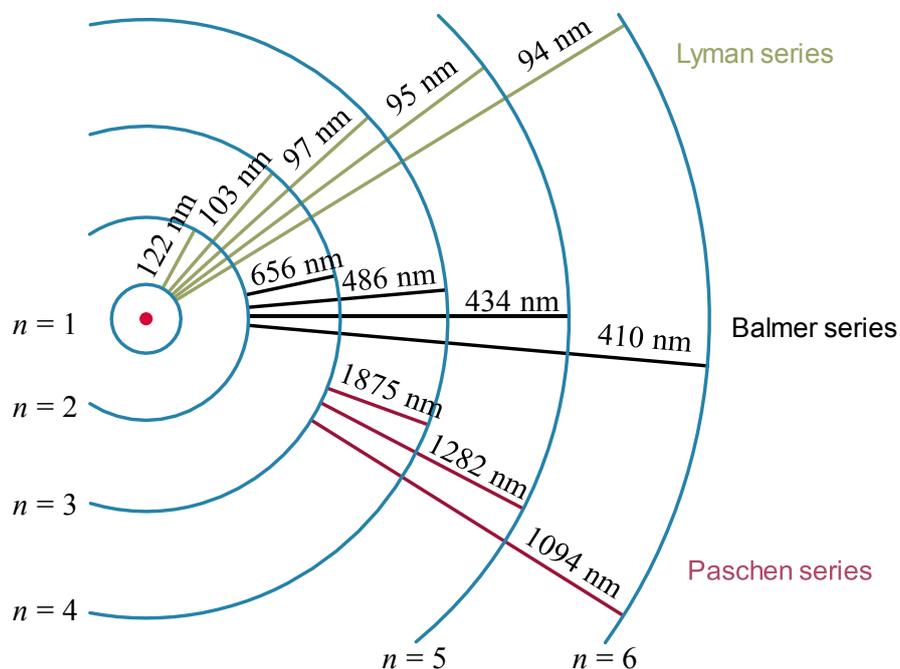


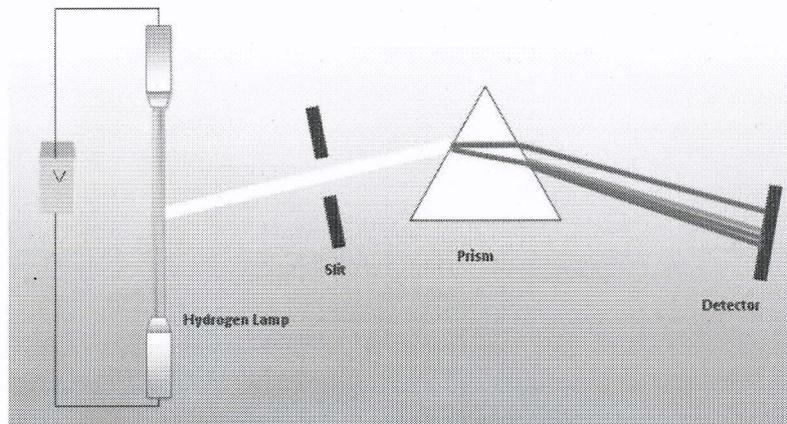
Abb. 1: Die ersten 6 zugelassenen Bahnradien von Elektronen im Bohrschen Atommodell. Bei Übergängen zwischen den verschiedenen Bahnen resp. Energieniveaus werden Photonen einer bestimmten Wellenlänge emittiert oder absorbiert.

Der Grund für die Quantisierung der Bahnradien und ihre Stabilität waren im Bohrschen Atommodell von 1913 aber noch unklar. Erst später realisierte man, dass diese durch den von Louis De Broglie postulierten Wellencharakter des Elektrons erklärt werden konnten. Im nächsten Arbeitsblatt werden Sie die Quantisierung herleiten und damit die Linienspektren berechnen.

