

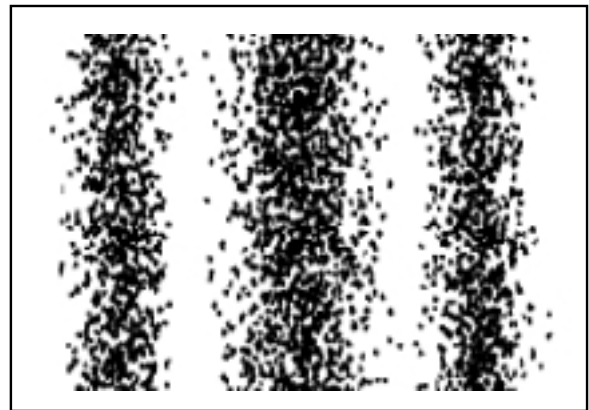
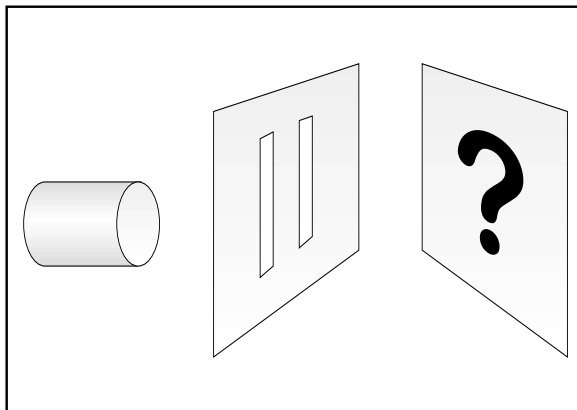
# RheinlandPfalz



PZ-Information 2/2000

Physik

## Quantenphysik / Mikroobjekte



**Handreichung zum neuen Lehrplan Physik in der S II**

In den "PZ-Informationen" werden Ergebnisse aus Arbeitsgruppen von Lehrerinnen und Lehrern aller Schularten veröffentlicht, die gemeinsam mit Fachwissenschaftlern und Fachdidaktikern erarbeitet worden sind. Hier werden Anregungen gegeben, wie auf der Grundlage des Lehrplans in der Schule gearbeitet werden kann. Im Mittelpunkt steht dabei immer der tägliche Unterricht und damit verbunden die Absicht, seine Vorbereitung und Durchführung zu bereichern. Für Lehrerinnen und Lehrer, die diese Anregungen aufgreifen und durch eigene Erfahrungen und Ergebnisse verändern oder ergänzen wollen, ist das Pädagogische Zentrum ein aufgeschlossener Partner, der besucht oder telefonisch erreicht werden kann.

Die "PZ-Informationen" erscheinen unregelmäßig. Eine chronologische Liste aller Veröffentlichungen des Pädagogischen Zentrums einschließlich einer inhaltlichen Kommentierung kann im PZ Bad Kreuznach angefordert werden (Rückporto). Unser Materialangebot finden Sie auch im Internet auf dem Landesbildungsserver unter folgender Adresse

<http://bildung-rp.de/PZ>

### **Herausgeber:**

Pädagogisches Zentrum Rheinland-Pfalz (PZ)  
Europaplatz 7 - 9, 55543 Bad Kreuznach  
Postfach 2152, 55511 Bad Kreuznach  
Telefon (0671) 84088-0  
Telefax (0671) 8408810  
e-mail: [pzkh@sparkasse.net](mailto:pzkh@sparkasse.net)  
URL: <http://bildung-rp.de/PZ>

### **Autor:**

Josef Leisen, Staatl. Studienseminar für das Lehramt an Gymnasien in Koblenz,  
Leiter der Fachdidaktischen Kommission Physik - Sekundarstufe II

unter Mitarbeit der Mitglieder der Fachdidaktischen Kommission Physik:

Dietmar Fries, Gymnasium Birkenfeld  
Dr. Jörg Luggen-Hölscher, Goethe-Gymnasium Germersheim

### **Skriptbearbeitung und Layout:**

Josef Leisen

### **Redaktion:**

Angela Euteneuer

© Bad Kreuznach 1999

Nicht alle Copyright-Inhaber konnten ermittelt werden. Deren Urheberrechte werden hiermit vorsorglich und ausdrücklich anerkannt.

Die vorliegende PZ-Veröffentlichung wird gegen eine Schutzgebühr von DM 5,00 zzgl. Versandkosten abgegeben.
---

## **I. Didaktischer Teil**

1. Die Rolle des Doppelspaltexperiments in der Schulphysik .....	5
1.1 Der Einstieg in die Quantenphysik .....	5
1.2 Das Doppelspaltexperiment als didaktischer Alleskönner .....	5
1.3. Im Doppelspaltexperiment steckt Welliges, Körniges und Stochastisches ....	6
1.4 Im Doppelspaltexperiment steckt die Unschärferelation .....	11
1.5 Im Doppelspaltexperiment stecken viele andere wichtige Experimente .....	16
1.6 Im Doppelspaltexperiment steckt die ganze Palette der Interpretationen .....	16
2. Zur Didaktik von Fotoeffekt und COMPTON-Effekt in der Schule .....	17
2.1 Der Fotoeffekt und der COMPTON-Effekt in der Schule .....	17
2.2 Didaktische Probleme beim Fotoeffekt und COMPTON-Effekt .....	18
2.3 Die didaktische Funktion und der didaktische Ort von Fotoeffekt und COMPTON-Effekt .....	22

## **II. Unterrichtspraktischer Teil - Ein Unterrichtsvorschlag** ..... 23 |

1. Das quantenmechanische Verhalten von freien Elektronen und Photonen am Doppelspalt .....	27
1.1 Die Präparation von Mikroobjekten .....	27
1.2 Das JÖNSSON-Experiment und das TAYLOR-Experiment .....	28
1.3 Die Elektronenbeugungsröhre .....	30
1.4 Erkenntnistheoretische Positionen zum Doppelspaltexperiment .....	33
1.5 HEISENBERG'sche Unschärferelation .....	36
2. Photon-Elektron-Wechselwirkung .....	38
2.1 Foto-Effekt .....	38
2.2 COMPTON-Effekt .....	39

## **III. Unterrichtsmaterialien** ..... 41 |

## **IV. Literatur** ..... 61 |

## **V. Anhang** ..... 63 |



# I. Didaktischer Teil

## 1. Die Rolle des Doppelspaltexperiments in der Schulphysik

### 1.1 Der Einstieg in die Quantenphysik

Der Einstieg in die Quantenphysik über den Fotoeffekt hat Tradition. Als "Geburtstag" der Quantenphysik gilt der 14. Dezember 1900, jener Tag, an dem Max PLANCK seine Ergebnisse in der Sitzung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft vortrug und im Zusammenhang mit den Strahlungsgesetzen die Formel  $E=h\cdot f$  in Ansatz brachte. In seinem legendären Aufsatz "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt" im Band 17 der Annalen der Physik des Jahres 1905 wandte Albert EINSTEIN die Quantisierungsideen PLANCK's auf den Fotoeffekt an. Der Fotoeffekt begleitete somit schon frühzeitig die rasante Entwicklung der Quantenphysik.

Bedingt durch die experimentellen Möglichkeiten, hin bis zur  $h$ -Bestimmung, entwickelte sich der Fotoeffekt als der Standardeinstieg in die Quantenphysik der Schule. Das Experimentieren mit freien Elektronen war weniger weit entwickelt, wenn man bedenkt, dass MILLIKAN seine Öltröpfchen-Experimente zur Bestimmung der Elementarladung erst in den Jahren um 1911 und später anstellte. Weitere experimentelle Vorteile begünstigten den Zugang zur Quantenphysik über Licht. Licht lässt sich leicht mittels eines Prismas oder Gitters auf eine Frequenz hin 'präparieren'. Durch die zwischenzeitlich gut entwickelte Physik der Röntgenstrahlung erschlossen sich weitere experimentelle Möglichkeiten (Grenzwellenlänge), denkt man an die Experimente von W.H. und L. BRAGG zur Streustrahlung (Bragg-Reflexion) oder an die Experimente von Max von LAUE, W. FRIEDRICH und P. KNIPPING zur Kristallgitterbeugung von Röntgenstrahlen. Elektronen als Mikroobjekte wurden historisch vornehmlich in gebundenen Zuständen, nämlich in der Atomtheorie der zwanziger Jahre, erforscht. Mit freien Elektronen als Mikroobjekten wurde erst später im Verlaufe der sich entwickelnden Beschleunigertechnik experimentiert.

Nach wie vor gibt es Gründe, den Einstieg in die Quantenphysik über den Fotoeffekt zu wählen. Der neue Lehrplan ermöglicht dies durch Vorziehen des Bausteins Mikroobjekte III. Gleichwohl gibt es inzwischen bewährte Alternativen mit hervorstechenden Vorzügen. So bietet sich, angestoßen durch Feynman's Bücher, der Einstieg in die Quantenphysik über das Doppelspaltexperiment an, sei es mit Licht oder Elektronen durchgeführt. Der Lehrplan legt diesen Weg nahe, ohne aber andere auszuschließen.

### 1.2 Das Doppelspaltexperiment als didaktischer Alleskönner

"Das zentrale Geheimnis der Quantentheorie steckt im Doppelspaltexperiment." So schätzt R. FEYNMAN die Rolle und Bedeutung des Doppelspaltexperiments ein. Das erklärt auch die Tatsache, dass in seinen Büchern immer wieder auf das Doppelspaltexperiment Bezug genommen wird. Im Blick auf den Unterricht stellen sich folgende Fragen:

- Was steckt alles im Doppelspaltexperiment?
- Ist das Doppelspaltexperiment didaktisch tragfähig und methodisch elementarisierbar?
- Wie kann ein Unterrichtsgang aussehen, in dem das Doppelspaltexperiment eine zentrale Stellung einnimmt?

Den Fragen wird im Folgenden nachgegangen. Im Doppelspaltexperiment "steckt":

- das "Wellige", das "Körnige" und das "Stochastische" der Quantenphysik,
- die HEISENBERG'sche Unschärferelation,
- die Frage des Messprozesses,
- die Frage der Nichtlokalität,
- viele andere wichtige Experimente,
- die ganze Palette der Interpretationen.

Kurzum: *Im Doppelspaltexperiment "steckt", was in der Quantenphysik erstrangig ist.*

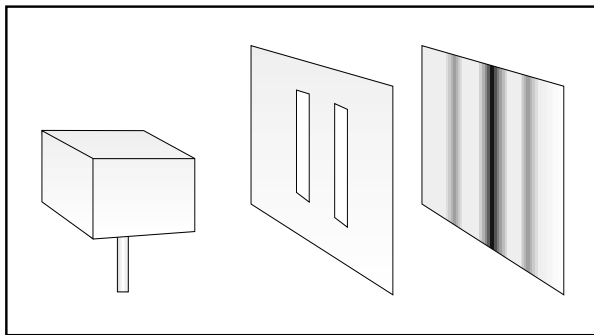
Damit wird natürlich nicht behauptet, dass die Quantenphysik nur das ausmacht, was im Doppelspaltexperiment steckt, sondern dass man am Doppelspaltexperiment unter dem Gesichtspunkt des Exemplarischen viele zentrale Inhalte und Fragen der Quantenphysik behandeln kann. Damit wäre das Doppelspaltexperiment ein didaktischer Alleskönner.

### **1.3 Im Doppelspaltexperiment steckt Welliges, Körniges und Stochastisches**

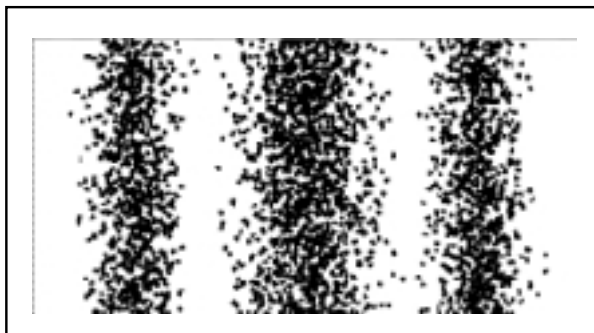
Die eigene Geschichte des Doppelspaltexperiments ist gleichermaßen spannend wie didaktisch fruchtbar. Unter didaktischen Gesichtspunkten sind die folgenden drei Versionen des Doppelspaltexperiments brauchbar:

- das YOUNG-Experiment (vgl. [10], S. 172)
- das TAYLOR-Experiment (vgl. [10], S. 197)
- das JÖNSSON-Experiment (vgl. [10], S. 191).

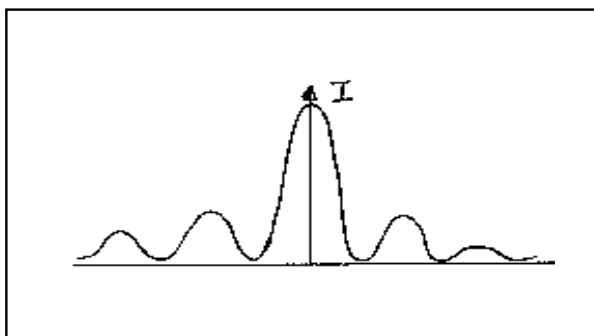
Das YOUNG-Experiment um 1800 führte nach einer langen Durchsetzungsgeschichte, hier ist FRESNEL zu nennen, letztlich zum klassischen Wellmodell des Lichtes. Dieses Experiment ist heute ein Standardexperiment der Schulphysik und mit einem Laser problemlos durchführbar. Das YOUNG-Experiment zeigt im klassischen Sinn 'Welliges' im Licht. Das soll bedeuten, dass man den experimentellen Befund mit dem Wellenmodell des Lichts erklären kann. Die sichtbaren Interferenzstreifen sind der Fingerabdruck des 'Welligen' im Licht, oder vorsichtiger formuliert, des 'Welligen', das uns das Licht zeigt.



Das TAYLOR-Experiment aus dem Jahre 1908 ist ein Beugungsexperiment an einer Nadelspitze mit extrem 'verdünntem Licht'. Modellhaft gesprochen, befindet sich stets nur ein Photon zwischen der Lichtquelle und dem Film als Schirm. Das Schirmbild zeigt 'Körniges' und 'Stochastisches' in dem Sinne, dass nur gewisse Punkte in stochastischer Verteilung aufleuchten. Nach langer Belichtungszeit bildet sich aber dasselbe Interferenzbild als Streifenmuster heraus wie bei kurzer Belichtungszeit und hoher Lichtintensität. Das Experiment lässt sich auch in der Schule mit einem Doppelspalt bei unterschiedlicher Belichtungszeit durchführen.



Im JÖNSSON-Experiment aus dem Jahre 1960 wird das Doppelspaltexperiment mit Elektronen statt mit Licht durchgeführt. Die auf dem Schirm auftreffenden Elektronen zeigen in den lokalisierbaren Auftreffstellen das 'Körnige'. Diese Tatsache verwundert kaum, wenn man mit dem Denkmodell 'Teilchen' an die Elektronen herangeht. In dem stochastisch nicht vorhersagbaren Aufleuchten der Schirmstellen zeigen die Elektronen beim Durchgang durch Doppelspalte 'Stochastisches'. Die zweifelsfreie Tatsache des Auftretens von Interferenzstreifen im JÖNSSON-Experiment verweist auf 'Welliges', das gleichartig präparierte Elektronen beim Durchgang durch einen Doppelspalt zeigen. Dass Elektronen unter gewissen experimentellen Bedingungen 'Welliges' zeigen, verwunderte im Jahre 1960 zwar niemanden mehr, es war aber eine experimentelle Leistung. (Man denke an die Elektronenbeugungsversuche von 1927 an Graphitkristallen von DAVISSON und GERMER und am elektrischen Biprisma um 1956 von BOERSCH, MÖLLENSTEDT und DÜCKER.)



Hinweis: Die Originalarbeiten von TAYLOR [1] und JÖNSSON [2] sind auszugsweise auch für Schüler lesbar und können im Unterricht sehr gut eingesetzt werden.

Die genannten Doppelspaltexperimente sind die experimentelle und faktische Grundlage zum Aufbau passender Vorstellungen über das Verhalten gleichartig präparierter Mikroobjekte. Unter didaktischem Gesichtspunkt fungieren das JÖNSSON- und das TAYLOR-Experiment als Schlüsselexperimente, welche die Quantenphänomene **'ganz lassen'** und sich nicht ausschließlich auf den sogenannten 'Teilchenaspekt' oder den sogenannten 'Wellenaspekt' konzentrieren. Ein adäquates, d. h. passendes Verständnis von Quantenphänomenen kann sich aufbauen, wenn 'Welliges', 'Körniges' und 'Stochastisches' **von Anfang an mitgedacht und ganz gelassen** werden. JÖNSSON- und TAYLOR-Experiment bieten das an. Der Nachteil, dass das JÖNSSON-Experiment nicht als Schulexperiment durchgeführt werden kann, wird wettgemacht durch

- dessen Klarheit und Durchsichtigkeit, sowie durch
- das hohe Maß an Authentizität, indem man die Originalarbeit einbindet und
- durch die Möglichkeit der Video- und Computersimulation.

In der Quantenphysik wird es besonders deutlich, dass kein direkt vermittelter Weg vom Phänomen zur Theorie führt. Physik zeigt sich hier als das, was sie ist, nämlich eine **theoriegeleitete Erfahrungswissenschaft**. Das JÖNSSON-Experiment ist ein solches, das von der Theorie vorgezeichnet wird. Es ist eben kein Experiment, aus dem die Theorie heraustropft, wenn man es nur 'induktiv lange genug ausquetscht'. Es ist didaktisch legitim, die Tatsachen des JÖNSSON-Experiments als solche zu nehmen und sie in eine adäquate Sprache zu bringen. Erkenntnistheoretische Redlichkeit geht dann Hand in Hand mit didaktischer Ehrlichkeit. Manches gestaltet sich didaktisch einfacher, wenn man akzeptiert, dass die Quantenphysik den Verstehensbegriff stärker herausfordert als andere Teilgebiete der Physik.

*Verstehen in der Quantenphysik betont: Neue Experimente und Ergebnisse (z. B. 'Körniges' in Interferenzstreifen) mit neuen Grundideen (z. B. Quantisierung) in eine neue Sprache (z. B. Wahrscheinlichkeitswelle, Wahrscheinlichkeitsdichte) zu bringen.*

Die neue Sprache benutzt alte Wörter. Die Sprache ist aber gleichzeitig schon Deutung. Insofern ist jedes physikalische Arbeiten theoriegeleitet. Die Frage ist dann nur, welche Theorie das Arbeiten bestimmt.

In der Regel ist den Lernenden das klassische Wellenkonzept vertraut. Beim JÖNSSON-Experiment muss dazugelernt und neu gesehen werden. Ein bewährtes Konzept (Wellenkonzept) wird ausgebaut und nicht über Bord geworfen. Es wird begrifflich und sprachlich neu



formuliert bzw. umformuliert. Es wird in dem Sinne ein 'Sprachspiel' betrieben, indem man sich auf eine gemeinsame Sprache und auf gemeinsame Bilder verständigt. Dies ist ein originärer Prozess des Physiktreibens. Die Experimente bieten den Gegenstand, an denen diese Sprache geschaffen, geschliffen, ausgehandelt und geübt wird. Über das Doppelspaltexperiment mit Mikroobjekten wird in der neuen Sprache folgendermaßen gesprochen:

Man schickt gleichartig präparierte Mikroobjekte auf einen geeigneten Doppelspalt. Das stochastisch verteilte Aufleuchten einzelner Schirmstellen in einem (Interferenz-) Streifenmuster zeigt in dem Verhalten der Mikroobjekte 'Welliges', 'Körniges' und 'Stochastisches'. Das 'Wellige' zeigt sich in den Interferenzstreifen, das 'Körnige' in dem Aufleuchten lokalisierbarer Schirmstellen und das 'Stochastische' zeigt sich in dem Zufallscharakter des Aufleuchtens, wobei gewisse Schirmstellen mit höherer Wahrscheinlichkeit aufleuchten als andere.

Es ist sinnvoll, das 'klassische Wellen- und Teilchenkonzept' neu zu denken und zu formulieren: Wir ordnen gleichartig präparierten Mikroobjekten eine (mathematische) Wahrscheinlichkeitswelle  $\Psi$  zu, der im Sinne einer Messgröße selbst keine Realität zukommt.

$|\Psi|^2 dV$  ist eine Messgröße und beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der die Mikroobjekte auf dem Schirm auftreffen. (Bemerkung:  $|\Psi|^2$  ist eine Wahrscheinlichkeitsdichte.)

Welche Rolle spielen nun die gängigen Experimente mit der Elektronenbeugungsröhre und zum Fotoeffekt?

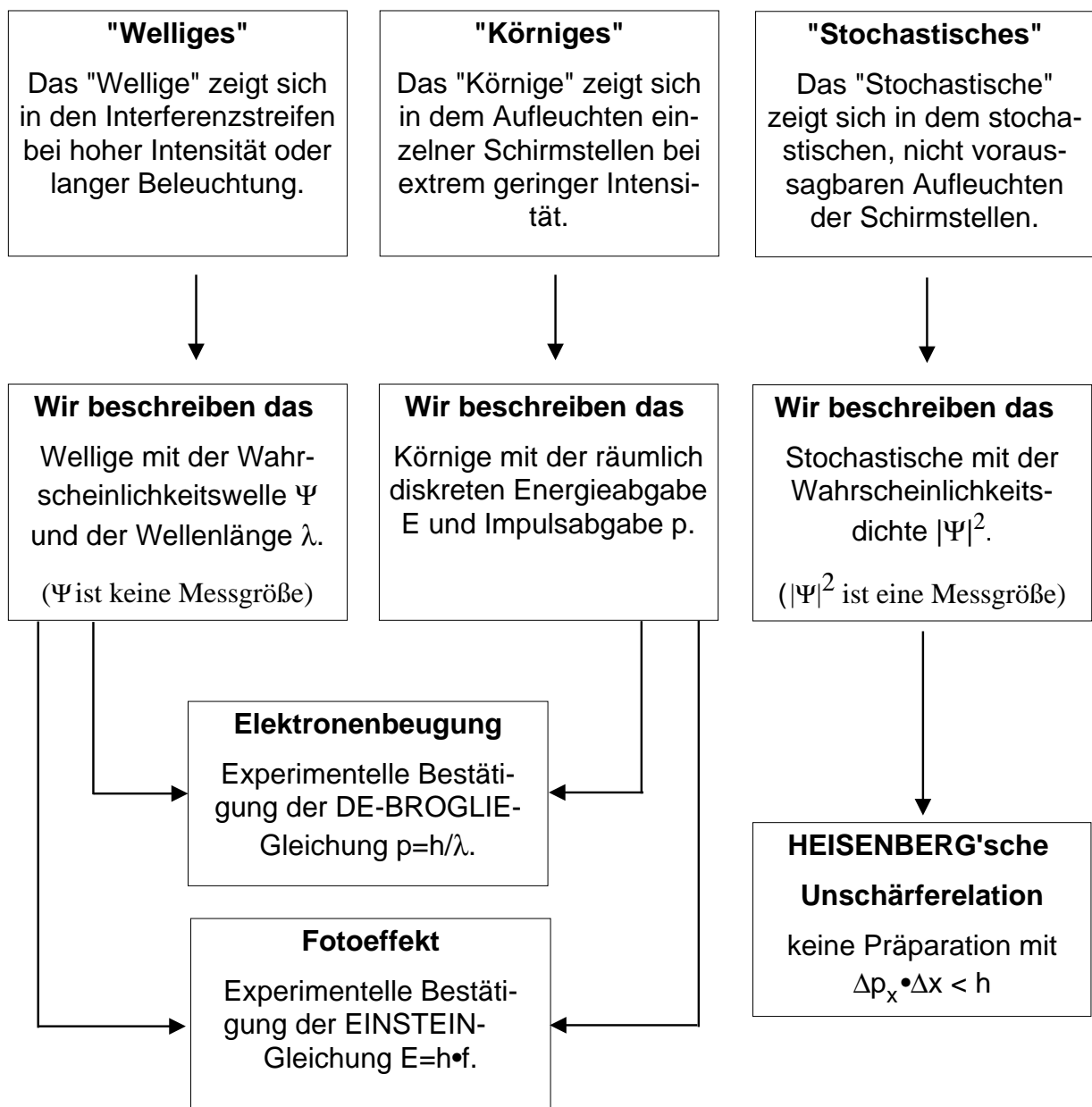
- Die Elektronenbeugungsröhre liefert die experimentelle Bestätigung der DE-BROGLIE-Gleichung  $p=h/\lambda$ .
- Der Fotoeffekt liefert die experimentelle Bestätigung der EINSTEIN-Gleichung  $E=h \cdot f$ .

# Welliges, Körniges und Stochastisches in der Quantenphysik

"Die zentralen Geheimnisse der Quantenphysik stecken im Doppelspaltexperiment"

Doppelspaltexperimente oder ähnliche raffinierte Experimentieranordnungen dienen dazu, den bewegten Mikroobjekten ihre Geheimnisse zu entlocken.

Doppelspaltexperimente mit freien und gleichartig präparierten Elektronen (JÖNSSON-Experiment) und Photonen (TAYLOR-Experiment) zeigen für freie und gleichartig präparierte Mikroobjekte:



## 1.4 Im Doppelspaltexperiment steckt die Unschärferelation

Die HEISENBERG'sche Unschärferelation ist ein wesentlicher Bestandteil der Quantenphysik und darf im Physikunterricht nicht fehlen. Ohne Übertreibung darf man behaupten, dass sie als Bildungswissen Allgemeingut sein müsste. Leider ist die HEISENBERG'sche Unschärferelation didaktisch widerspenstig. Die didaktische Widerspenstigkeit hat zwei Gründe:

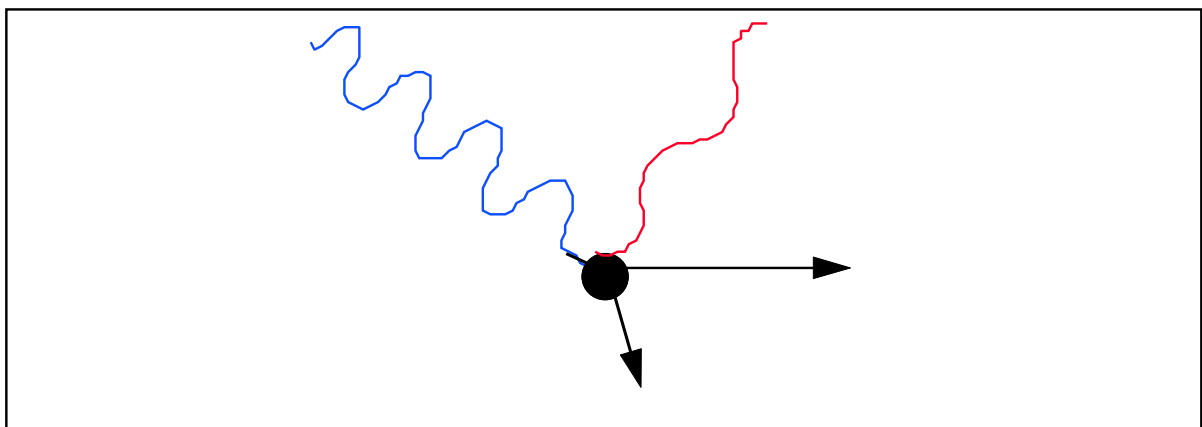
- Der formale Grund für die Gültigkeit der HEISENBERG'schen Unschärferelation liegt darin, dass der Impulsoperator und der HAMILTON-Operator nicht kommutieren.
- In der erkenntnistheoretischen Interpretation der HEISENBERG'schen Unschärferelation gehen die Auffassungen nach wie vor auseinander.

Eine theoretisch saubere Ableitung der Unschärferelation in der Form  $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$ , die auf die Nichtkommutativität der Operatoren rekurriert, ist in der Schule zu aufwendig, zu schwierig und bringt für das physikalische Verständnis wenig.

Der erkenntnistheoretische Status der HEISENBERG'schen Unschärferelation kann nicht mit ein paar isolierten Bemerkungen abgetan werden, sondern bedarf einer Einbindung in die 'Quantenphilosophie' des gesamten Kursanges durch die Quantenphysik.

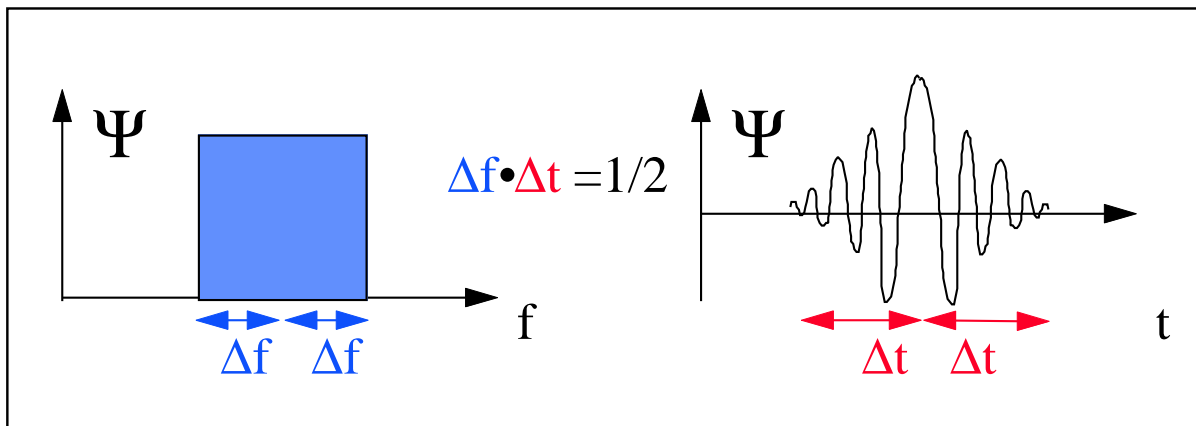
Der unterrichtende Lehrer kommt nun in eine didaktische Dilemma-Situation: Niemand kommt an der Frage geeigneter Wege zur Herleitung und Veranschaulichung der HEISENBERG'schen Unschärferelation im Unterricht vorbei. In [3] werden verschiedene, immer wieder angebotene Ansätze zur Vermittlung der Unschärferelation skizziert.

### 1. Der Weg über das HEISENBERG-Mikroskop



Im Gedankenexperiment wird versucht, den Ort eines Elektrons (Mikroobjekts) durch Beleuchtung mit kurzwelliger Strahlung der Wellenlänge  $\lambda$  zu bestimmen. Durch den unkontrollierten Rückstoß des gestreuten Photons (COMPTON-Effekt) wird das Elektron derart gestört, dass die Unschärferelation erfüllt ist. Aus den Gleichungen des Auflösungsvermögens des Mikroskops und der DE BROGLIE-Gleichung  $p \approx h/\lambda$  kann man auf Schulniveau die HEISENBERG'sche Unschärferelation in der Form  $\Delta x \cdot \Delta p \approx h$  herleiten.

## 2. Der Weg über die Unschärfe von Wellenpaketen



Aus der klassischen Theorie der FOURIER-Transformation ist bekannt, dass Wellenpakete mit der spektralen Bandbreite  $\Delta k$  eine Ortsbandbreite  $\Delta x$  haben müssen, sodass  $\Delta k \cdot \Delta x \geq 1/2$  ist. Mittels der DE BROGLIE-Gleichung  $p = h \cdot k / 2\pi$  kann die Argumentation unmittelbar auf die Eigenschaften der Wellenfunktionen übertragen werden und die Unschärferelation  $\Delta x \cdot \Delta p \geq h / 4\pi$  hergeleitet werden.

## 3. Der Weg über den Potentialtopf

Standardabweichungen:

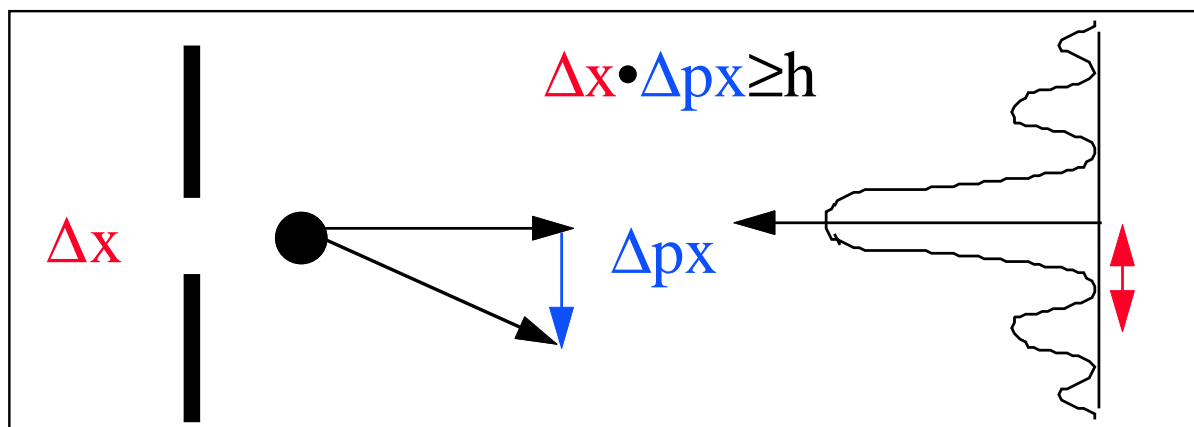
$$(\Delta x)^2 = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2 \quad \text{und} \quad (\Delta p)^2 = \langle p^2 \rangle - \langle p \rangle^2 \rightarrow$$

quantenmechanische Erwartungswerte der Operatoren  $\rightarrow$

$$\text{Unschärferelation: } (\Delta x)^2 \cdot (\Delta p)^2 \geq h^2 / 16\pi^2$$

Am eindimensionalen Potentialtopf mit unendlich hohen Wänden kann man aus den Standardabweichungen  $(\Delta x)^2 = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2$  und  $(\Delta p)^2 = \langle p^2 \rangle - \langle p \rangle^2$  unter Berechnung der quantenmechanischen Erwartungswerte der Operatoren die HEISENBERG'sche Unschärferelation  $(\Delta x)^2 \cdot (\Delta p)^2 \geq h^2 / 16\pi^2$  herleiten.

#### 4. Der Weg über die Beugung am Einzelspalt



Im Gedankenexperiment fliegen Elektronen senkrecht auf einen Spalt mit der Breite  $d$  und erzeugen auf dem Schirm ein Interferenzmuster, das so gedeutet wird, dass sich der Querimpuls in Spaltrichtung vergrößert hat. Aus der Winkelbeziehung der 1. Minima und der DE-BROGLIE-Gleichung sowie der Annahme, dass die Ortsunschärfe gleich der Spaltbreite ist, kann man die Unschärferelation  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h$  herleiten.

Die Wege können folgendermaßen **bewertet** werden:

Gegen den Weg 1 über das HEISENBERG-Mikroskop spricht:

- Es wird zwangsläufig die Vorstellung genährt, dass das Elektron vor der Störung einen genau bestimmten Impuls hatte und fördert es somit klassische Vorstellungen statt diese zu überwinden.
- Neue Experimente zur störungsfreien Wechselwirkung widersprechen dem HEISENBERG-Mikroskop.

"Das Heisenberg'sche Gedankenexperiment kann daher zur Illustration der Unbestimmtheitsrelation nur beschränkt empfohlen werden." ([3], S. 381)

Der Weg 2 über die Unschärfe von Wellenpaketen ist fachlich korrekt, benutzt keine klassischen Bahnen, aber es bedarf des Rückgriffs auf die akustische Unschärfe. In [3] heißt es dazu: "Eine Vorgehensweise dieser Art erscheint daher sinnvoll für den Unterricht in der Schule." Dem kann man nur mit großen Bedenken zustimmen. Die akustische und optische Unschärfe kann man im Prinzip ohne Verwendung komplexer Zahlen herleiten, allerdings unter Verzicht auf Eleganz. Beim Übergang zur Quantenmechanik kann man aber nicht auf die komplexe Darstellung verzichten, andernfalls entsteht eine Argumentationslücke. (Komplexe Zahlen sind aber vom Mathematikunterricht her nicht bekannt.)

Zum Weg 3 über den Potentialtopf heißt es in [3]: "Diese Demonstration der Unbestimmtheitsrelation ist nicht besonders aufwendig und hat den Vorteil, daß die korrekten quantenmechanischen Begriffsbildungen benutzt werden. Der Umstand, daß tatsächlich etwas mit Hilfe des Formalismus berechnet wird, kann die Sicherheit im Umgang mit der Theorie fördern." ([3], S. 381) Der formale mathematische Aufwand ist aber beachtlich und für die Schule erfahrungsgemäß viel zu schwer. Außerdem wird der physikalische Gehalt nicht wesentlich deutlicher. Es kommt hinzu, dass die Herleitung nicht an freien, sondern an gebundenen Elektronen im Potentialtopf durchgeführt wird und diese in der Regel erst später in der Atomphysik behandelt werden.

Der Weg 4 über die Beugung am Einzelspalt ist in vielen Schulbüchern zu finden, wird aber zunehmend mit überzeugenden Argumenten 'abgelehnt'. Der Weg bestärkt klassische Bahnvorstellungen und ohne die Annahme einer klassischen Bahn ist der in der Rechnung angeetzte Wert des Querimpulses willkürlich. (Exakte Rechnungen zeigen, dass eine solche Relation existiert, aber diese herzuleiten liegt außerhalb der Möglichkeiten der Schule.) Die Beschränkung des Querimpulses auf Werte kleiner als der Impuls ist ebenso unzulässig wie die Betrachtung der Grenzfälle. Eine saubere quantenmechanische Herleitung ist für die Schule aber zu kompliziert. "Ein gangbarer Weg besteht aber darin, das Problem anzusprechen und seine Auflösung mit qualitativen Argumenten anschaulich zu erläutern." ([3], S. 381)

Als Fazit kann nur wiederholend festgehalten werden: Eine theoretisch saubere Ableitung der Unschärferelation in der Form  $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$  ist in der Schule ist zu aufwendig, zu schwierig und bringt für das physikalische Verständnis wenig. Man wird bei der 'Herleitung' über Plausibilitätsbetrachtungen, heuristische Überlegungen, Erläuterungen, qualitative Argumentationen am Einzelspalt, am Potentialtopf, mit Wellenpaketen oder am HEISENBERG-Mikroskop nicht vorbeikommen. Bei allem ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die HEISENBERG'sche Unschärferelation zu den gesichertsten Erkenntnissen der Physik zählt, dass sie formal streng innerhalb einer Theorie hergeleitet werden kann, dass diese Herleitung aber die Möglichkeiten der Schule sprengt. Nichtsdestotrotz gibt es eine leicht zu behaltende und sprachlich eingängige Formulierung, die gut von fast allen Physikern jenseits aller Interpretationen geteilt werden kann:

Die Unmöglichkeit-Formulierung in der Ensemble-Deutung.