Das Emissionsspektrum von Atomen

Spektroskopie

Wie wir bereits besprochen haben besteht Licht aus Photonen, die unterschiedliche Frequenzen f resp. Wellenlängen λ haben können ($f = c/\lambda$). Mit Hilfe eines *Prismenspektroskops* lässt sich Licht sehr einfach in seine Frequenzkomponenten zerlegen. Im Bild sehen Sie schematisch, wie ein solches Spektroskop aufgebaut ist.



Auftrag

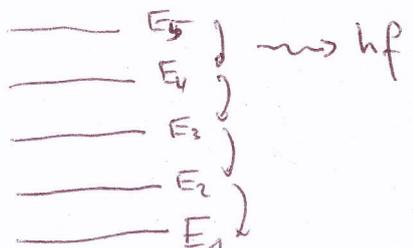
Beobachten Sie verschiedene Lichtquellen durch das Hand-Spektroskop. Was stellen Sie fest?

Man sieht Linien im Spektrum.
Unterschiedliche Lichtquellen zeigen andere Linien.

Wie könnte man die beobachteten Spektren erklären?

Tip: Beim Photoeffekt haben wir gesehen, dass in Metallen gebundene Elektronen durch einfallende Photonen herausgelöst werden können («herausgeschlagen»). Dabei absorbiert das Elektron die Energie des Photons ($E = hf$) und überwindet damit ihre Bindungsenergie im Metall (Austrittsarbeit W_A). Bei der beobachteten *Emission* von Photonen läuft ein *umgekehrter* Prozess ab: Energiereiche (gebundene) Elektronen im Atom verlieren einen Teil ihrer Energie und emittieren dabei Licht. Wie müssten die Energiezustände der gebundenen Elektronen im Atom aussehen, um das beobachtete Spektrum zu erklären?

Die Energiezustände der Elektronen im Atom müssen diskret sein, d.h. nicht ^{alle} Zustände sind möglich:



Quantisierung der Bahnradien und Energien im Bohrschen Atommodell

Ziel: In diesem Arbeitsblatt sollen Sie die zulässigen Bahnradien und Energieniveaus im Bohrschen Atommodell für das Wasserstoffatom mit Hilfe der Hypothese von de Broglie herleiten. Damit können dann die Linien im Emissionsspektrum von Wasserstoff berechnet werden.

(a) Nehmen wir an, das Elektron bewege sich auf einer Kreisbahn mit Radius r um den Atomkern (Proton). De Broglie postulierte, dass das Elektron Wellencharakter hat. Die zugehörige Wellenlänge ist die De-Broglie-Wellenlänge λ . Damit sich die Elektronenwelle nicht selber auslöscht, müssen Wellenberge nach jeder Umrückung wieder genau auf einen Wellenberg fallen. Das heisst, der Umfang der Bahn muss ein ganzzahliges Vielfaches n der De-Broglie-Wellenlänge sein (siehe Abb. 1). Schreiben Sie diese Bedingung als Gleichung.

Das ganzzahlige n in dieser Gleichung ist bereits die Quantisierungsbedingung der zugelassenen Bahnradien! Jetzt müssen wir nur noch den Impuls $p = mv$ des Elektrons für die De-Broglie-Wellenlänge berechnen. Der Impuls kann nicht beliebige Werte annehmen: Damit das Elektron auf seiner Kreisbahn bleibt, muss die radiale Beschleunigung gerade die Coulombkraft $F = e^2/(4\pi\epsilon_0 r^2)$ kompensieren.

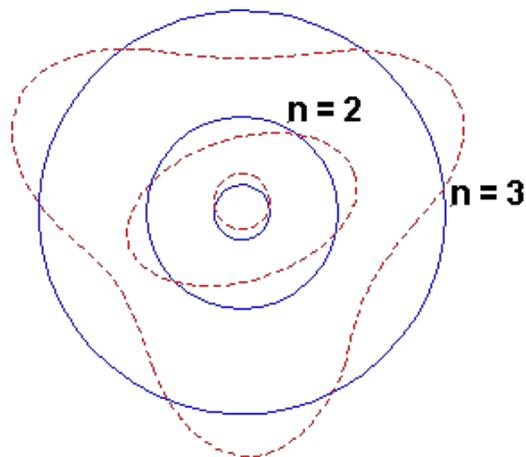


Abb. 1: Im Bohrschen Modell dürfen Elektronen nur Bahnen besetzen, deren Längen ganzzahlige Vielfache der De-Broglie-Wellenlänge der Elektronenwelle sind.