*Es ist nicht möglich, eine Vielzahl von Mikroobjekten so zu präparieren, dass deren Ortsstreuung und deren Impulsstreuung gleichzeitig beliebig klein sind. Die HEISENBERG'sche Unschärferelation  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h/4\pi$  setzt der gleichzeitigen Verringerung eine Grenze.*

(Die Ortsstreuung ist dabei die Standardabweichung, die mittlere Ortsungenauigkeit.)

Erkenntnistheoretisch hat die HEISENBERG'sche Unschärferelation damit denselben Status wie der Energiesatz in der Perpetuum-Mobile-Formulierung, oder wie der Entropiesatz in der Formulierung, dass es unmöglich ist, die Gesamtentropie zu verringern. Didaktisch hat diese Formulierung den Vorzug, dass sie zunächst noch andere Interpretationswege in dem Sinne offen hält, dass die statistische Interpretation eine Minimalinterpretation darstellt. Er-

kennntnistheoretisch liegen ihr zwei Punkte zugrunde:

- Die HEISENBERG'sche Unschärferelation bezieht sich nicht auf einzelne Mikroobjekte, sondern auf ein Ensemble von identisch präparierten Systemen (also einen Zustand).
- Die HEISENBERG'sche Unschärferelation gibt eine objektive Tatsache, nämlich die Unmöglichkeit einer bestimmten Präparation, wieder. (Siehe [6], S. 179)

Ein weiterer Vorzug liegt darin, dass sich die Schüler diese Unmöglichkeits-Formulierung leicht merken können und dass sie leicht am Doppelspalt erläutert werden kann:

*Es ist nicht möglich, eine Vielzahl (Ensemble) von Elektronen beim Durchgang durch einen Doppelspalt so zu präparieren, dass deren Ortsunschärfe und deren Impulsunschärfe gleichzeitig beliebig klein gemacht werden können.*

Positiv formuliert:

*Bestimmt man für eine Vielzahl von Mikroobjekten den Ort und erhält eine mittlere Ortsungenauigkeit  $\Delta x$ , so lässt sich die mittlere Genauigkeit einer gleichzeitig stattfindenden Impulsmessung  $\Delta p_x$  prinzipiell nicht unter einen Wert senken, der sich aus der Unschärferelation  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h/4\pi$  ergibt. ([10], S. 236)*

In der Unmöglichkeits-Formulierung ist die HEISENBERG'sche Unschärferelation Ausdruck des tieferliegenden quantenmechanischen Fundamentalprinzips:

*Gibt es verschiedene Möglichkeiten (z. B. Wege) für das Eintreten eines bestimmten Ereignisses und wird durch die Versuchsanordnung nicht festgelegt, dass ausschließlich eine Möglichkeit gewählt wurde, so tritt immer Interferenz auf.*

*Ortsmessung und Interferenzerscheinung schließen sich gegenseitig aus. Unterscheidbare Mikroobjekte interferieren nicht. Nur ununterscheidbare Mikroobjekte interferieren. Bezogen auf das Doppelspaltexperiment sind die Elektronen unterscheidbar, wenn man weiß, welchen Spalt sie passiert haben.*

Es ist grundsätzlich wichtig, dass die HEISENBERG'sche Unschärferelation an Beispielen immer wieder sprachlich in verschiedenen Formulierungen angewandt wird. Weiterhin ist es dringend notwendig, die Bedeutung der HEISENBERG'sche Unschärferelation an Beispielen des Mikro- wie des Makrokosmos zu demonstrieren.

- Einfach- und Doppelspalt  
Am Einfachspalt kann die "Herleitung" demonstriert, problematisiert und kritisch kommentiert werden.
- Elektronenbahnen in der Fernsehröhre  
Rechnungen mit einer Anodenöffnung von 0,1 mm und einer Beschleunigungsspannung von 10 kV ergeben nach der HEISENBERG'schen Unschärferelation die unmerkliche Strahlverbreiterung von  $5 \cdot 10^{-9}$  m.
- Vergleich Elektronen-Ensemble mit einem Sandkörner-Ensemble  
Vergleichsrechnungen eines Elektronen-Ensemble mit einem Sandkörner-Ensemble beim Durchgang durch einen Spalt oder Doppelspalt zeigen die Unmerklichkeit der

HEISENBERG'schen Unschärferelation bei Sandkörnern als Makroobjekten.

- Elektronenbahnen in Atomen
- Lokalisationsenergie
- Stabilität der Atome

Am Doppelspalt kann die Unmöglichkeits-Formulierung der HEISENBERG'schen Unschärferelation eingängig behandelt werden. Insofern erweist sich das Doppelspaltexperiment auch hier wieder als didaktischer Alleskönner.

### **1.5 Im Doppelspaltexperiment stecken viele andere wichtige Experimente**

*(Empfehlung: Arbeits- und Unterrichtshilfen zu Interpretationen der Quantenphysik des ILF-Mainz, [18])*

### **1.6 Im Doppelspaltexperiment steckt die ganze Palette der Interpretationen**

*(Empfehlung: Arbeits- und Unterrichtshilfen zu Interpretationen der Quantenphysik des ILF-Mainz, [18])*



## 2. Zur Didaktik von Fotoeffekt und COMPTON-Effekt in der Schule

### 2.1 Der Fotoeffekt und der COMPTON-Effekt in der Schule

"Wann, wie und wozu werden Fotoeffekt und COMPTON-Effekt in der Schule behandelt?" Bei der Beantwortung dieser Frage erhält man beim Blick in ältere Physikbücher eine klare Antwort. Traditionell steht der Fotoeffekt am Anfang des Quantenphysikunterrichts und dient dem Einstieg in die Thematik. Dabei wird der Fotoeffekt experimentell angegangen und die experimentellen Varianten werden ausgiebig genutzt. Die Experimente haben den Zweck, die Quantisierung des Lichts überzeugend zu erzwingen. Der COMPTON-Effekt wird traditionellerweise zeitlich viel später behandelt, ist inhaltlich vom Fotoeffekt getrennt und soll den Impuls von Photonen experimentell absichern.

Folgende kritische Fragen sind erlaubt:

- Führen Fotoeffekt und COMPTON-Effekt zwingend zum Photon?
- Ist der Fotoeffekt *das* geeignete Schlüsselexperiment zum Einstieg in die Quantenphysik?
- Kann man heute noch den Fotoeffekt so lehren wie 1905 und dabei so tun, als sei seitdem nichts zum Fotoeffekt passiert?

Wenn in vielen Physikbüchern der Fotoeffekt am Anfang der Quantenphysik steht und wenn historisch vorgegangen wird, sollte man bedenken, dass der historische Weg auch didaktische Nachteile hat, indem er bei Schülern Vorstellungen aufbaut, die sich u. U. später lernhemmend auswirken. Beim Studium der Geschichte des Fotoeffektes stellt man fest, dass der Weg zur Quantenphysik für die Physiker verwirrend war und über viele Irrwege verlief (vgl. Zeittabelle). So hat der Fotoeffekt auf den sogenannten 'Dualismus' geführt: Licht verhält sich mal als Teilchen, mal als Welle. Es ist, je nach experimenteller Anordnung, eine Art Verkleidungskünstler. Der naive Welle-Teilchen-Dualismus "Mal Welle - mal Teilchen" ist didaktisch unbrauchbar und führt in die Irre. Die bornsche Wahrscheinlichkeitsinterpretation erfasst beide Aspekte widerspruchsfrei in einem einheitlichen Bild.

Man kann nämlich sehr einfach über das physikalische Verhalten des Lichtes, bzw. der Mikroobjekte sprechen: *Im Licht, bzw. in gleichartig präparierten Mikroobjekten, steckt 'Welliges', 'Körniges' (bzw. 'Quantiges') und 'Stochastisches', das mit einer (komplexen) Wellenfunktion beschrieben wird.*

FEYNMAN sagt: "Licht ist weder Teilchen noch Welle; es ist etwas Drittes". Er will damit sagen, es ist etwas ganz anderes. Es ist etwas, das mit klassischen Begriffen nicht beschreibbar ist.

Das 'Körnige' zeigt sich in Energiebrocken und in Impulsbrocken. Die Quantisierung bezieht sich also auf die Energie und nicht unbedingt auf die Teilchen selbst. EINSTEIN hat das in seiner Originalarbeit von 1905 genau gesehen. Später kam vieles wieder durcheinander. Insgesamt ist die Geschichte der Quantenphysik ein ständiges Neukonzipieren, Verwerfen und Zurechtrücken. Im Blick auf ideen- und wissengeschichtliche Entwicklungen ist dies didaktisch reizvoll, aber keine didaktische Vorlage.

Die fundamentalen Gleichungen, in denen 'Welliges' und 'Körniges' mit Energie und Impuls in Verbindung gebracht werden, sind von erstaunlicher Einfachheit:

Die DE BROGLIE-Gleichung  $p=h/\lambda$  und die EINSTEIN-Gleichung  $E=h\cdot f$ .

## 2.2 Didaktische Probleme beim Fotoeffekt und COMPTON-Effekt

Was könnte beim Weg über den Fotoeffekt am Anfang lernerschwerend sein?

Fotoeffekt und COMPTON-Effekt behandeln nicht das Verhalten von freien Mikroobjekten, wenn sie etwa durch Spalte, Interferometer gehen, sondern die Wechselwirkung von Photonen mit Materie (sprich Elektronen). Das Thema ist physikalisch viel komplexer, verwickelter, schwieriger, weil die Photonen dabei immer vernichtet werden und manchmal neue entstehen.

Der COMPTON-Effekt erscheint, wenn er viel später behandelt wird, als etwas ganz anderes als der Fotoeffekt. Dabei ist die Sache viel einfacher, wenn man Fotoeffekt und COMPTON-Effekt gemeinsam unter dem Gesichtspunkt der **Photon-Elektron-Wechselwirkung** betrachtet. Dann sind Fotoeffekt und COMPTON-Effekt physikalisch (fast) dasselbe. Es sind dann eben zwei verschiedene Kanäle der Photon-Elektron-Wechselwirkung.

Fotoeffekt und COMPTON-Effekt haben eine ganze Reihe von didaktischen Problemen im Schlepptau:

### (a) Das Quantisierungsproblem

- Der Fotoeffekt und COMPTON-Effekt führen nicht zwingend zum Photon, weil die Effekte auch semiklassisch gedeutet werden können. (vgl. [15])
- Die klassische Quantisierung setzt Photonen in das Strahlungsfeld mit didaktisch gravierenden Konsequenzen. "In vielen Untersuchungen (z. B. Lichtfeldt, 1992) wird festgestellt, daß die Schüler den Photonen Teilchencharakter zuschreiben, die vorsichtigeren Begriffe Energie-Portion oder Lichtquant werden zugunsten anschaulicherer Beschreibungen schnell aufgegeben. Es hat sich in der Regel ein Bild festgesetzt, in dem Photonen in ganz klassischem Sinne auf Elektronen prallen und diese aus dem Festkörper herauslösen. Es ist zu vermuten, daß man diese Verbindung, die die Schüler zwischen dem beobachteten Phänomen, der gegebenen Deutung und klassischen mechanistischen Vorstellungen herstellen, kaum aufbrechen kann, solange man am Photon an dieser Stelle des Unterrichts festhält." ([3], S. 16)
- Die quantenelektrodynamische Quantisierung quantisiert Feldmoden, die als Lösungen der Maxwell-Gleichungen unter Randbedingungen vorgegeben sind. Der Begriff der Quantisierung bezieht sich somit nicht auf die Natur, wie es die klassische Quantisierung tut, sondern auf die physikalische Theorie, so dass Photonen als Anregungszustände des Feldes auftreten. Letzteres kann aber in der Schule nicht didaktisch elementarisiert werden.

## Fotoeffekt

**1887 H. HERTZ**  
**1888 HALLWACHS**  
**1902 P. LENARD**  
 Fotoeffektexperimente

**1900 M. PLANCK**  
 Quantenherleitung der Strahlungsformel

**1905 A. EINSTEIN**  
 Lichtquantenhypothese  
 "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt"

**1909 J. STARK**  
 Überlegungen zur Erzeugung und Absorption von Röntgenstrahlung unter Einbezug der Impulseigenschaft der Quanten

**1911 R. A. MILLIKAN**  
 experimentelle Bestimmung der Elementarladung mit dem 'Öltröpfchenexperiment'

**1913 P. DEBYE und A. SOMMERFELD**  
 semiklassische Deutung des Fotoeffektes:  
 "Theorie des lichtelektrischen Effektes vom Standpunkt des Wirkungsquantums."

**1915 R. A. MILLIKAN**  
 experimentelle Bestätigung der EINSTEIN-Gleichung und experimentelle h-Bestimmung

**1916 A. EINSTEIN**  
 Ableitung der PLANCKschen Strahlungsformel mit Impulsübertrag durch Lichtquanten

**1921 A. EINSTEIN**  
 Nobelpreis für die Arbeit zur Lichtquantenhypothese

## COMPTON-Effekt

**1895 K. RÖNTGEN**  
 Entdeckung der X-Strahlen

**1900 P. VILLARD**  
 Entdeckung der Gamma - Strahlen

**1906 W.H. BRAGG**  
 Polarisationsexperimente zu Röntgenstrahlen

**1908 BARKLA - BRAGG - Kontroverse**  
 über die Natur der Strahlen (Welle-Korpuskel)

**1908 W.H. BRAGG**  
 Experimente zur Streustrahlung:  
 Streustrahlung enthält THOMSON-Streuung und COMPTON-Streustrahlung, die als materialabhängige charakteristische Strahlung interpretiert werden.

**1910 D.C. FLORANCE**  
 Absorptionsexperimente: Streukörperabhängigkeit der Absorptionskoeffizienten legen den Schluss nahe, dass die Sekundärstrahlung gestreute Primärstrahlung ist.

**1912 M. v. LAUE, W. FRIEDRICH**  
 LAUE-Beugungs-Experimente zur Röntgenstrahlung

**1912 W.H. BRAGG und L. BRAGG**  
 Röntgenspektroskopie mit dem BRAGG-Drehkristall-Spektrometer

**1922 A. H. COMPTON**  
 quantitative Messung der Wellenlängenverschiebung mit dem BRAGG-Spektrometer

**1922 P. DEBYE**  
 Theoretische Überlegungen zum COMPTON-Effekt

**1923 A.H. COMPTON**  
 quantitative Messung der Winkelabhängigkeit der Streustrahlung

**1924 A.H. COMPTON**  
 - Deutung des Effektes im Teilchenbild  
 - Deutung im Wellenbild mit DOPPLER-Effekt  
 weltweite Anerkennung des Effektes und seiner Deutung

**1927 E. SCHRÖDINGER**  
 wellentheoretische Deutung des COMPTON-Effektes

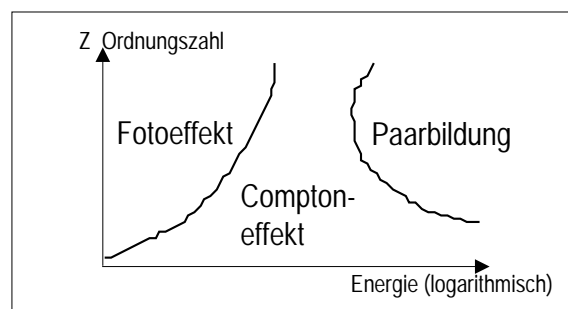
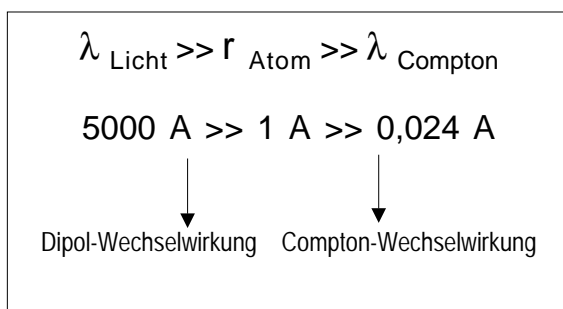
**1927 A.H. COMPTON**  
 Nobelpreis für die Arbeit zum COMPTON-Effekt

### (b) Das Dualismusproblem

- Mit einem Fotomultiplier, der einzelne Elementarakte misst (Fotoelektronenemissionen), tasten wir das Beugungsmuster der Lichtwellen im Doppelspaltexperiment ab. In ein und demselben Experiment haben wir gleichzeitig 'Welliges' und 'Quantiges'.
- Zum Nachweis des 'Quantigen' der Photonen beim Fotoeffekt und COMPTON-Effekt messen wir Frequenzen, also ein wesentliches Strukturelement des Wellenkonzeptes. Wie ist das dualistisch zu verstehen?
- Was ist Licht, wenn wir es gerade nicht beobachten? Diese Frage ist ebensowenig sinnvoll wie die Frage nach dem 'Photon unterwegs'. Im Gegensatz zu Elektronen gibt es für Photonen keine Zustandsfunktion, deren Betragsquadrat eine Wahrscheinlichkeitsdichte angibt. Da die Photonen als Bosonen nicht dem Pauli-Prinzip gehorchen, kann deren Zahl in einem bestimmten Quantenzustand beliebig groß werden, z. B. beim Laser.

### (c) Das Wechselwirkungsproblem

- Wer über Photonen redet, muss über die Wechselwirkung von Photonen mit Materie reden, denn (fast) alles, was man über Photonen weiß, weiß man aus Wechselwirkungen von Photonen mit Materie. Nur da treten Photonen in Erscheinung. Photonen können bei Wechselwirkungsprozessen erzeugt und vernichtet werden, wenn nur die Energie- und Impulsbilanz stimmen. Fotoeffekt und COMPTON-Effekt demonstrieren genau dies und sind besonders häufig vorkommende Wechselwirkungsprozesse.
- Fotoeffekt und COMPTON-Effekt durch die Wechselwirkungsbrille betrachtet gehören zusammen und sind in der Sprache der Wechselwirkung zwei verschiedene Kanäle derselben Wechselwirkung, die energieabhängig mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit auftreten.



### (d) Verdrängte Fragen zum Fotoeffekt und COMPTON-Effekt

Es gibt eine Reihe von Fragen, die sich dem sehr kritischen Lerner stellen müssten.

- Wo kommen die Elektronen beim Fotoeffekt und COMPTON-Effekt her? An welchen Elektronen (innere Schale, äußere Schale, freie Elektronen) finden die Effekte überhaupt statt? Das führt auf die Frage nach der verschobenen Linie im Spektrum.

- Wie ist die Winkelverteilung der Fotoelektronen? Aussagen dazu erhält man beispielsweise bei der Fotoionisation in Kalium-Dampf.
- Wie groß ist die Quantenausbeute bei innerem bzw. äußerem Fotoeffekt?
- Wie ist folgender Effekt zu verstehen? Licht fällt auf eine extrem dünne Halbleiterschicht und erzeugt Interferenz an dünnen Schichten, zeigt also 'Welliges'. Gleichzeitig aber findet Fotoeffekt statt, also 'Körniges' bzw. 'Quantiges'. (Hier könnte man auch die gerichtete Reflexion an Metallschichten und den Fotoeffekt an Metall anführen.)
- Warum redet man beim Fotoeffekt nicht über den Impuls? Dabei muss doch auch beim Fotoeffekt der Impulssatz erfüllt sein. (Dass Photonen Impuls tragen, wird aus dem Kometenschweif als Lichtdruck deutlich.)
- Wie ist die räumliche Intensitätsverteilung und die Polarisierung der COMPTON-Streustrahlung?
- Wie ist die Energieverteilung der COMPTON-Elektronen?
- Wie versteht man den Unterschied vom Energie-Impuls-Austausch beim zentralen Stoß newtonscher Teilchen, wo maximale Energie ausgetauscht wird und dem 'zentralen Stoß' ( $\tau=0^\circ$ ) zwischen Photon und Elektron des COMPTON-Effektes, wo kein Energieaustausch stattfindet?
- Warum muss man beim COMPTON-Effekt relativistisch rechnen? Was ist und woher rührt der Unterschied?
- Was steckt hinter der Tatsache, dass der COMPTON-Effekt an extrem schnellen Elektronen, also hochenergetischen Elektronen, dem Stoß zweier 'newtonscher Teilchen' entspricht? Dahinter steht die Universalität des Hochenergieverhaltens: Im Hochenergiebereich sind alle Teilchen hinsichtlich des Energie-Impuls-Transportes gleich.