(b) Schreiben Sie die Newtongleichung ($F = ma$) für das Elektron in radialer Richtung und lösen Sie nach p^2 auf. (Für Kreisbewegungen gilt $a = v^2/r$, wobei a die radiale Beschleunigung und v die tangentielle Geschwindigkeit ist.)

(c) Setzen Sie die Quantisierungsbedingung (a) ins Quadrat und eliminieren Sie p^2 mit Hilfe der Newtongleichung (b). Lösen Sie die Gleichung nach r auf.

So erhalten wir die erlaubten Bahnradien im Bohrschen Atommodell:

$$r_n = \frac{h^2 \varepsilon_0}{\pi m e^2} n^2 .$$

Die Kreisbahnen $n = 1, 2, \dots$ werden in der Quantenmechanik «Orbitale» genannt, da es sich tatsächlich nicht um Bahnen im klassischen Sinn (wie bei Planeten) handelt.

Berechnen Sie den numerischen Wert vom Bohr Radius r_1 (d.h. den kleinsten Orbitalradius)

$$r_1 = \frac{h^2 \varepsilon_0}{\pi m e^2} =$$

(d) Als nächstes finden Sie die Energie E_n des Elektrons im Orbital n . Diese ist gegeben durch die Gesamtenergie des Elektrons (kinetisch + potentiell):

$$E_n = \frac{mv^2}{2} + E_{\text{pot}} .$$

Um die kinetische Energie zu erhalten, verwenden Sie die Newtongleichung (b). Die potentielle Energie ist das elektrostatische Potential

$$E_{\text{pot}} = -\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0} \frac{1}{r}$$

für den Bahnradius $r = r_n$ aus (c).

$$E_n =$$

So erhalten wir die Energieniveaus im Bohrschen Atommodell:

$$E_n = -\frac{e^4 m}{8h^2 \varepsilon_0^2} \frac{1}{n^2} .$$

Die Energie des tiefsten Niveaus ($n = 1$; Grundzustand) ist

$$E_1 = -\frac{e^4 m}{8h^2 \varepsilon_0^2} \simeq -13.6 \text{ eV}.$$

$|E_1| \simeq 13.6 \text{ eV}$ ist die *Ionisationsenergie*, da durch Zuführen dieser Energie dem Atom ein Elektron entrissen werden kann.

Bemerkung: In unserer Herleitung der Bohrschen Quantisierungsbedingungen haben wir das klassische Bahnenmodell der Atome mit dem Wellencharakter des Elektrons kombiniert. Einen solchen Zugang zur Quantenphysik nennt man *halb-klassisch*. Es stellt eine gute Näherung an später im 20. Jahrhundert entwickelte, genauere Formulierungen dar, welche wir hier aber nicht besprechen (sog. Schrödinger Gleichung oder die Matrix Mechanik von Heisenberg).

Emissionsspektren

Die Quantisierungsbedingungen für die Orbitalradien und Energien der Elektronen, welche Sie in (c) und (d) hergeleitet haben, erklären nun einerseits die *Stabilität des Atoms*: Ein Elektron kann höchstens auf den Grundzustand mit Energie E_1 und Radius r_1 herunterfallen. Die Wellennatur des Elektrons verhindert, dass es auf den Atomkern fällt. Andererseits können wir jetzt die Linien im Emissionsspektrum verstehen: Wenn ein Elektron aus einem Energiezustand E_n auf einen tieferen Zustand E_k ($k < n$) fällt, so wird dabei ein Photon ausgesendet. Die Frequenz f des Photons berechnen wir mit Hilfe der Energieerhaltung. Es gilt

$$hf = E_n - E_k = |E_1| \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

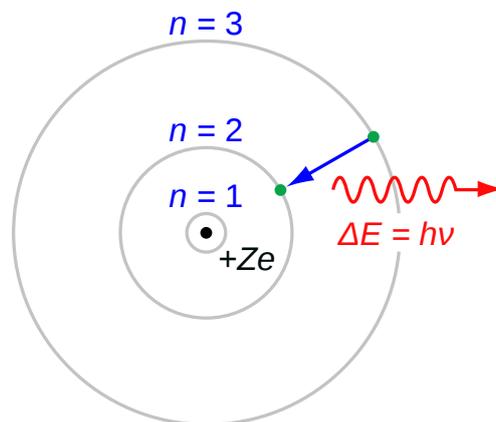


Abb. 2: Energieniveaus und Orbitalradien im Atom. Fällt ein Elektron von einem höheren auf ein tieferes Niveau, so wird ein Photon der Frequenz ν emittiert.

Aufgabe. Berechnen Sie die Linien (Wellenlängen) der Balmer Serie ($k = 2$) für $n = 3, 4, 5$.

Quantisierung der Bahnradien und Energien im Bohrschen Atommodell

Ziel: In diesem Arbeitsblatt sollen Sie die zulässigen Bahnradien und Energieniveaus im Bohrschen Atommodell für das Wasserstoffatom mit Hilfe der Hypothese von de Broglie herleiten. Damit können dann die Linien im Emissionsspektrum von Wasserstoff berechnet werden.

(a) Nehmen wir an, das Elektron bewege sich auf einer Kreisbahn mit Radius r um den Atomkern (Proton). De Broglie postulierte, dass das Elektron Wellencharakter hat. Die zugehörige Wellenlänge ist die De-Broglie-Wellenlänge λ . Damit sich die Elektronenwelle nicht selber auslöscht, müssen Wellenberge nach jeder Umrückung wieder genau auf einen Wellenberg fallen. Das heißt, der Umfang der Bahn muss ein ganzzahliges Vielfaches n der De-Broglie-Wellenlänge sein (siehe Abb. 1). Schreiben Sie diese Bedingung als Gleichung.

$$u = 2\pi r = n \cdot \lambda = n \cdot \frac{h}{p}$$
$$\Rightarrow 2\pi r = n \cdot \frac{h}{p}$$

Das ganzzahlige n in dieser Gleichung ist bereits die Quantisierungsbedingung der zugelassenen Bahnradien! Jetzt müssen wir nur noch den Impuls $p = mv$ des Elektrons für die De-Broglie-Wellenlänge berechnen. Der Impuls kann nicht beliebige Werte annehmen: Damit das Elektron auf seiner Kreisbahn bleibt, muss die radiale Beschleunigung gerade die Coulombkraft $F = e^2/(4\pi\epsilon_0 r^2)$ kompensieren.

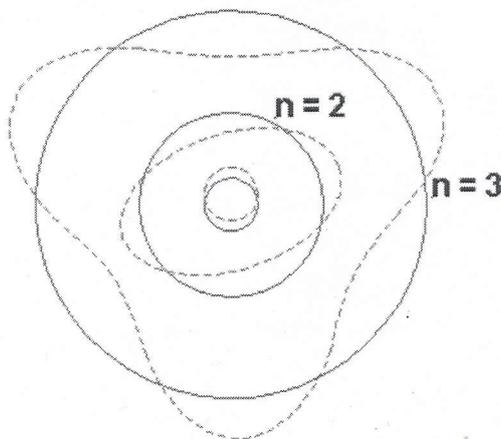


Abb. 1: Im Bohrschen Modell dürfen Elektronen nur Bahnen besetzen, deren Längen ganzzahlige Vielfache der De-Broglie-Wellenlänge der Elektronenwelle sind.