Diese Fragen müssen keinsfalls im Unterricht angeschnitten werden. Sie sind allerdings viel einfacher zu verstehen, wenn man Fotoeffekt und COMPTON-Effekt als zwei Kanäle der Photon-Elektron-Wechselwirkung betrachtet.

### 2.3 Die didaktische Funktion und der didaktische Ort von Fotoeffekt und COMPTON-Effekt

Die didaktische Funktion des Fotoeffektes liegt nicht unbedingt darin, ein Schlüssel-experiment zum Einstieg in die Quantenphysik der Schule zu sein. Die didaktische Funktion des Fotoeffektes liegt vielmehr

- in der Untermauerung des 'Körnigen' im Licht, im Sinne von Energiebrocken (Energiequanten), wobei das 'Körnige' anderweitig eingeführt wurde (z.B. TAYLOR-Experiment)
- in der experimentellen Bestätigung der EINSTEIN-Gleichung:  $E = h \cdot f = \frac{1}{2} \cdot m v^2 + W_A$ .

Die didaktische Funktion des COMPTON-Effektes liegt

- in der Untermauerung des 'Körnigen' im Licht, im Sinne von Impulsbrocken (Impulsquanten)
- in der experimentellen Bestätigung der Wellenlängenvergrößerung und der Gültigkeit von Energie- und Impulssatz.

Die didaktische Funktion von Fotoeffekt und COMPTON-Effekt *zusammen* liegt

- in der Untermauerung der Vorstellung von Photonen als Energie- und Impulsbrocken, die bei Wechselwirkungsprozessen der Erhaltung von Energie und Impuls genügen
- in der einheitlichen Betrachtung der Photon-Elektron-Wechselwirkung im Sinne verschiedener Wechselwirkungskanäle
- in der Vielzahl der experimentellen Anwendungen von Fotoeffekt und COMPTON-Effekt bei der Absorption von  $\gamma$ -Strahlung, Röntgenstrahlung und Licht.

Dann aber liegt der didaktische Ort von Fotoeffekt und COMPTON-Effekt

- *nicht* unbedingt am Anfang, sondern mehr in der Mitte des Kurses
- in der experimentellen Bestätigung entsprechender Gleichungen
- in der möglichst einheitlichen und damit zeitlich beisammenliegenden Betrachtungsweise als Photon-Elektron-Wechselwirkung.

## II. Unterrichtspraktischer Teil - Ein Unterrichtsvorschlag

Der Unterricht in Quantenphysik muss stets den besonderen Verstehensbegriff beim Lernen von Quantenphysik im Blick haben. Verstehen in der Quantenphysik heißt:

***Neue Experimente und Ergebnisse*** (z. B. 'Körniges' in Interferenzstreifen) **mit neuen Grundideen** (z. B. Quantisierung) **in eine neue Sprache** (z. B. Wahrscheinlichkeitswelle, Wahrscheinlichkeitsdichte) **bringen**.

Die neue Sprache benutzt alte Wörter. Die Sprache ist aber gleichzeitig schon Deutung. Es ist Aufgabe des Lehrers und der Unterrichtsmaterialien, kurz des Unterrichtsarrangements, diesen Prozess der Sprach- und Deutungsverschiebung zu initiieren, zu gestalten, zu begleiten. Im Kern ist es die neue Sprache, die besondere didaktische Aufmerksamkeit verdient. Es sind dabei allerdings nicht vordergründig die neuen Sprachmuster, sondern die damit verbundenen Vorstellungen und Denkmuster.

*Beispiel:*

Schüler 1 sagt: "Die Elektronen verhalten sich mal wie Teilchen und mal wie Wellen."

Schüler 2 sagt: "Beim Auftreffen des Elektrons auf den Schirm kollabiert die Wellenfunktion durch den Messakt und die Intensitätsverteilung beschreibt die Auftreffwahrscheinlichkeit."

Die Aussage von Schüler 2 muss nicht Ausdruck eines tieferen Verständnisses der Sachverhalte sein, sondern kann auswendig gelernt und nachgebetet worden sein. Ebenso wenig kann man aus der Aussage von Schüler 1 Rückschlüsse auf sein Verstehen ziehen. Seiner Aussage kann ein sehr schlichtes dualistisches Denkmuster zugrunde liegen in dem Sinne, dass die Mikroobjekte als Verkleidungskünstler den Experimentator necken wollen und ein Zufallsspiel spielen. Hinter der Aussage können aber auch zutreffende Vorstellungen von einer Subjekt-Objekt-Verschränkung stehen, die den Experimentator und die experimentelle Anordnung der präparierten Mikroobjekte mitdenken.

*Das andere Denken und die andere Sprache in der Quantenphysik sind nicht im einmaligen Handstreich zu erlangen, sondern bedürfen einer intensiven, längeren Pflege. Es bedarf des Dialogs in der Lerngemeinschaft. Vorstellungen und Sprache müssen sich im Gebrauch an der Sache, nämlich an den Inhalten, abschleifen. Die neue Sprache muss 'ausgehandelt' werden. Mit Aushandeln ist der Prozess des Bedeutungsabgleichs gemeint.*

Bekanntlich sind für die Zustandsfunktion u. a. folgende Begriffe im Umlauf: Wellenfunktion, Materiewelle, DE-BROGLIE-Welle, Führungswelle, Stellvertreterwelle, Gespensterwelle, Wellenamplitude, Phasenwelle, SCHRÖDINGER-Welle,  $\Psi$ -Funktion, Wahrscheinlichkeitswelle. Die jeweiligen Begriffe evozieren unterschiedliche erkenntnistheoretische Akzentuierungen, obwohl der mathematischen Beschreibung derselbe Formalismus zugrunde liegt. Der Begriff ist gleichzeitig Träger von Vorstellungen und Bildern. Diese müssen im Gespräch abgeglichen und abgeschliffen, kurz ausgehandelt werden; getreu dem Diktum von HEISENBERG: "Physik entsteht im Gespräch."

Das quantenmechanische Denken und Sprechen zielt im Unterricht in einem mühsamen Prozess auf die folgenden wichtigen Punkte ab:

- Die Unterscheidung zwischen einem Phänomen und der Beobachtung des Phänomens.
- Das Mitdenken der Subjekt-Objekt-Verschrankeung.
- Die Beobachtung des Phänomens erfordert die Sprache der klassischen Physik.
- Die Aussagen der Quantenphysik sind Wahrscheinlichkeitsaussagen.
- Die Theorie erfordert die Sprache der klassischen Physik in neuer naturphilosophischer Deutung.

Für den Unterricht in Quantenphysik ergeben sich daraus als Rahmenbedingungen wichtige Konsequenzen:

- Der Unterricht in Quantenphysik ist didaktisch und methodisch in hohem Maße auf das Gespräch und auf das Aushandeln von Begriffen hin ausgelegt.
- Anders als in den klassischen Gebieten der Physik ist der Lernende zu neuen Konstruktionen in seinem eigenen Kopf verpflichtet. Verstehen der Quantenphysik ist **nur** auf der Basis von Umdenken und Neudenken möglich. Unterricht in Quantenphysik ist nur so gut, wie es gelingt, *naturphilosophische Grundfragen bewusst zu machen und naturwissenschaftliche Antworten anzubieten.*

Der nachfolgende Unterrichtsvorschlag umfasst die Bausteine **Mikroobjekte I, II, III** des Lehrplans mit einem Zeitansatz von 30 Unterrichtsstunden. Der Wahlbaustein **Mikroobjekte II** ist in den Baustein **Mikroobjekte I** integriert, behandelt das Schulexperiment mit der Elektronenbeugungsröhre und ist der Absicht des Bausteins entsprechend eine experimentelle Vertiefungsinsel. Auf Experimente zur Röntgenstrahlung und Grenzwellenlänge wird hier verzichtet. Der Baustein **Interpretationen der Quantenphysik** wird in diesem Vorschlag nicht behandelt. Dazu wird auf die Schrift des ILF [16] verwiesen.

Der Unterrichtsvorschlag setzt das Doppelspaltexperiment mit Elektronen (JÖNSSON-Experiment) an den Anfang. Parallel dazu wird das Doppelspaltexperiment mit verdünntem Licht (TAYLOR-Experiment) mitbehandelt. Dem Doppelspaltexperiment vorgeschaltet ist eine einführende und wiederholende kurze Teileinheit zur Präparation von Mikroobjekten. Fotoeffekt und COMPTON-Effekt werden unter dem Gesichtspunkt der Photon-Elektron-Wechselwirkung behandelt.

Sehr zu empfehlen ist das Simulationsprogramm des Münchener Unterrichtskonzepts zur Quantenmechanik. Dies kann kostenlos heruntergeladen werden und ersetzt die in die Jahre gekommenen FWU-Filme (siehe Anhang):

Download liegt hier: <http://www.physik.uni-muenchen.de/sektion/didaktik/>

Darüberhinaus bietet das Institut für Didaktik der Physik an der Universität München eine elektronische Lehrerfortbildung zu der Thematik an.



**BAUSTEINE im LEHRPLAN PHYSIK-Leistungsfach**

<b>Mikroobjekte I</b>		<b>10</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- quantenmechanisches Verhalten von freien Elektronen und Photonen am Doppelspalt (experimentelle Befunde)</li> <li>- Wahrscheinlichkeitswelle</li> <li>- Heisenberg'sche Unschärferelation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• In die quantenphysikalische Denkweise als Fundament naturwissenschaftlicher Bildung einführen.</li> <li>• Die Problematik der Begriffsbildung auf der Basis der experimentellen Befunde am Doppelspaltexperiment thematisieren.</li> </ul>	

<b>Mikroobjekte II</b>		<b>10</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Braggreflexion; Elektronenbeugung</li> <li>- Röntgenstrahlung; Grenzwellenlänge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Durch experimentelles Arbeiten den Beschäftigungsgrad erhöhen.</li> <li>• Dieser Baustein ist eine experimentelle Vertiefungsinsel zu den Bausteinen <b>Mikroobjekte I</b> und <b>Mikroobjekte III</b>.</li> </ul>	

<b>Mikroobjekte III</b>		<b>10</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fotoeffekt</li> <li>- Comptoneffekt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Solide Kenntnisse über experimentelle Befunde bereitstellen und Fertigkeiten im formalen Umgang fördern.</li> <li>• Die Effekte als die Formen der Photon-Elektron-Wechselwirkung verdeutlichen. Beim traditionellen Einstieg in die Quantenphysik über den Fotoeffekt müsste dieser vorgezogen werden.</li> </ul>	

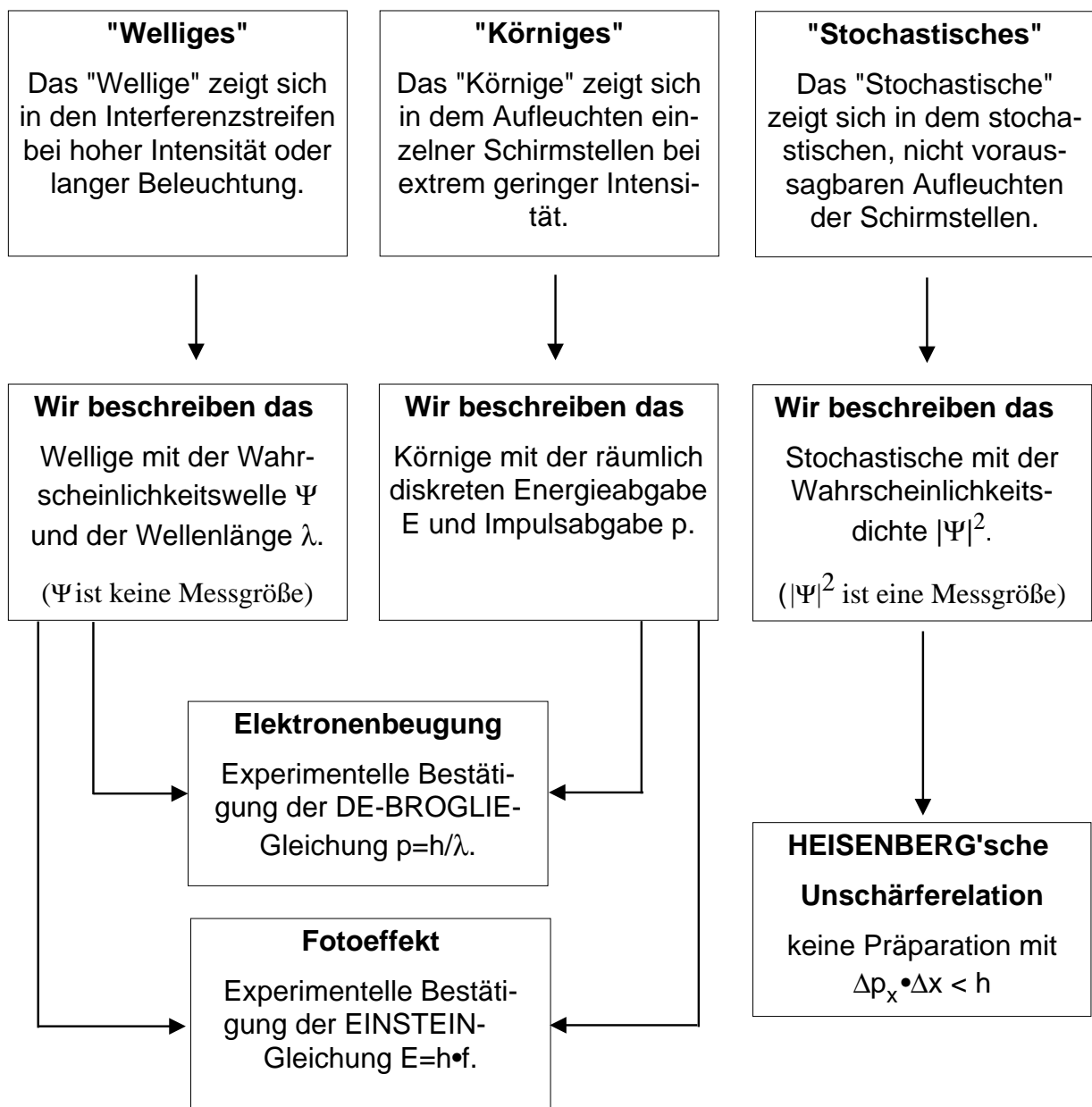
<b>Interpretationen der Quantenphysik</b>		<b>10</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Naturphilosophische Probleme (Realität, Indeterminismus, Messprozess, ...)</li> <li>- Interpretationen der Quantentheorie und erkenntnistheoretische Fragestellungen</li> <li>- experimentelle Befunde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Naturphilosophische Grundfragen bewusst machen und naturwissenschaftliche Antworten anbieten.</li> <li>• Die Problematik der Interpretationen auf der Basis der experimentellen Befunde am Doppelspaltexperiment thematisieren.</li> </ul>	

# Welliges, Körniges und Stochastisches in der Quantenphysik

"Die zentralen Geheimnisse der Quantenphysik stecken im Doppelspaltexperiment"

Doppelspaltexperimente oder ähnliche raffinierte Experimentieranordnungen dienen dazu, den bewegten Mikroobjekten ihre Geheimnisse zu entlocken.

Doppelspaltexperimente mit freien und gleichartig präparierten Elektronen (JÖNSSON-Experiment) und Photonen (TAYLOR-Experiment) zeigen für freie und gleichartig präparierte Mikroobjekte:



# 1. Das quantenmechanische Verhalten von freien Elektronen und Photonen am Doppelspalt

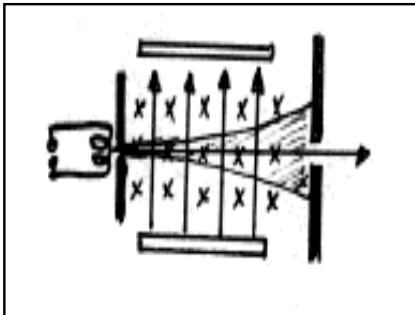
## 1.1. Die Präparation von Mikroobjekten

### *Didaktischer Kommentar:*

Nur über das Verhalten von gleichartig präparierten Mikroobjekten können experimentell bestätigbare Aussagen gemacht werden. Entsprechend der Objektklasse (Fermionen, Bosonen) und entsprechend der Messabsicht sind verschiedene Präparationsmethoden im Gebrauch, die sich gut in die Schulphysik einbinden lassen und eine Gelegenheit zur Wiederholung bieten. Bekannte Phänomene erscheinen in einem neuen Licht.

### *Unterrichtsskizze:*

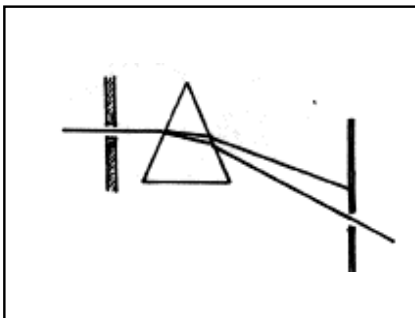
#### 1. Impulspräparation von Elektronen (WIEN-Filter)



Das WIEN-Filter ist ein Experiment, das in der Schulphysik beim E-Feld, B-Feld behandelt wird und bei Teilchenbeschleunigern Anwendung findet.

Mit einem WIEN-Filter kann man durch Ausblenden des geradlinigen Strahls alle Elektronen auf den gleichen Impuls präparieren. Ein nachgeschaltetes zweites WIEN-Filter als Testapparat bestätigt das.

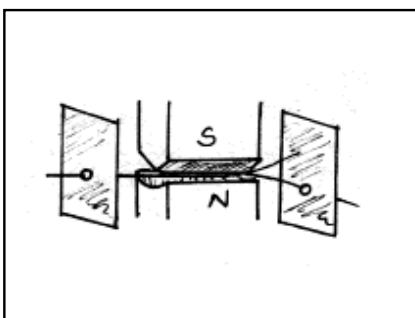
#### 2. Frequenzpräparation von Licht (Photonen)



Das Prisma ist den Schülern bereits aus der Optik der Mittelstufe bekannt. Es sortiert Licht nach Farben, in der Sprache der Wellenoptik nach Frequenzen.

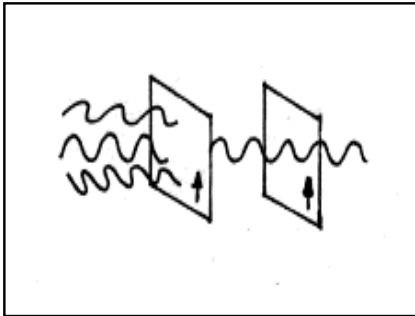
Wie bereits NEWTON in seinen Dispersionsexperimenten nachwies, bewirkt ein zweites nachgeschaltetes Prisma keine weitere Aufspaltung, was als Testapparat die Frequenzpräparation bestätigt.