(b) Schreiben Sie die Newtongleichung ($F = ma$) für das Elektron in radialer Richtung und lösen Sie nach p^2 auf. (Für Kreisbewegungen gilt $a = v^2/r$, wobei a die radiale Beschleunigung und v die tangentielle Geschwindigkeit ist.)

$$F = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} = ma = m \frac{v^2}{r} = \frac{p^2}{mr} \Rightarrow p^2 = \frac{me^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

(c) Setzen Sie die Quantisierungsbedingung (a) ins Quadrat und eliminieren Sie p^2 mit Hilfe der Newtongleichung (b). Lösen Sie die Gleichung nach r auf.

$$4\pi^2 r^2 = n^2 \frac{h^2}{p^2} = n^2 \frac{h^2}{me^2} 4\pi\epsilon_0 r$$

$$\Rightarrow r = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} \cdot n^2$$

So erhalten wir die erlaubten Bahnradien im Bohrschen Atommodell:

$$r_n = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} n^2. \quad \checkmark$$

Die Kreisbahnen $n = 1, 2, \dots$ werden in der Quantenmechanik «Orbitale» genannt, da es sich tatsächlich nicht um Bahnen im klassischen Sinn (wie bei Planeten) handelt.

Berechnen Sie den numerischen Wert vom Bohr Radius r_1 (d.h. den kleinsten Orbitalradius)

$$r_1 = \frac{h^2 \epsilon_0}{\pi m e^2} = \frac{(6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js})^2 \cdot 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ C/Vm}}{\pi \cdot 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot (1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2} = \underline{\underline{5.29 \cdot 10^{-11} \text{ m}}}$$

(d) Als nächstes finden Sie die Energie E_n des Elektrons im Orbital n . Diese ist gegeben durch die Gesamtenergie des Elektrons (kinetisch + potentiell):

$$E_n = \frac{mv^2}{2} + E_{\text{pot}}$$

Um die kinetische Energie zu erhalten, verwenden Sie die Newtongleichung (b). Die potentielle Energie ist das elektrostatische Potential

$$E_{\text{pot}} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}$$

für den Bahnradius $r = r_n$ aus (c).

$$E_n = \frac{p^2}{2m} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 r} - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{-e^2}{8\pi\epsilon_0 r} = -\frac{e^2}{8\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\pi m e^2}{h^2 \epsilon_0 n^2} = \underline{\underline{-\frac{e^4 m}{8h^2 \epsilon_0^2} \frac{1}{n^2}}}$$

So erhalten wir die Energieniveaus im Bohrschen Atommodell:

$$E_n = -\frac{e^4 m}{8h^2 \epsilon_0^2} \frac{1}{n^2}$$

Die Energie des tiefsten Niveaus ($n = 1$; Grundzustand) ist

$$E_1 = -\frac{e^4 m}{8h^2 \epsilon_0^2} \simeq -13.6 \text{ eV}.$$

$|E_1| \simeq 13.6 \text{ eV}$ ist die *Ionisationsenergie*, da durch Zuführen dieser Energie dem Atom ein Elektron entrissen werden kann.

Bemerkung: In unserer Herleitung der Bohrschen Quantisierungsbedingungen haben wir das klassische Bahnenmodell der Atome mit dem Wellencharakter des Elektrons kombiniert. Einen solchen Zugang zur Quantenphysik nennt man *halb-klassisch*. Es stellt eine gute Näherung an später im 20. Jahrhundert entwickelte, genauere Formulierungen dar, welche wir hier aber nicht besprechen (sog. Schrödinger Gleichung oder die Matrix Mechanik von Heisenberg).

Emissionsspektren

Die Quantisierungsbedingungen für die Orbitalradien und Energien der Elektronen, welche Sie in (c) und (d) hergeleitet haben, erklären nun einerseits die *Stabilität des Atoms*: Ein Elektron kann höchstens auf den Grundzustand mit Energie E_1 und Radius r_1 herunterfallen. Die Wellennatur des Elektrons verhindert, dass es auf den Atomkern fällt. Andererseits können wir jetzt die Linien im Emissionsspektrum verstehen: Wenn ein Elektron aus einem Energiezustand E_n auf einen tieferen Zustand E_k ($k < n$) fällt, so wird dabei ein Photon ausgesendet. Die Frequenz f des Photons berechnen wir mit Hilfe der Energieerhaltung. Es gilt

$$hf = E_n - E_k = |E_1| \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

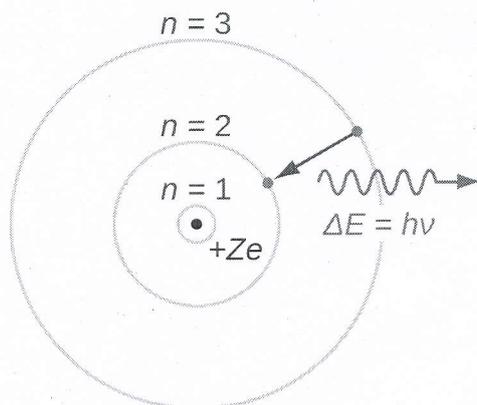


Abb. 2: Energieniveaus und Orbitalradien im Atom. Fällt ein Elektron von einem höheren auf ein tieferes Niveau, so wird ein Photon der Frequenz ν emittiert.

Aufgabe. Berechnen Sie die Linien (Wellenlängen) der Balmer Serie ($k = 2$) für $n = 3, 4, 5$.

$$hf = \frac{hc}{\lambda} = |E_1| \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \Rightarrow \lambda_n = \frac{hc}{|E_1|} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)^{-1} = 91.13 \text{ nm} \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)^{-1}$$

$$\Rightarrow \lambda_3 = 656 \text{ nm}, \quad \lambda_4 = 486 \text{ nm}, \quad \lambda_5 = 434 \text{ nm}.$$

Simulation zum Bohrschen Atommodell

Laden Sie die Simulation «Modelle des Wasserstoffatoms» auf Ihren Laptop und starten Sie das Programm:

<https://phet.colorado.edu/de/simulation/hydrogen-atom>

Damit können Sie simulieren, wie ein Wasserstoffatom einfallenden Photonen absorbiert und emittiert. Sie können einerseits ein echtes Experiment nachstellen (Schaltknopf «Experiment») und das Emissionsspektrum messen. Dabei sehen Sie das Linienspektrum, welches wir in der letzten Lektion behandelt haben. Andererseits können Sie mit der Simulation verschiedene Atommodelle visualisieren und deren Vorhersagen zu diesem Experiment testen (Schaltknopf «Vorhersage»)

1. Stellen Sie den Schalter auf «Vorhersage» und wählen Sie als Atommodell «Klassisches Sonnensystem».

Was beobachten Sie? Wie erklären Sie sich Ihre Beobachtung?

2. Stellen Sie das Atommodell auf «Bohr» und dann auf «de Broglie» und vergleichen Sie die beiden Modelle. Welchen Unterschied gibt es zwischen den Modellen?

3. Schalten Sie als nächstes die Photonenkanone (Lampe) mit weißem Licht an. Sie können zwischen den Modellen «Bohr» oder «de Broglie» wählen (Die beiden Modelle sind in der Vorhersage äquivalent, d.h. sie unterscheiden sich nur in ihrer Begründung).

Welche Prozesse beobachten Sie? Wie sehen Absorptionsspektrum und Emissionsspektrum in diesem Modell aus?

4. Wählen Sie nun monochromatisches Licht. Wie erreichen Sie, dass das Elektron im innersten Orbital (Grundzustand) auf das äußerste gezeigte Orbital ($n=6$) springt? Welche Wellenlänge muss dazu im einfallenden Licht gewählt werden?

5. Wie sieht das Emissionsspektrum bei dieser Wellenlänge (oben) aus? Wie viele Linien zeigt es? (Im Zweifelsfall können Sie versuchen, die Linien mit dem Spektrometer zu messen.)