#### 3. Spinpräparation von Atomen (STERN-GERLACH-Experiment)



Bei der Suche nach weiteren Größen, auf die man Mikroobjekte präparieren kann, um anschließend gezielte Experimente durchzuführen, stößt man auf das STERN-GERLACH-Experiment, das Atome auf den Spin präpariert. Der Spin kann hier nur als eine Art Drehimpuls benannt werden. Auf das Experiment kann man verzichten, wenn es später nicht aufgegriffen wird. Ein kurzer Lehrervortrag bietet sich an.

#### 4. Polarisationspräparation von Licht (Photonen)



Der Spinpräparation von Fermionen entspricht in gewissem Sinne der Polarisationspräparation von Bosonen (Unterschied: verschränkte Zustände). Auf die Polarisationspräparation wird bei vielen neuesten Experimenten mit verzögerter Entscheidung (delayed choice, Quantenradierer) Bezug genommen. Man kann auch das Doppelspaltexperiment mit unterschiedlich polarisiertem Licht durchführen (FEYNMAN-Experimente).

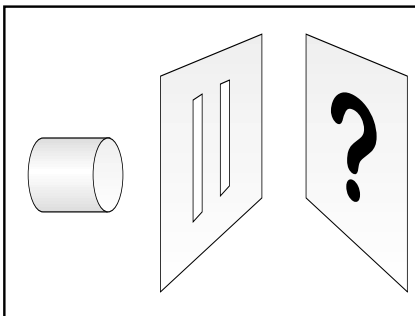
### 1.2 Das JÖNSSON-Experiment und das TAYLOR-Experiment

#### *Didaktischer Kommentar:*

Das JÖNSSON-Experiment fungiert als Verbindungsglied zwischen dem klassischen Doppelspaltexperiment mit Wellen und der quantenmechanischen Betrachtungsweise.

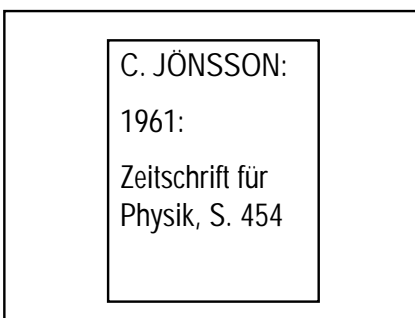
#### *Unterrichtsskizze:*

##### 1. Vermutung



Das DSE mit Elektronen wird schematisch beschrieben, skizziert und vorgestellt. Es empfiehlt sich eine Tafelskizze, Folie oder ein Pappmodell. "Wir beschießen einen geeigneten Doppelspalt mit impulspräparierten Elektronen. Was ist auf dem Fluoreszenzschirm zu erwarten?" Die Schüler äußern Vermutungen über das zu erwartende Ergebnis.

##### 2. JÖNSSON-Originalexperiment

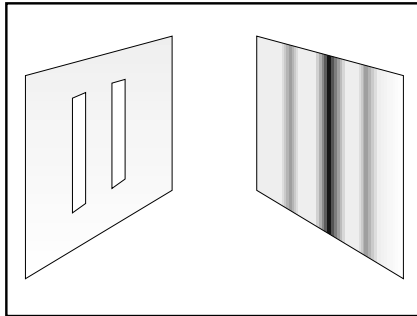


JÖNSSON's experimentelle Probleme sind:

- Herstellung winziger Spalte,
- kohärente Ausleuchtung des Doppelspalt,
- Vergrößerung der Interferenzstreifen.

Das Originalexperiment wird anhand geeigneter Passagen aus der Originalarbeit vorgestellt. Schülerreferate über die Spaltherstellung bieten sich an.

### 3. Trickfilm und/oder Computersimulation

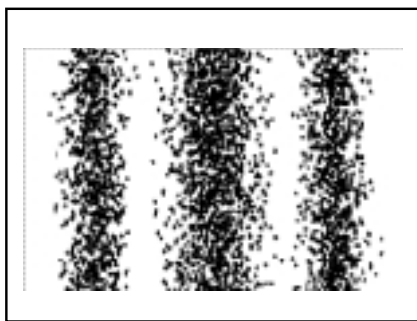


Eine Wiederholung und Festigung der überraschenden experimentellen Befunde am JÖNSSON-Experiment können anhand des FWU-Trickfilms Nr. 4201257 wiederholt und gefestigt werden.

Hervorragend geeignet ist die Computersimulation im Münchener Unterrichtskonzept:

<http://www.physik.uni-muenchen.de/sektion/didaktik/>

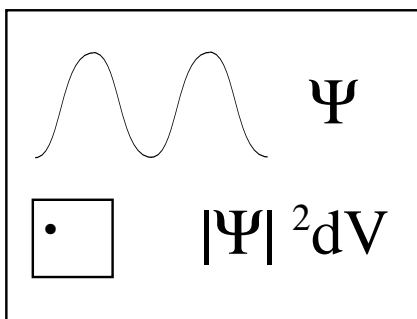
### 4. Auswertung der experimentellen Befunde



Die Auswertung der experimentellen Befunde zeigt: Impulspräparierte Elektronen zeigen in ihrem Verhalten beim Durchgang durch geeignete Doppelspalte bei hoher bzw. niedriger Intensität

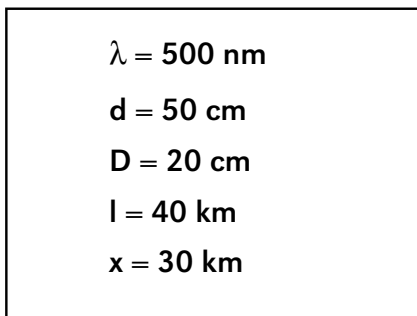
- Welliges
- Körniges
- Stochastisches.

### 5. Einführung der Wahrscheinlichkeitswelle



Verstehen heißt, die Sachverhalte im Kopf zusammenzubringen. Im vorliegenden Fall, muss das Wellige, das Körnige und das Stochastische im Kopf zusammengebracht werden. Die Wahrscheinlichkeitswelle  $\Psi$  ist ein begriffliches Konstrukt, das dies leistet.  $\Psi$  selbst ist keine Messgröße, sondern  $|\Psi|^2 dV$ .

### 6. Analogexperiment mit Licht



Ein Analoggedankenexperiment mit grünem Licht der Wellenlänge  $\lambda = 500 \text{ nm}$  zeigt nochmals die experimentellen Schwierigkeiten, die JÖNSSON zu meistern hatte. Dazu vergrößert man den JÖNSSON-Aufbau um den Maßstab der Wellenlängenverhältnisse, nämlich Lichtwellenlänge : Elektronenwellenlänge =  $5 \cdot 10^{-7} \text{ m} : 5 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 10^5$ .

## 7. Plausibilitätsbetrachtungen

$$p \approx 1,2 \cdot 10^{-22} \text{ Ns}$$
$$\lambda \approx 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$
$$p \cdot \lambda \approx 6 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \approx h$$

Die experimentellen Daten des JÖNSSON-Experimentes lassen sogar eine grobe Abschätzung des Produktes  $p \cdot \lambda = h$  zu.

Plausibilitätsbetrachtungen zeigen einen Zusammenhang zwischen dem Impuls der Elektronen und der ihnen zugeordneten Wellenlänge. Dies dient der Vorbereitung der DE-BROGLIE-Gleichung  $p = h/\lambda$ .

## 8. Das TAYLOR-Experiment

TAYLOR:  
1910:  
Interference  
Frings with  
feeble light

Das TAYLOR-Experiment aus dem Jahre 1910 ist ein Beugungsexperiment an einer Nadelspitze mit extrem verdünntem Licht. Die Lektüre des kurzen Aufsatzes in englischer Originalsprache ist angemessen und zumutbar. Ggf. kann das Experiment auch parallel zum JÖNSSON-Experiment behandelt werden. Unterschiede zwischen Fermionen und Bosonen können erwähnt werden.

## 9. Zusammenfassung

Elektronen  $\longleftrightarrow$  Photonen

- Welliges
- Körniges
- Stochastisches

Im Rückblick wird das gemeinsame und unterschiedliche Verhalten von präparierten freien Elektronen und Photonen beim Durchgang durch einen Doppelspalt wiederholt und zusammengefasst. Gleichzeitig werden Ausblicke auf das anstehende Programm gegeben.

### 1.3 Die Elektronenbeugungsröhre

#### *Didaktischer Kommentar:*

Das Experiment mit der Elektronenbeugungsröhre ist die schulische Version des JÖNSSON-Experimentes. Obgleich durch das Verfahren der BRAGG-Reflexion fachlich schwieriger, ist es experimentell leicht realisierbar. Die Natur gibt anhand von Einkristallen Gitter in der entsprechenden Größenordnung vor, womit die Herstellung materiefreier Spalte nach JÖNSSON umgangen werden kann, was auch herstellungstechnisch außerhalb der schulischen Möglichkeiten liegt.

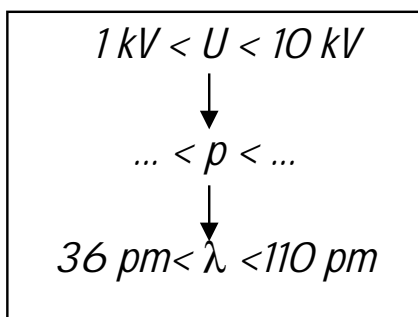
## Unterrichtsskizze:

### 1. Historische Bemerkungen

<i>Louis de BROGLIE</i> 1923 <i>Thesis</i> $p=h/\lambda$ 1929 <i>Nobelpreis</i>
<i>DAVISSON, GERMER, THOMSON</i> 1927 <i>Kristallgitterexperimente</i> 1937 <i>Nobelpreis</i>

Vom JÖNSSON-Experiment herkommend, stellt sich die Frage: "Gibt es in der Schule eine Möglichkeit, Elektroneninterferenzen experimentell zu zeigen?"

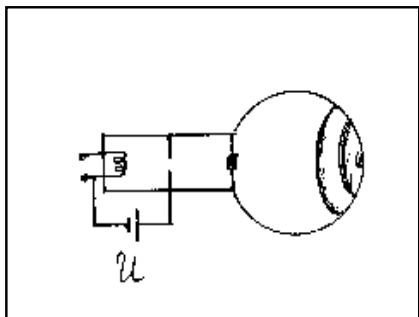
### 2. Abschätzungen



Die Schulgeräte lassen nur einen gewissen Rahmen zu:

- Sichtbarmachung von Elektronen an fluoreszierenden Schirmen erfordert eine Mindestspannung von 1kV.
- Maximale Beschleunigungsspannungen in der Schule liegen bei etwa 5kV - 10 kV.
- Nach DE-BROGLIE liegt die Wellenlänge dann bei etwa  $10^{-10}$ m. Die Natur hat 'Gitter' in Form von Kristallgittern.

### 3. Experiment



Didaktisch wichtig: Die Elektronenbeugung wird hier *nicht* induktiv zur Erkenntnisgewinnung eingesetzt, *nicht* als Überraschungsexperiment, sondern wird genutzt zur Überprüfung von prinzipiell Bekanntem. Anschließend wird die Fragestellung im Vergleich zum JÖNSSON-Experiment rückwärts aufgerollt.

### 4. Fragen

<i>Fragen:</i> <i>(a) Wie ?</i> <i>(b) Warum ?</i>
--

Im Zusammenhang mit den Beugungsringen statt Streifen stellen sich eine Reihe interessanter physikalischer Fragen:

- Wie lässt sich die Entstehung der Ringe erklären
- Wie hängt der Ringradius von der Beschleunigungsspannung ab?
- Warum sieht man mehrere Ringe? Ihre Deutung?

## 5. Deutung der Ringe



- Die Deutung der Ringe führt auf die Beugung an stochastisch verteilten Einkristallen. (-> Ringe statt Streifen)
- Die Tatsache, dass zwei Netzaabstände, zwei Gitterkonstanten beteiligt sind, führt zu zwei Ringen erster Ordnung.

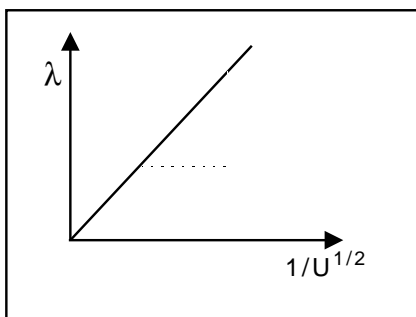
## 6. Auswertung

*BRAGG-Gleichung*

$$2d \cdot \sin \alpha = n \cdot \lambda$$

- Die Deutung der Ringe führt auf die Beugung an stochastisch verteilten Einkristallen (→ Ringe statt Streifen).
- Die Tatsache, dass zwei Netzaabstände, zwei Gitterkonstanten beteiligt sind, führt zu zwei Ringen erster Ordnung.

## 7. Bestätigung der DE-BROGLIE-Gleichung

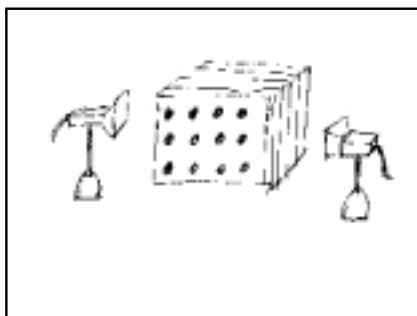


Trägt man die Wellenlänge  $\lambda$  gegen  $1/U^{1/2}$  auf, so erhält man eine Gerade.

Über den Energiesatz:  $1/2 \cdot mv^2 = eU$  kann man durch Einsetzen aus der Steigung die DE-BROGLIE-Gleichung bestätigen:

$$\lambda = h/p = h/mv = h/(2emU)^{1/2}$$

## 8. Analoge Experimente mit anderen Wellen



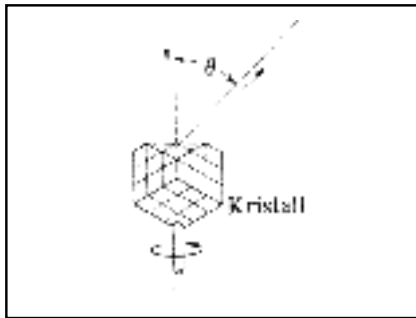
Analoge Experimente zur BRAGG-Reflexion lassen sich durchführen mit:

- Mikrowellen am Styropor-Nagel-Gitter
- Drehkristallmethode mit Röntgenstrahlen an NaCL-Kristallen
- DEBYE-SCHERRER-Verfahren mit Röntgenstrahlen.

Der Zeitrahmen ist zu beachten.



## 9. Anwendungen und Übungen



Das Verfahren hat Anwendungen:

- in der Untersuchung von Kristallstrukturen,
- bei der Elektronenmikroskopie.

Hier ist der Zeitrahmen zu beachten.

### 1.4 Erkenntnistheoretische Positionen zum Doppelspaltexperiment

#### *Didaktischer Kommentar:*

Das Doppelspaltexperiment liefert im Sinne von Erfahrungstatsachen eine ganze Reihe von Eigenschaften gleichartig präparierter Mikroobjekte. Die gleichartige Präparation der Mikroobjekte lenkt den Blick auf Quantenphänomene als stochastische Phänomene. Die Nähe zu einer Ensemble-Deutung ist groß, schließt aber andere nicht aus, sofern man sich an die experimentellen Befunde als kleinster gemeinsamer 'interpretationsarmer' Nenner hält. Interpretationsfrei sind weder Befunde noch eine Auflistung von Eigenschaften. So wird man frühzeitig an die Frage herangeführt, ob sich die Wellenfunktion auf einzelne Mikroobjekte oder nur auf eine Ensemble von Mikroobjekten bezieht.

Das Doppelspaltexperiment lässt viele Interpretationen zu. Bereits in einer frühen Phase lassen sich zugrunde liegende erkenntnistheoretische Positionen erarbeiten. Didaktisch vordringlich ist es, den Schülerinnen und Schülern bewusst zu machen, dass jedem Herangehen an die 'objektiven' Eigenschaften des Verhaltens gleichartig präparierter Mikroobjekte bereits implizit erkenntnistheoretische Positionen mitschwingen, die jeder meistens unbewusst mit einbringt. Das vordringliche Ziel dieses Abschnittes ist es, den Schülerinnen und Schülern das implizite Mitschwingen von 'metaphysischen Hintergrundüberzeugungen' bewusst zu machen. Das erleichtert später den Zugang zu den verschiedenen Interpretationen der Quantenphysik im Baustein **Interpretationen der Quantenphysik**. Falls man diesen Baustein nicht behandeln möchte, kann man es bei dem nachfolgenden Vorgehen belassen.

Didaktisch entscheidend ist die Anbindung an die **eigenen** metaphysischen Hintergrundüberzeugungen. Dies geschieht hier durch Vorlage von 28 verschiedenen Aussagen zum Doppelspaltexperiment. Es handelt sich dabei bis auf wenige Ausnahmen um Zitate berühmter Physiker, meistens Nobelpreisträger. Die Zitate sind allerdings auf das Doppelspaltexperiment 'umgeschrieben'. Durch diese Methode wird einerseits die Seriosität der verschiedenen erkenntnistheoretischen Positionen unterstrichen und andererseits die Zahl der Interpretationen begrenzt. Mit diesem unterrichtsmethodischen Vorgehen wird folgendes erreicht:

- Die Schülerinnen und Schüler haben eine konkrete Vorlage.
- Sie können ihre eigene erkenntnistheoretische Position markieren und auf Inkonsistenzen hin überprüfen.
- Egal wie sich sich erkenntnistheoretisch bekennen, sie sind in 'guter Gesellschaft'.
- Es entsteht ein breites Spektrum an Interpretationen, ohne vorzeitige Einengung.
- Es wird eine lebendige Diskussion ermöglicht.
- Es wird sich mit dem Doppelspaltexperiment aus einer anderen Perspektive heraus beschäftigt, nämlich der erkenntnistheoretischen. Dadurch wird der Intensitätsgrad der Beschäftigung mit dem Doppelspaltexperiment erhöht.

### ***Unterrichtsskizze:***

Die nachfolgend genannten Eigenschaften des Verhaltens von Mikroobjekten sind das auflistende und zusammenfassende Ergebnis eines Unterrichtsganges, für den sich verschiedene unterrichtliche Wege anbieten:

- fragend-entwickelndes Gespräch
- Lektüre eines geeigneten Readers mit anschließender Aussprache
- Lehrerreferat

Zur Einführung in die erkenntnistheoretischen Positionen im Zusammenhang mit dem Verhalten von freien Mikroobjekten bietet sich folgendes Vorgehen an:

Den Schülerinnen und Schülern wird die folgende Liste mit 28 erkenntnistheoretischen Positionen vorgelegt. Sie sollen diejenigen markieren, denen sie sich anschließen. Eine Blamage ist bis auf zwei leicht erkennbare Aussagen nicht möglich, da alle von berühmten Physikern stammen.

Nach dem individuellen Ankreuzen wird auf einer Folienkopie eine Strichliste aufgenommen, wodurch ein Bild der Positionen der gesamten Klasse deutlich wird. Anschließend können die verschiedenen Aussagen klassifiziert werden (siehe unten). Vor jede Aussage kann der entsprechende Buchstabe notiert werden. Der Vergleich mit den eigenen Markierungen schafft Identifikationen mit den verschiedenen Interpretationsrichtungen. Im Baustein **Interpretationen der Quantenphysik** kann diese Liste Ausgangspunkt für die eingehende Beschäftigung mit Interpretationsfragen sein. Bei Verzicht auf den Baustein wird zumindest eine minimale Beschäftigung mit Interpretationsfragen über persönliche Positionsreflexion erreicht.

## 1. Verhalten von Mikroobjekten

<p><b>Verhalten von Mikroobjekten</b></p> <p>1. ...</p> <p>2. ...</p> <p>3. ....</p>
--

Zusammenfassend und wiederholend werden die wichtigsten Eigenschaften des Verhaltens freier Mikroobjekte zusammengetragen.

## 2. Erkenntnistheoretische Positionen zum Doppelspaltexperiment

<p><b>Erkenntnistheoretische Positionen zum Doppelspalt:</b></p> <p>1. ....</p> <p>2. ....</p>
--

Es wird eine Liste mit 28 erkenntnistheoretischen Positionen vorgelegt. Die Schüler sollen die markieren, denen sie sich anschließen.

Anschließend Vergleich und Diskussion. Vorstellung historischer und aktueller Interpretationen.

## 1.5 HEISENBERG'sche Unschärferelation

### *Didaktischer Kommentar:*

Die HEISENBERG'sche Unschärferelation wird sprachlich in die Unmöglichkeit-Formulierung am Doppelspalt gefasst.

*Es ist nicht möglich, eine Vielzahl (Ensemble) von Elektronen beim Durchgang durch einen Doppelspalt so zu präparieren, dass deren Ortsunschärfe und deren Impulsunschärfe gleichzeitig beliebig klein gemacht werden können.*

Positiv formuliert: *Bestimmt man für eine Vielzahl von Mikroobjekten den Ort und erhält eine mittlere Ortsungenauigkeit  $\Delta x$ , so lässt sich die mittlere Genauigkeit einer gleichzeitig stattfindenden Impulsmessung  $\Delta p_x$  prinzipiell nicht unter einen Wert senken, der sich aus der Unschärferelation  $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h/4\pi$  ergibt.*

Didaktisch hat diese Formulierung den Vorzug, dass sie zunächst noch andere Interpretationswege offen hält. Die statistische Interpretation stellt eine Minimalinterpretation dar. Erkenntnistheoretisch ist zu beachten:

- Sie bezieht sich nicht auf einzelne Mikroobjekte, sondern auf ein Ensemble von identisch präparierten Systemen (also einen Zustand).
- Sie gibt eine objektive Tatsache, nämlich die Unmöglichkeit einer bestimmten Präparation wieder.

Ein weiterer Vorzug liegt darin, dass sich die Schüler diese Unmöglichkeit-Formulierung leicht merken können. Es ist wichtig, dass die HEISENBERG'sche Unschärferelation an Beispielen immer wieder sprachlich in verschiedenen Formulierungen angewandt wird. So sollte sie auch mit dem quantenmechanischen Fundamentalprinzip in Beziehung gesetzt werden. Es ist sogar sinnvoll, dieses an den Anfang zu stellen und die HEISENBERG'sche Unschärferelation als Ausdruck des Fundamentalprinzips aufzufassen.

Weiterhin ist es dringend notwendig, die Bedeutung der HEISENBERG'schen Unschärferelation an Beispielen des Mikro- wie des Makrokosmos zu demonstrieren.

- Einfach- und Doppelspalt  
Am Einfachspalt kann die "Herleitung" demonstriert, problematisiert und kritisch kommentiert werden.
- Elektronenbahnen in der Fernsehröhre  
Rechnungen mit einer Anodenöffnung von 0,1 mm und einer Beschleunigungsspannung von 10 kV ergeben nach der HEISENBERG'schen Unschärferelation die unmerkliche Strahlverbreiterung von  $5 \cdot 10^{-9}$  m.
- Vergleich eines Elektronen-Ensemble mit einem Sandkörner-Ensemble  
Vergleichsrechnungen eines Elektronen-Ensemble mit einem Sandkörner-Ensemble beim Durchgang durch einen Spalt oder Doppelspalt zeigen die Unmerklichkeit der HEISENBERG'schen Unschärferelation bei Sandkörnern als Makroobjekten.

## Unterrichtsskizze:

### 1. Unmöglichkeitsformulierung der HEISENBERG'schen Unschärferelation

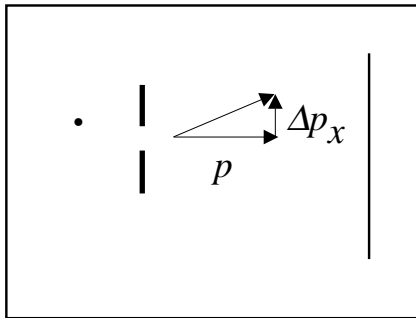
*Es ist nicht möglich ...*

$$\text{Es gilt: } \Delta x \cdot \Delta p_x \geq h/4\pi$$

Die HEISENBERG'sche Unschärferelation wird in die Unmöglichkeitsformulierung gefasst. Dazu sind Begriffserläuterungen notwendig wie 'Standardabweichung', mittlere Bahnungenauigkeit.

Der Zusammenhang mit dem quantenmechanischen Fundamentalprinzip sollte hier angesprochen werden.

### 2. Plausibilitätsbetrachtungen und Illustrationen



Weil die HEISENBERG'sche Unschärferelation in der Schule nicht 'hergeleitet' werden kann, ist man auf Plausibilitätsbetrachtungen, Begründungen mittels Analogien und Erläuterungen an verschiedenen Präparationen angewiesen.

Empfehlenswert ist der Einsatz von Computersimulationen und des FWU-Trickfilms zur Illustration (Anhang).

### 3. Anwendungen

$$h \approx 6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Die HEISENBERG'sche Unschärferelation hat im Mikrokosmos enorme Konsequenzen, die im Makrokosmos gleichermaßen vorhanden, aber nicht merklich sind. Vergleichende Rechnungen zeigen das.

Anregend sind auch Überlegungen, wie die Welt aussehen würde, wenn h einen andern Wert hätte (vgl. [17]).

### 4. Interpretationen

Bohr  
Heisenberg  
Einstein  
Born

Zwanglos führt die HEISENBERG'sche Unschärferelation auf Interpretationsfragen:

- Welchen Weg nehmen die Elektronen?
- Bezieht sich die Unschärferelation auf Einzelobjekte oder auf Ensembles?
- Drückt die Unschärferelation subjektives oder objektives Wissen über die Natur aus?

## 2. Photon-Elektron-Wechselwirkung

### 2.1 Der Fotoeffekt

#### *Didaktischer Kommentar:*

Das Experiment zum Fotoeffekt hat hier nicht mehr die Einstiegsfunktion in die Quantenphysik, sondern eine Bestätigungsfunktion der EINSTEIN-Gleichung und eine Anwendungs- und Übungsfunktion.

#### *Unterrichtsskizze:*

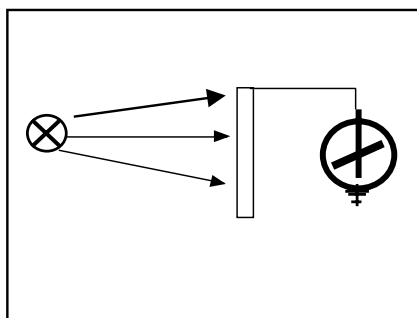
##### 1. Zur Geschichte des Photoeffektes

1887 H. Hertz
1888 W. Hallwachs
1902 P. Lenard
1905 A. Einstein

Eine kurze Einführung in die Geschichte des Fotoeffektes stellt historische Bezüge her.

Hier bieten sich ein Lehrervortrag oder Schülerreferate an.

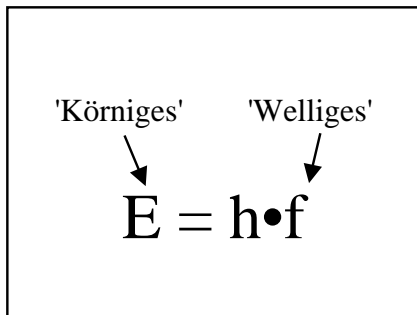
##### 2. Experimente zum Photoeffekt



Am bekannten Zink-Platten-Experiment werden experimentelle Variationen durchgeführt:

- Entladung der Zinkplatte
- konstanter Fotostrom bei Saugspannung
- Fotostrom und Lichtintensität
- Fotostrom bei zwischengebrachter Glasplatte
- Fotostrom bei negativer Gegenspannung

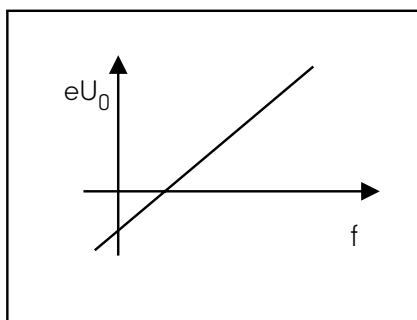
### 3. Deutung des Photoeffektes



Die Experimente werden auf der Basis der bisherigen Kenntnisse über Photonen gedeutet.

Die EINSTEIN-Gleichung  $E = h \cdot f$  ist das gesuchte Bindeglied zwischen dem 'Körnigen' (Energiebrocken) und dem 'Welligen' des Lichts (Frequenz).

### 4. h-Bestimmung mit dem Photoeffekt und Übungen



Mit der Gegenfeldmethode an der Vakuum-Fotозelle kann die EINSTEIN-Gleichung  $E = h \cdot f = 1/2 \cdot mv^2 + eU_0$  bestätigt werden und es kann eine h-Bestimmung erfolgen:

$$h = e \cdot (U_2 - U_1) : (f_2 - f_1).$$

Zu dieser Thematik gibt es reichlich Übungsmaterial.

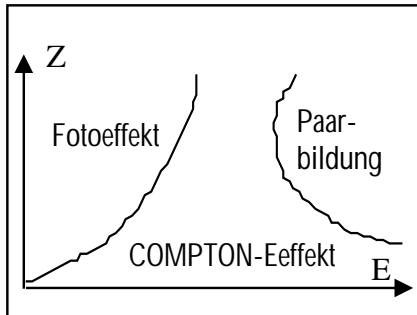
## 2.2 Der COMPTON-Effekt

### *Didaktischer Kommentar:*

Der COMPTON-Effekt wird in unmittelbarer zeitlicher Nähe zum Photoeffekt behandelt, ist er doch lediglich ein anderer Kanal der Photon-Elektron-Wechselwirkung, der sich auftut, wenn die Energie hinreichend groß ist und die Elektronen als quasifrei betrachtet werden können.

### *Unterrichtsskizze:*

## 1. Wechselwirkungskanäle



Ein Photon trifft auf ein Elektron der Hülle eines Atoms und wechselwirkt (=Energie-Impuls-Austausch). Die Ergebnisse dieser Wechselwirkung sind grundverschieden, je nachdem, ob sich das Elektron:

- stark gebunden in der Innenhülle oder
- quasifrei in der Außenhülle befindet.

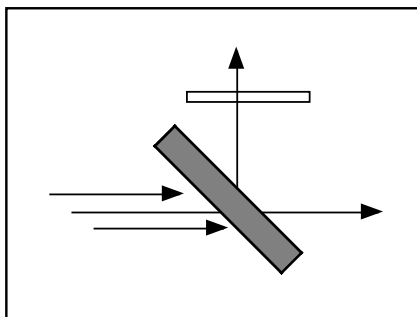
Das Verhältnis Photonenenergie/Bindungsenergie bestimmt, welcher Effekt eintritt.

## 2. Der COMPTON-Effekt

$$\Delta\lambda = \lambda_C \cdot (1 - \cos\varphi)$$

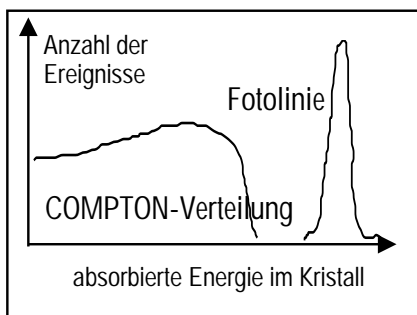
Den Impulsaustausch können Photon und Elektron beim Fotoeffekt nicht 'unter sich alleine regeln', sondern es bedarf des Atoms, das einen Teil des Impulses aufnimmt. Fotoelektronen müssen deshalb relativ fest am Atom gebunden sein (K-Schale). Bei den quasifreien Elektronen des COMPTON-Effektes kann der Impulsatz nur unter Aussendung eines neuen Photons geregelt werden. COMPTON-Formel kann hergeleitet werden.

## 3. COMPTON-Experiment



- Entsprechend der experimentellen Ausrüstung kann das Experiment mit dem Transmissionsverfahren nach POHL mit dem Röntgengerät durchgeführt werden oder mit Szintillisationsdetektoren.
- Ggf. muss man auf das Experiment verzichten. Das Experiment hat vornehmlich Bestätigungsfunktion.

## 4. Fragen und Übungen zur Photon-Elektron-Wechselwirkung



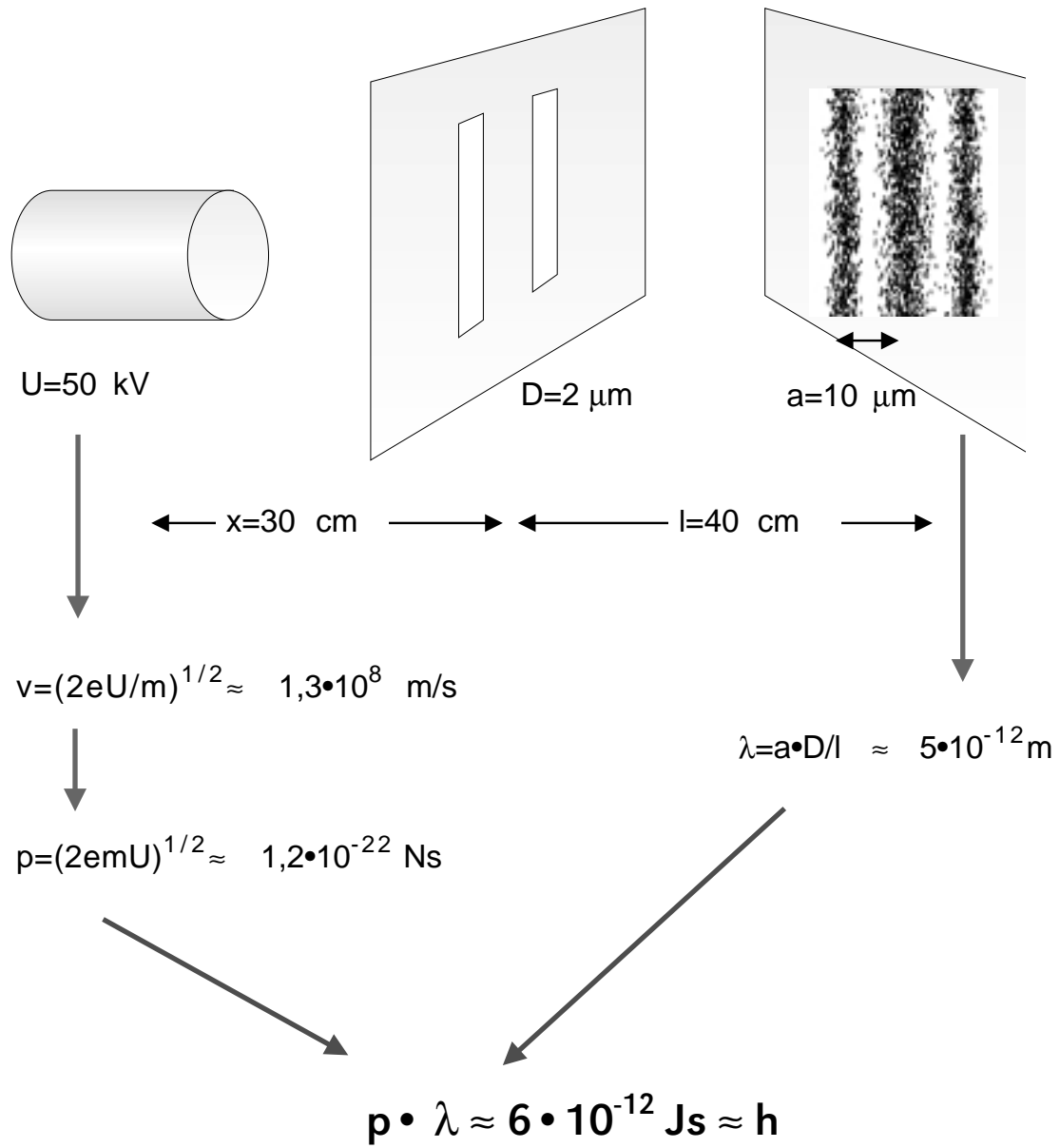
- Der COMPTON-Effekt hat in diesem Aufbau der Quantenphysik vornehmlich eine Bestätigungs- und Übungsfunktion.
- Zu Übungszwecken gibt es reichhaltiges Material.
- Eine Besprechung der Diagramme von Massenschwächungskoeffizienten oder der Verteilungen bieten sich an.



### III. Unterrichtsmaterialien - Folien und Arbeitsblätter

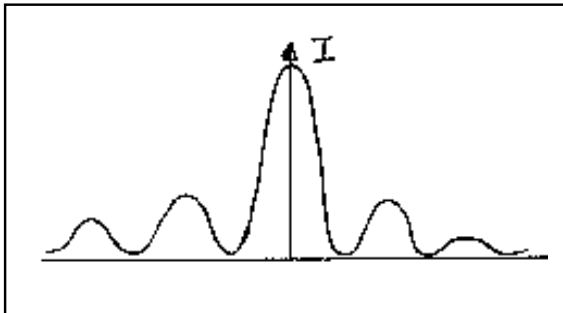
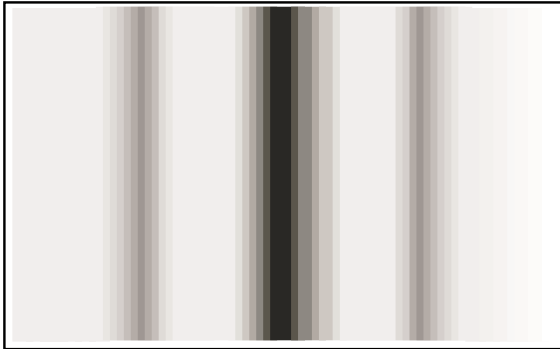
1. Die Daten des Jönsson-Experiments
2. Doppelspaltexperiment mit Elektronen (Jönsson-Experiment)
3. Doppelspaltexperiment mit Licht (Taylor-Experiment)
4. Verhalten von Mikroobjekten
5. Erkenntnistheoretische Positionen zum Doppelspaltexperiment
6. Was bedeuten die heisenbergschen Unschärfen?
7. Einstein-Text zum Fotoeffekt von 1905
8. Auftreten von Fotoeffekt, Compton-Effekt und Paarbildung
9. Fünf Experimente zum Fotoeffekt
10. Massenschwächungskoeffizient in Aluminium
11. Massenschwächungskoeffizient in Blei
12. Energieverteilung der Rückstoßelektronen
13. Spektrum der Compton-Streustrahlung

Die Daten des JÖNSSON-Experiments



## Doppelspaltexperiment mit Elektronen (JÖNSSON-Experiment)

hohe Intensität



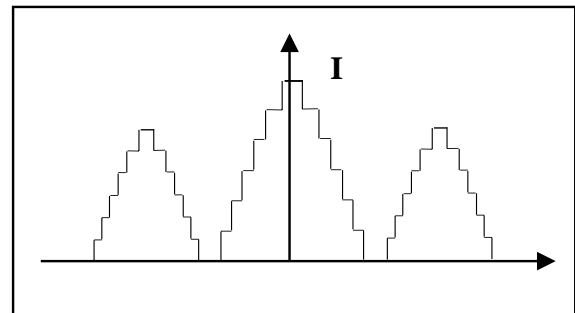
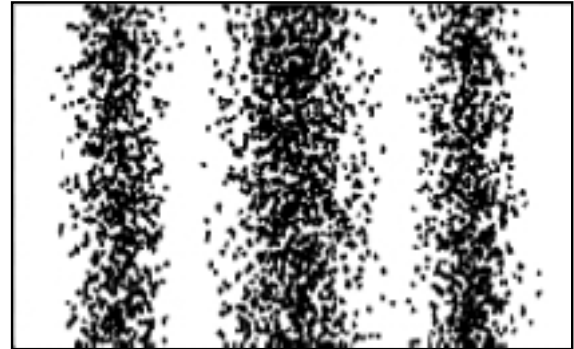
### Beobachtung:

- (a) typische Doppelspalt-Interferenzstreifen im Widerspruch zur Teilchenvorstellung von Elektronen.
- (b) kontinuierliche Intensitätsverteilung.