Simulation zum Bohrschen Atommodell

Laden Sie die Simulation «Modelle des Wasserstoffatoms» auf Ihren Laptop und starten Sie das Programm:

<https://phet.colorado.edu/de/simulation/hydrogen-atom>

Damit können Sie simulieren, wie ein Wasserstoffatom einfallenden Photonen absorbiert und emittiert. Sie können einerseits ein echtes Experiment nachstellen (Schaltknopf «Experiment») und das Emissionsspektrum messen. Dabei sehen Sie das Linienspektrum, welches wir in der Letzten Lektion behandelt haben. Andererseits können sie mit der Simulation verschiedenen Atommodelle visualisieren und deren Vorhersagen zu diesem Experiment testen (Schaltknopf «Vorhersage»)

1. Stellen Sie den Schalter auf «Vorhersage» und wählen Sie als Atommodell «Klassisches Sonnensystem».

Was beobachten Sie? Wie erklären Sie sich Ihre Beobachtung?

Das Atom ist instabil, da das radial beschleunigte Elektron elektromagnetische Wellen aussendet und so Energie verliert.

2. Stellen Sie das Atommodell auf «Bohr» und dann auf «de Broglie» und vergleichen Sie die beiden Modelle. Welchen Unterschied gibt es zwischen den Modellen?

Die Darstellung ist unterschiedlich: Im "Bohr"-modell befinden sich die Elektronen auf Bahnen, während sie im "De Broglie"-modell als Wellen dargestellt sind.

3. Schalten Sie als nächstes die Photonenkanone (Lampe) mit weißem Licht an. Sie können zwischen den Modellen «Bohr» oder «de Broglie» wählen (Die beiden Modelle sind in der Vorhersage äquivalent, d.h. sie unterscheiden sich nur in ihrer Begründung).

Welche Prozesse beobachten Sie? Wie sehen Absorptionsspektrum und Emissionsspektrum in diesem Modell aus?

Bei der Absorption nimmt das Elektron ein Photon auf und geht dabei in einen höherliegenden Zustand/Orbital. Bei Emission fällt das Elektron runter. Die Spektren sind Linienförmig.

4. Wählen Sie nun monochromatisches Licht. Wie erreichen Sie, dass das Elektron im innersten Orbital (Grundzustand) auf das äusserste gezeigte Orbital (n=6) springt? Welche Wellenlänge muss dazu im einfallenden Licht gewählt werden?

$$\lambda_{1 \rightarrow 6} = \frac{hc}{|E_1|} \left(1 - \frac{1}{36}\right) = 91.13 \text{ nm} \cdot 1.025 \approx 94 \text{ nm}$$

5. Wie sieht das Emissionsspektrum bei dieser Wellenlänge (oben) aus? Wie viele Linien zeigt es? (Im Zweifelsfall können Sie versuchen, die Linien mit dem Spektrometer zu messen.)

$5+4+3+2+1 = 15$: Theoretisch sollte es 15 Linien geben.

Die 5 von $n \rightarrow 1$ nennt man "Lyman Serie"
Die 4 von $n \rightarrow 2$ " " " " "Balmer Serie"
Die 3 von $n \rightarrow 3$ " " " " "Paschen Serie"

Klicker Fragen zur Quantenphysik

1. Im Experiment zeigt Licht sowohl Eigenschaften eines Teilchens als auch Welleneigenschaften. Welche dieser Eigenschaften und Phänomene überrascht Sie am stärksten?

- a) Beide Eigenschaften sind für mich überraschen. Ich habe mir Licht anders vorgestellt.
- b) Die Welleneigenschaft von Licht finde ich sonderbar. Licht (Photonen) stellte ich mir als kleine Kügelchen vor, die herumfliegen und mit der Materie kollidieren.
- c) Die Teilcheneigenschaft von Licht finde ich komisch. Im Kindergarten lernte ich, dass Licht eine Welle ist.
- d) Ich weiss längst, dass Photonen quantisierte Energiepakete sind, welche wie Wellen Interferenzmuster zeigen. Die Quantenphysik wurde schliesslich vor rund 100 Jahren entdeckt!