### Konsequenz:

Wir denken uns zu den Elektronen mathematische Wellen dazu, um die Interferenz zu erklären.

geringe Intensität



### Beobachtung:

- (a) stochastisch verteilte Schirmstellen leuchten auf in Übereinstimmung mit der Teilchenvorstellung von Elektronen.
- (b) nach längerer Zeit tritt überraschenderweise ein Interferenzmuster hervor.

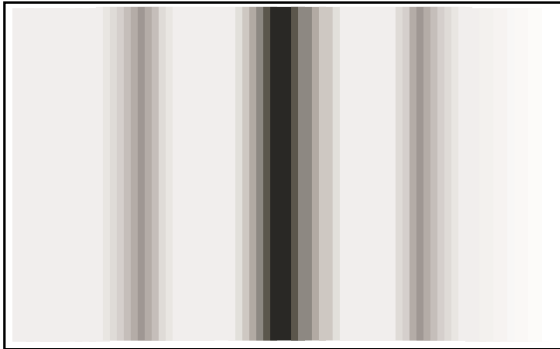
### Konsequenz:

Wir müssen die Wahrscheinlichkeitstheorie zur Beschreibung des Stochastischen heranziehen.

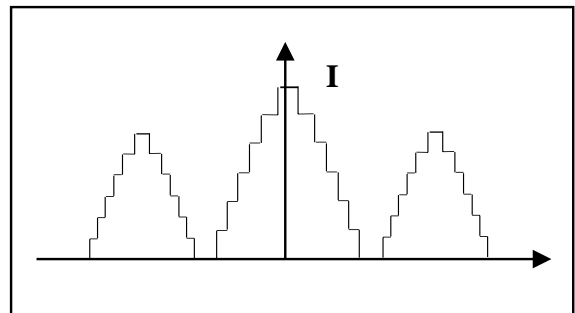
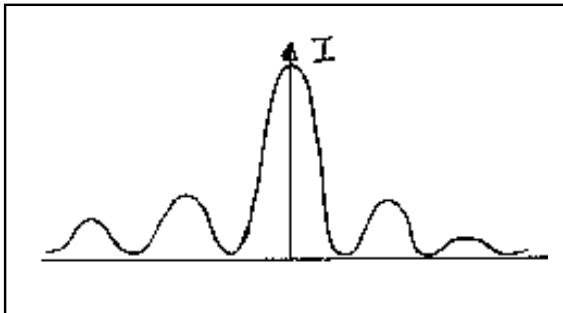
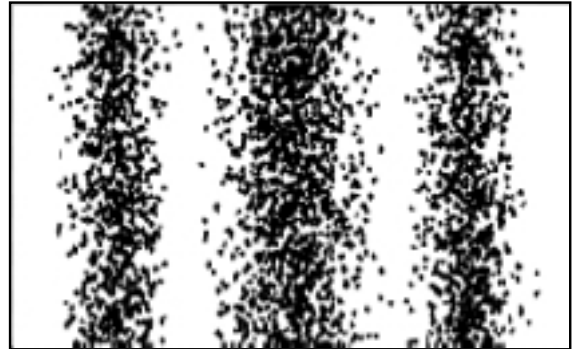
Wir ordnen den Elektronen Wahrscheinlichkeitswellen zu, welche die Wahrscheinlichkeit beschreiben, mit welcher Elektronen auf bestimmten Schirmstellen auftreffen.

## Doppelspaltexperiment mit Licht (TAYLOR-Experiment)

hohe Intensität



geringe Intensität



### Beobachtung:

- (a) typische Doppelspalt-Interferenzstreifen in Übereinstimmung mit der Wellenvorstellung vom Licht.

### Konsequenz:

Wir haben uns die elektromagnetischen Wellen dazugedacht, um die Interferenzmuster zu erklären.

### Beobachtung:

- (a) stochastisch verteilte Schirmstellen leuchten im Widerspruch zur Wellenvorstellung vom Licht auf.  
(b) nach längerer Zeit tritt das klassische Interferenzmuster hervor.  
(c) Jede Schirmstelle absorbiert einen ganz bestimmten Energiebetrag.

### Konsequenz:

Wir müssen die Wahrscheinlichkeitstheorie zur Beschreibung des Stochastischen heranziehen.

Für die einzelnen Photonen müssen wir die Welle als Wahrscheinlichkeitswelle interpretieren.

## Verhalten von Mikroobjekten

### **1. Wahrscheinlichkeitswellen von Mikroobjekten können miteinander interferieren.**

Die Fähigkeit zur Interferenz ist im klassischen Fall nur von Wellen bekannt. (Es überrascht zunächst, dass es physikalische Objekte gibt, die miteinander interferieren können, ohne Wellen zu sein.) Der Begriff der Interferenz ist dabei aus der Analogie der Resultate bei gleicher experimenteller Spaltanordnung (gleichartiger Präparation) gebildet: Es entstehen typische Interferenzmuster.

### **2. Wahrscheinlichkeitswellen zeigen auch Interferenz mit sich selbst, unabhängig von den anderen.**

Schickt man Mikroobjekte in so großen Zeitabständen durch die Spalte, dass sie diese nur einzeln 'durchlaufen', so erhält man bei beliebig großer Versuchsdauer die gleiche Verteilung, wie wenn man alle zur gleichen Zeit durchschickt. Was ist der Grund für diese Interferenz?

### **3. Mikroobjekte zeigen stochastisches Verhalten.**

Mit einer ganz bestimmten Wahrscheinlichkeit leuchtet ein bestimmter Schirmpunkt auf. Es lässt sich aber nicht voraussagen, welcher Schirmpunkt oder welches Detektorstück als nächstes anspricht. Die Theorie verbietet, Bahnen von Mikroobjekten zu zeichnen. Die mathematische Theorie, der mathematische Formalismus zur Beschreibung des Bewegungsverhaltens von Mikroobjekten muss deshalb wahrscheinlichkeitstheoretische Elemente enthalten.

### **4. Mikroobjekte zeigen ein nicht-deterministisches Verhalten im klassischen Sinne.**

In der klassischen Physik führen gleiche Anfangsbedingungen unter gleichen Versuchsabläufen zu gleichen Ergebnissen. In der Quantenphysik führen gleiche Anfangsbedingungen unter gleichen Versuchsabläufen zu gleichen Wahrscheinlichkeitsaussagen. Es tritt in der Quantenphysik das Phänomen auf, dass die Interferenz um so ausgeprägter ist, je exakter die Anfangsbedingungen (z. B. Spaltbreite) sind. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung ist streng deterministisch. Kann der Wahrscheinlichkeitsbegriff eliminiert werden?

### **5. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen können nicht am Einzelobjekt studiert werden, sondern nur aus der Kenntnis des Gesamtverhaltens vieler identisch präparierter ununterscheidbarer Objekte.**

Es gibt am Einzelobjekt auch individuell feststellbare Eigenschaften z. B. Elementarladung, Ruhemasse, Spin. Diese sagen aber nichts über das Bewegungsverhalten der Mikroobjekte aus.

**6. Den nicht-relativistischen Mikroobjekten werden mathematische Wahrscheinlichkeitswellen  $\Psi$  zugeordnet, denen selbst keine Realität im Sinne einer Messgröße zukommt. Das Amplitudenquadrat  $|\Psi|^2 dV$  ist eine Messgröße und beschreibt die Wahrscheinlichkeit, im betrachteten Volumenelement  $dV$  ein Mikroobjekt zu finden.  $|\Psi|^2$  ist eine räumliche Wahrscheinlichkeitsdichte.  $\Psi$  genügt der SCHRÖDINGER-Gleichung.**

Im Doppelspaltexperiment ist die Intensitätsverteilung ein Maß für die pro Flächenelement registrierte Energie und damit für die Auftreffwahrscheinlichkeit auf dem Schirm. Auf dem Schirm gilt demnach  $|\Psi|^2 dV = \text{Intensität}$ . Diese Interpretation gilt für Elektronen wie für Photonen gleichermaßen, während der Begriff der räumlichen Wahrscheinlichkeitsdichte für Photonen als ultrarelativistische Mikroobjekte nicht existiert. Ist die elektromagnetische Welle die Wahrscheinlichkeitswelle der Photonen? Nein, das liegt daran, dass man ultrarelativistischen Mikroobjekten keinen Zustand mit scharfem Ort zuordnen kann. Im Experiment mit einer sehr großen Zahl von Photonen (z. B. Mikrowellen), in dem nur Mittelwerte gemessen werden, stimmen die Aussagen der MAXWELLSchen Gleichungen mit denen der Quantentheorie überein.

**7. Für die DE-BROGLIE-Wellenlänge der Wahrscheinlichkeitswelle gilt  $\lambda = h/p$ .**

## **Erkenntnistheoretische Positionen zum Doppelspaltexperiment**

- 1 Im Doppelspaltexperiment ist das Elektron ein Teilchen und eine Welle.
- 2 Im Doppelspaltexperiment erscheint uns das Elektron wie ein Teilchen und wie eine Welle.
- 3 Im Doppelspaltexperiment verhält sich das Elektron wie ein Teilchen und wie eine Welle. Es ist keines von beidem.
- 4 Wenn ich ein Ensemble von Elektronen so und so präpariere, dann erscheinen sie im Doppelspaltexperiment als Teilchen oder als Welle.
- 5 Das Doppelspaltexperiment zeigt uns den Wellencharakter und den Teilchencharakter der Elektronen.
- 6 Mangels Information weiß ich nicht, was das Elektron 'an sich' ist. Die Realität des Elektrons verbirgt sich meiner Erkenntnis.
- 7 Das Doppelspaltexperiment sagt uns nicht, wie die Natur des Elektrons ist, sondern sagt uns, was wir über die Natur des Elektrons sagen können.
- 8 Wir wissen nicht, was ein Elektron ist, und wir werden es nicht wissen (Ignoramus et ignorabimus).
- 9 Was das Elektron ist, interessiert mich nicht. Mich interessiert, was im Doppelspaltexperiment "hinten herauskommt".
- 10 Die augenblickliche Position eines Elektrons von der Quelle zum Schirm ist prinzipiell unbestimmt.
- 11 Die augenblickliche Position eines Elektrons von der Quelle zum Schirm ist nicht prinzipiell unbestimmt, sondern dem Experimentator unbekannt.
- 12 Die Quantenmechanik beschreibt die physikalische Wirklichkeit des Doppelspaltexperiments unvollständig. Die Theorie enthält verborgene Parameter.
- 13 Ein Elektron ist ein Elektron, wenn es gemessen wird. Ein Phänomen ist erst ein reales Phänomen, wenn es ein beobachtetes Phänomen ist. Die Beobachtung schafft erst die Realität.
- 14 Sie fragen nach der Realität des Elektrons im Doppelspaltexperiment? Es gibt keine tiefere Realität.
- 15 Das Elektron im Doppelspaltexperiment ist ein gewöhnliches Objekt wie ein Apfel. Die Quantenrealität ist dieselbe wie die Apfelrealität.
- 16 Ich als Beobachter mit Bewusstsein entscheide, was ich auf dem Schirm sehe, entscheide über die Realität der Elektronen. Mein Bewusstsein erzeugt die Realität.
- 17 Das Elektron an sich gibt es gar nicht. Es ist Bestandteil der experimentellen Situation.

- 18 Wenn das Elektron durch das Doppelspaltexperiment zum Schirm fliegt, muss es doch einen ganz bestimmten Weg nehmen; auch wenn ich es nicht bestimmen kann.
- 19 Das Elektron muss doch einen bestimmten Weg laufen, unabhängig, ob ich ihn beobachte oder nicht.
- 20 Das Elektron läuft nicht einen bestimmten Weg, sondern nimmt notwendig alle ihm offenstehenden Wege (=Möglichkeiten, auch Zick-Zack-Wege) gleichzeitig wahr.
- 21 Sie fragen: Wo entscheidet das Elektron, ob es sich als Welle oder als Teilchen verhält? Ich antworte: nirgends.
- 22 Über die Natur des Elektrons beim Doppelspaltexperiment kann ich keine Aussagen machen. Ich kann nur Aussagen über das stochastische Verhalten vieler gleichartig präparierter Elektronen machen.
- 23 Die Erscheinungen im Doppelspaltexperiment sind genauso wirklich wie im täglichen Leben; aber die Elektronen sind es nicht. Sie gehören der Welt der Möglichkeiten an und nicht der Welt der Dinge und Tatsachen.
- 24 Die Elektronen im Doppelspaltexperiment sind reale Teilchen, werden aber von einer realen unsichtbaren Welle durch die Apparatur geführt.
- 25 Unmittelbar vor dem Auftreffen auf dem Schirm im Doppelspaltexperiment ist das Elektron nicht in eine bestimmte Richtung ausgerichtet. Vor dem Aufprall ist es überall hin ausgerichtet.
- 26 Jedes Elektron geht nur durch einen Spalt, ist sich aber der Existenz und des Ortes des anderen Spaltes bewusst, wenn dieser geöffnet ist und wählt verschiedene Richtungen, die zum Interferenzmuster beitragen.
- 27 Über die Natur des Elektrons habe ich mir nie Gedanken gemacht.
- 28 Ich begreife das Verhalten der Elektronen im Doppelspaltexperiment nicht.

### **Erkenntnistheoretische Positionen:**

**K: Kopenhagener:** Es gibt keine tieferliegende Realität.

**R: Realisten:** Es existiert eine vom Beobachter unabhängige Realität.

**B: Bewusstseinsrealisten:** Bewusstsein schafft Realität .

**H: Platoniker:** Es gibt eine doppelte Welt, die des Möglichen und des Faktischen.

**N: Naivrealisten:** Die Realität ist das was wir wahrnehmen.

**P: Positivisten:** Nur die begrifflich-logische Fassung der Realität ist möglich und sinnvoll.

**E: Experimentelle, pragmatische Haltung:** Nicht Interpretationen interessieren, sondern nur das, was im Experiment herauskommt.

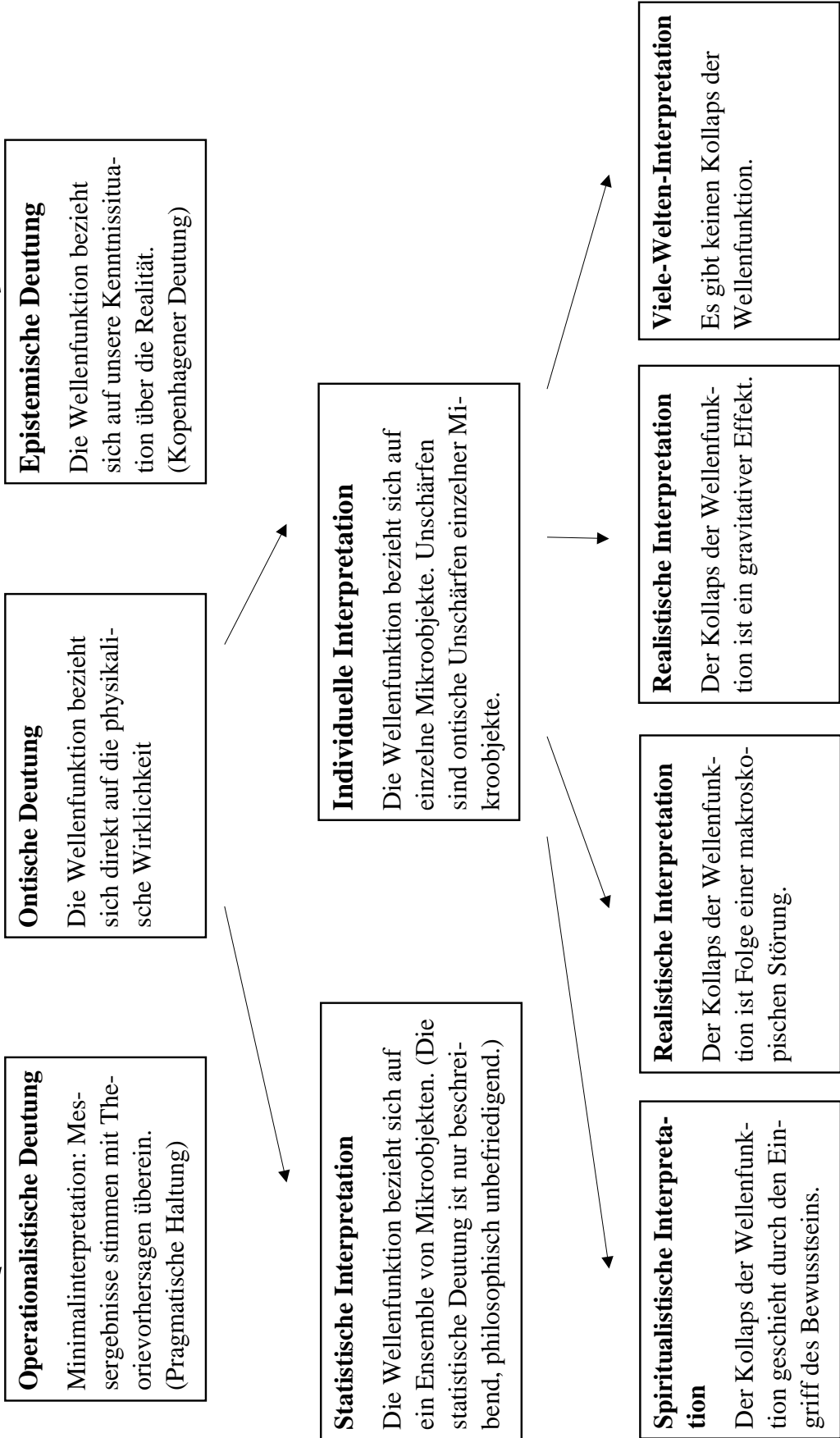


### **Erkenntnistheoretische Positionen zum Doppelspaltexperiment**

- 1 Im Doppelspaltexperiment ist das Elektron ein Teilchen und eine Welle.
- 2 Im Doppelspaltexperiment erscheint uns das Elektron wie ein Teilchen und wie eine Welle.
- 3 Im Doppelspaltexperiment verhält sich das Elektron wie ein Teilchen und wie eine Welle. Es ist keines von beidem.
- 4 Wenn ich ein Ensemble von Elektronen so und so präpariere, dann erscheinen sie im Doppelspaltexperiment als Teilchen oder als Welle.
- 5 Das Doppelspaltexperiment zeigt uns den Wellencharakter und den Teilchencharakter der Elektronen.
- 6 Mangels Information weiß ich nicht, was das Elektron 'an sich' ist. Die Realität des Elektrons verbirgt sich meiner Erkenntnis.
- 7 Das Doppelspaltexperiment sagt uns nicht, wie die Natur des Elektrons ist, sondern sagt uns, was wir über die Natur des Elektrons sagen können.
- 8 Wir wissen nicht, was ein Elektron ist, und wir werden es nicht wissen (Ignoramus et ignorabimus).
- 9 Was das Elektron ist, interessiert mich nicht. Mich interessiert, was im Doppelspaltexperiment "hinten herauskommt".
- 10 Die augenblickliche Position eines Elektrons von der Quelle zum Schirm ist prinzipiell unbestimmt.
- 11 Die augenblickliche Position eines Elektrons von der Quelle zum Schirm ist nicht prinzipiell unbestimmt, sondern dem Experimentator unbekannt.
- 12 Die Quantenmechanik beschreibt die physikalische Wirklichkeit des Doppelspaltexperiments unvollständig. Die Theorie enthält verborgene Parameter.
- 13 Ein Elektron ist ein Elektron, wenn es gemessen wird. Ein Phänomen ist erst ein reales Phänomen, wenn es ein beobachtetes Phänomen ist. Die Beobachtung schafft erst die Realität.
- 14 Sie fragen nach der Realität des Elektrons im Doppelspaltexperiment? Es gibt keine tiefere Realität.
- 15 Das Elektron im Doppelspaltexperiment ist ein gewöhnliches Objekt wie ein Apfel. Die Quantenrealität ist dieselbe wie die Apfelrealität.