Lösung: Alle Antworten sind richtig, da Einstellungen befragt werden. (a)-Antworten wären interessant und müssten von den SuS begründet werden. (b), (c) und (d) geben Aufschluss auf die Einstellungen der SuS.

2. Im Photoeffekt werden Elektronen durch einfallendes Licht aus einer Metallplatte «herausgeschlagen». Welcher Zusammenhang zwischen Grenzfrequenz, Austrittsarbeit, Gegenspannung und kinetischer Energie der herausgeschlagenen Elektronen ist richtig?

- a) Je grösser die Grenzfrequenz, desto grösser die kinetische Energie.
- b) Je grösser die Austrittsarbeit, desto grösser die kinetische Energie
- c) Je grösser die Gegenspannung, desto kleiner die Austrittsarbeit.
- d) Je grösser die Gegenspannung, desto kleiner die kinetische Energie.
- e) Je grösser die Grenzfrequenz, desto kleiner die Austrittsarbeit.

Lösung: (d).

3. In seinem Atommodell postulierte Bohr 1913, dass sich Elektronen auf Kreisbahnen mit diskreten Bahnradien um die Atomkerne bewegen. Dabei werden sie durch folgende Kraft auf ihren Kreisbahnen gehalten:

- a) Durch die Gravitationskraft, d.h. die Massenanziehung zwischen Elektron und Atomkern.
- b) Durch die Coulombkraft, d.h. die elektromagnetische Anziehungskraft zwischen den negativ geladenen Elektronen und dem positiv geladenen Atomkern.
- c) Wegen der Van-der-Waals Kraft richten sich die Elektronen im elektrischen Feld der geladenen Atomkerne aus und werden so auf ihren Kreisbahnen gehalten.
- d) Das Yukawa-Potential der starken Kernkraft bindet die Elektronen an den Atomkern und hält diese so auf ihren Kreisbahnen.
- e) Der magnetisch geladene Atomkern erzeugt ein Lennard-Jones Potential, welches die Elektronen auf ihrer Bahn hält.

Lösung: (b). Falls die Frage nach der Gravitationskraft auftaucht, könnte man dieses berechnen oder feststellen, dass sie viel kleiner ist als die Coulomb kraft. Von den anderen Kräften haben die SuS möglicherweise auch schon gehört, und könnten evtl. erläutert werden.

4. Die *Diskretheit* und die *Stabilität* der Bahnradien der Elektronen im Bohrschen Atommodell erschienen vorerst mysteriös. Bohr konnte damit aber viele experimentelle Befunde erfolgreich erklären. Wieso erwartet man, dass ein solcher «planetarischer» Aufbau des Atoms instabil ist?

- a) Die Bahnen der Planeten in unserem Sonnensystem sind ja auch stabil, und zwar während Jahrtausenden. Ich kann darum das Problem der Stabilität im Bohrschen Atommodell nicht nachvollziehen.
- b) Die destruktive Interferenz der Elektronenwellen würde das Atom im Bohrschen Modell sofort kollabieren lassen. Erst 1924 konnte De Broglie das Paradoxon der Atomstabilität in seiner Doktorarbeit lösen.
- c) Wenn elektrische Ladung beschleunigt wird, wo sendet sie elektromagnetische Strahlung aus (sog. Bremsstrahlung). Dieser Effekt wird in Teilchenbeschleunigern (CERN, PSI, DESY, SLAC etc.) verwendet, um hochenergetische Strahlung zu erzeugen. Das klassische Elektron auf einer kreisförmigen Bahn würde durch Bremsstrahlung sehr rasch all seine Energie verlieren und auf den Atomkern fallen.
- d) Bohr hatte die Gravitationskraft vergessen. Da diese für ungleich geladene Teilchen abstossend ist, würde in seinem Modell das Atom innert Sekunden zerspringen.

Lösung: (c).