- 16 Ich als Beobachter mit Bewusstsein entscheide, was ich auf dem Schirm sehe, entscheide über die Realität der Elektronen. Mein Bewusstsein erzeugt die Realität.
- 17 Das Elektron an sich gibt es gar nicht. Es ist Bestandteil der experimentellen Situation.
- 18 Wenn das Elektron durch das Doppelspaltexperiment zum Schirm fliegt, muss es doch einen ganz bestimmten Weg nehmen; auch wenn ich ihn nicht bestimmen kann.
- 19 Das Elektron muss doch einen bestimmten Weg laufen, unabhängig, ob ich es beobachte oder nicht.
- 20 Das Elektron läuft nicht einen bestimmten Weg, sondern nimmt notwendig alle ihm offenstehenden Wege (=Möglichkeiten, auch Zick-Zack-Wege) gleichzeitig wahr.
- 21 Sie fragen: Wo entscheidet das Elektron, ob es sich als Welle oder als Teilchen verhält? Ich antworte: nirgends.
- 22 Über die Natur des Elektrons beim Doppelspaltexperiment kann ich keine Aussagen machen. Ich kann nur Aussagen über das stochastische Verhalten vieler gleichzeitig präparierter Elektronen machen.
- 23 Die Erscheinungen im Doppelspaltexperiment sind genauso wirklich wie im täglichen Leben; aber die Elektronen sind es nicht. Sie gehören der Welt der Möglichkeiten an und nicht der Welt der Dinge und Tatsachen.
- 24 Die Elektronen im Doppelspaltexperiment sind reale Teilchen, werden aber von einer realen unsichtbaren Welle durch die Apparatur geführt.
- 25 Unmittelbar vor dem Auftreffen auf dem Schirm im Doppelspaltexperiment ist das Elektron nicht in eine bestimmte Richtung ausgerichtet. Vor dem Aufprall ist es überall hin ausgerichtet.
- 26 Jedes Elektron geht nur durch einen Spalt, ist sich aber der Existenz und des Ortes des anderen Spaltes bewusst, wenn dieser geöffnet ist und wählt verschiedene Richtungen, die zum Interferenzmuster beitragen.
- 27 Über die Natur des Elektrons habe ich mir nie Gedanken gemacht.
- 28 Ich begreife das Verhalten der Elektronen im Doppelspaltexperiment nicht.

**Problem: Was bedeuten die heisenbergschen Unschärfen ?**



## EINSTEIN (1905):

### Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt

Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwell'schen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lage und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwell'schen Theorie ist bei allen rein elektromagnetischen Erscheinungen, also auch beim Licht, die Energie als kontinuierliche Raumfunktion aufzufassen, während die Energie eines ponderablen Körpers nach der gegenwärtigen Auffassung der Physiker als eine über die Atome und Elektronen erstreckte Summe darzustellen ist. Die Energie eines ponderablen Körpers kann nicht in beliebig viele, beliebig kleine Teile zerfallen, während sich die Energie eines von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesandten Lichtstrahls nach der Maxwell'schen Theorie (oder allgemeiner nach jeder Undulationstheorie) des Lichtes auf ein stets wachsendes Volumen sich kontinuierlich verteilt.

Die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Undulationstheorie des Lichtes hat sich zur Darstellung der rein optischen Phänomene vortrefflich bewährt und wird wohl nie durch eine andere Theorie ersetzt werden. Es ist jedoch im Auge zu behalten, daß sich die optischen Beobachtungen auf zeitliche Mittelwerte, nicht aber auf Momentanwerte beziehen, und es ist trotz der vollständigen Bestätigung der Theorie der Beugung, Reflexion, Brechung, Dispersion etc. durch das Experiment wohl denkbar, daß die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Theorie des Lichtes zu Widersprüchen mit der Erfahrung führt, wenn man sie auf die Erscheinungen der Lichterzeugung und Lichtverwandlung anwendet.

Es scheint mir nun in der Tat, daß die Beobachtungen über die schwarze Strahlung, Photolumineszenz, die Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht und andere die Erzeugung bzw. Verwandlung des Lichtes betreffende Erscheinungsgruppen besser verständlich erscheinen unter der Annahme, daß die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei. Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkt ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen, und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können.

Im folgenden will ich den Gedankengang mitteilen und die Tatsachen anführen, welche mich auf diesen Weg geführt haben, in der Hoffnung, daß der darzulegende Gesichtspunkt sich einigen Forschern bei ihren Untersuchungen als brauchbar erweisen möge. (...)

### Über die Erzeugung von Kathodenstrahlen durch Belichtung fester Körper.

Die übliche Auffassung, daß die Energie des Lichtes kontinuierlich über den durchstrahlten Raum verteilt sei, findet bei dem Versuch, die lichtelektrischen Erscheinungen zu erklären, besonders große Schwierigkeiten, welche in einer bahnbrechenden Arbeit von Herrn Lenard dargelegt sind.

Nach der Auffassung, daß das erregende Licht aus Energiequanten von der Energie  $h \cdot f$  bestehe, läßt sich die Erzeugung von Kathodenstrahlen durch Licht folgendermaßen auffassen. In die oberflächliche Schicht des Körpers dringen Energiequanten ein, und deren Energie verwandelt sich wenigstens zum Teil in kinetische Energie von Elektronen. Die einfachste Vorstellung ist die, daß ein Lichtquant seine ganze Energie an ein einziges Elektron abgibt; wir wollen annehmen, daß dies vorkomme. Es soll jedoch nicht ausgeschlossen sein, daß Elektronen die Energie von Lichtquanten nur teilweise aufnehmen. Ein im Innern des Körpers mit kinetischer Energie versehenes Elektron wird, wenn es die Oberfläche erreicht hat, einen Teil seiner kinetischen Energie eingebüßt haben. Außerdem wird anzunehmen sein, daß jedes Elektron beim Verlassen des Körpers eine (für den Körper charakteristische) Arbeit  $P$  zu leisten hat, wenn es den Körper verläßt. Mit der größten Normalgeschwindigkeit werden die unmittelbar an der Oberfläche normal zu dieser erregten Elektronen den Körper verlassen. Die kinetische Energie solcher Elektronen ist

$h \cdot f \cdot W$ . (...)

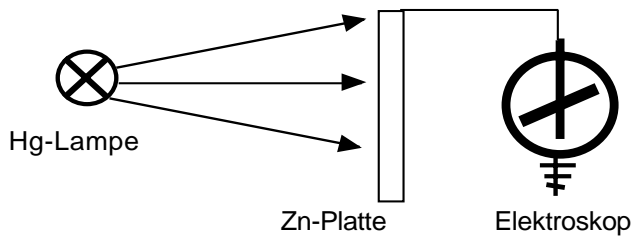
Mit den von Herrn Lenard beobachteten Eigenschaften der lichtelektrischen Wirkung steht unsere Auffassung, soweit ich sehe, nicht im Widerspruch. Wenn jedes Energiequant des erregenden Lichtes unabhängig von allen übrigen seine Energie an Elektronen abgibt, so wird die Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen, d.h. die Qualität der erzeugten Kathodenstrahlung von der Intensität des erregenden Lichtes unabhängig sein; andererseits wird die Anzahl der den Körper verlassenden Elektronen der Intensität des erregenden Lichtes unter sonst gleichen Umständen proportional sein.

### Aufgaben:

1. Orientiere dich im Text, indem du ihn überfliegst.
2. Formuliere Überschriften für die Abschnitte.
3. Markiere mit zwei verschiedenen Farben die Sätze, Abschnitte etc., die etwas über die kontinuierliche bzw. diskontinuierliche Energieverteilung aussagen.
4. Erkläre die Begriffe: schwarze Strahlung, Photolumineszenz, Kathodenstrahlen, andere die Erzeugung bzw. Verwandlung des Lichtes betreffenden Erscheinungen.
5. Unterstreiche im Text die Begriffe Lichtquanten bzw. Energiequanten. Unterschiede? Welche Auffassung hat Einstein von der Realität der Lichtquanten?

## 5 Experimente zum Fotoeffekt

### 1. Experiment

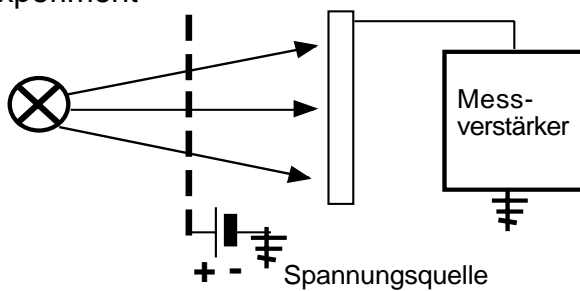


Ergebnisse:

1 (a) Eine negativ geladene Zinkplatte wird durch Licht entladen.

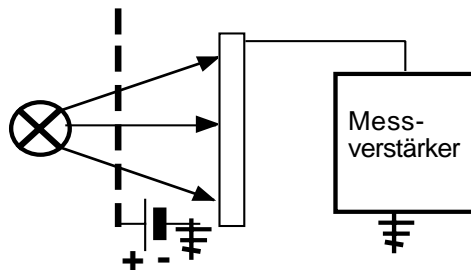
(b) Eine positiv geladene Zinkplatte wird durch Licht nicht entladen.

### 2. Experiment



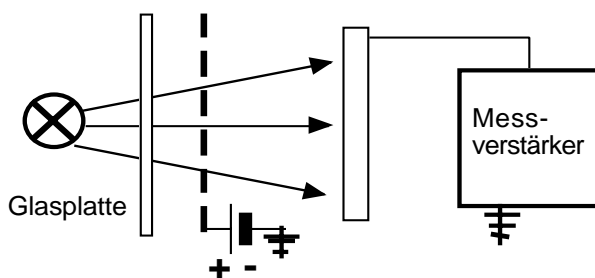
2. Mit einer positiven Saugspannung fließt ein Fotostrom.

### 3. Experiment



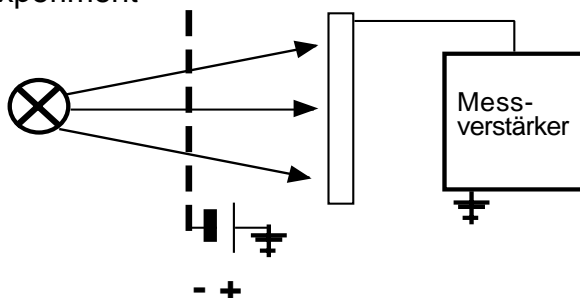
3. Der Fotostrom wächst mit größerer Lichtintensität.

### 4. Experiment



4. Mit einer zwischengebrachten Glasplatte fließt kein Fotostrom.

### 5. Experiment



5. Eine negative Gegenspannung verringert den Fotostrom. Ab einer Grenzspannung  $U_0$  fließt kein Fotostrom mehr.

## Vom Fotoeffekt zum COMPTON-Effekt

### Vier Fragen:

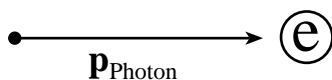
1. Wo kommt das Elektron beim Fotoeffekt her?
2. Wie steht es mit dem Impulssatz beim Fotoeffekt?
3. Was "sieht" das Elektron bzw. das Atom, wenn ein langwelliges Photon auf es zufliegt?
4. Was "sieht" das Elektron bzw. das Atom, wenn ein kurzwelliges Photon auf es zufliegt?

### Zu Frage 1: Wo kommt das Elektron beim Fotoeffekt her?

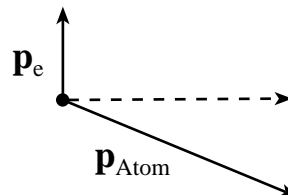
Das Elektron kann kein Leistungselektron sein, denn es gibt auch Fotoeffekt bei einzelnen Atomen (z. B. in Kaliumdampf). Das Elektron kann aber auch kein freies Elektron sein, denn der Impulssatz lässt das nicht zu, wie unten gezeigt wird. Es müssen als gebundene Elektronen sein, wobei sich die Frage stellt, ob es innere oder äußere sind. Eine Antwort gibt die nächste Frage.

### Zu Frage 2: Wie steht es mit dem Impulssatz beim Fotoeffekt?

Impulssdiagramm vorher:



Impulssdiagramm nachher:



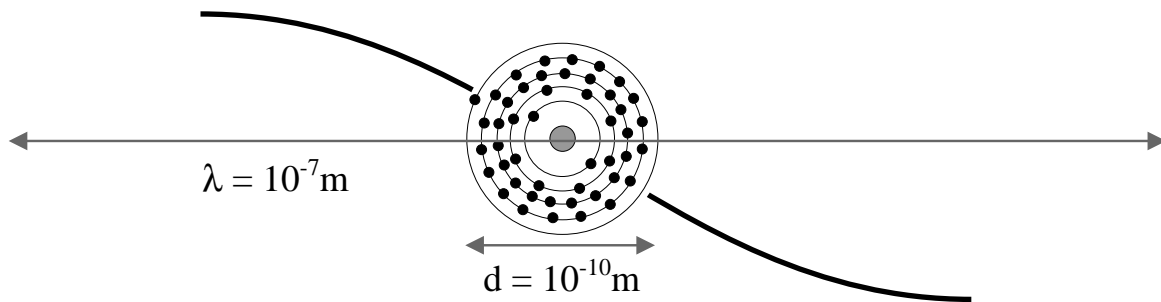
Den Impuls können Photon und Elektron nicht alleine unter sich regeln; denn es gibt Experimente die zeigen, dass die Fotoelektronen vorzugsweise senkrecht zum Photonenstrom austreten. Also muss es ein Objekt geben, nämlich das Atom bzw. der Kristall, das den Impuls aufnehmen und ihn zusammen mit dem Elektron teilen kann; denn das Photon ist nach dem Stoß vernichtet.

Das geht aber nur, wenn das Elektron möglichst "fest" am Atom gebunden ist, denn sonst könnte das Atom keinen "Stoß" bekommen und keinen Impuls aufnehmen. Das Elektron muss dann vorzugsweise ein inneres der K-Schale sein.

### Zu Frage 3:

#### Was "sieht" das Elektron bzw. das Atom, wenn ein langwelliges Photon auf es zufliegt?

Das Atom hat eine mittlere Größe von etwa  $10^{-10}\text{m}$  und stellen wir uns vor, es könnte das Licht als elektromagnetische Welle mit der Wellenlänge  $\lambda \approx 10^{-7}\text{m}$  "sehen", so wie jemand, der am Meeresufer steht und die Wellen über sich hinweglaufen sieht. Das Atom sieht nun eine Welle mit einer Wellenlänge auf sich zukommen, die 1000 mal größer ist als es selbst. (Denke du stehst im Meer und eine Welle mit der Wellenlänge  $\approx 1000\text{m} = 1\text{km}$  geht über dich hinweg.) Das Atom taucht ganz in die Wellenlänge ein. Jede Stelle im Atom, d. h. jedes Elektron im Atom sieht fast dasselbe der Welle.



Welche Energieportion sehen Elektron und Atom auf sich zufliegen?

Rechnung:  $\lambda \approx 10^{-7}\text{m} \rightarrow E = h \cdot c / \lambda \approx 2 \cdot 10^{-18}\text{J} \approx 10\text{eV}$ .

Ein Elektron der K-Schale ist mit ungefähr 5 eV an das Atom gebunden. Also ist die Energieportion, die auf das Elektron zufliegt, ungefähr so groß wie die Bindungsenergie. Das Elektron sieht seine Bindung gefährdet, aber es braucht sonst nicht viel zu fürchten, denn es selbst hat nach  $E = m \cdot c^2$  die Ruheenergie von 511 keV  $\approx 0,5\text{MeV}$ .

Das Atom ist übermächtig und sieht ein Energie-Leichtgewicht auf sich zufliegen. (Achtung: Niemand kann ein Photon im Fluge sehen, auch nicht die Elektronen oder Atome. Nach der Relativitätstheorie verbietet sich die Frage. Das soll jetzt nicht kümmern.)

#### Zu Frage 4: Was "sieht" das Elektron bzw. das Atom, wenn ein kurzwelliges Photon auf es zufliegt?

Wir vergleichen die Wellenlänge mit der Größe des Atoms.



Das Atom sieht eine Welle mit einer Wellenlänge auf sich zukommen, die 100 mal kleiner ist als es selbst. (Denke du stehst im Meer und eine Welle mit der Wellenlänge  $\approx 1$  cm umspült dich.) Das Atom umhüllt viele Wellenlängen, d. h. jede Stelle im Atom sieht etwas anderes von der Welle.

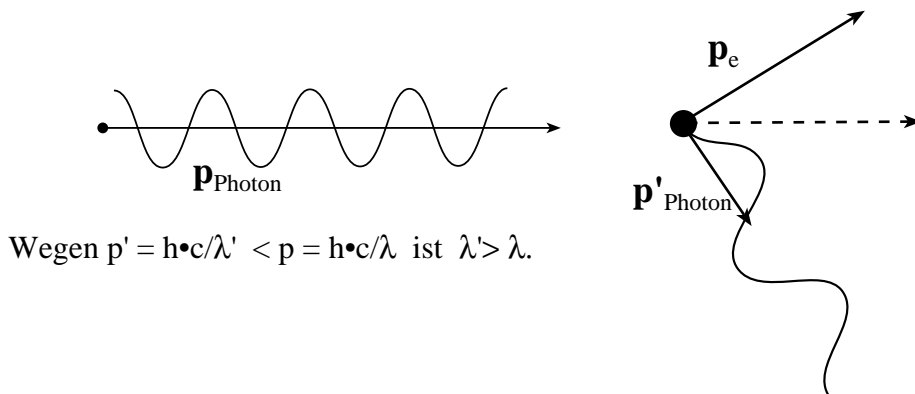
Welche Energieportion sehen Elektron und Atom auf sich zufliegen?

Rechnung:  $\lambda \approx 10^{-12} \text{m} \rightarrow E = h \cdot c / \lambda \approx 2 \cdot 10^{23} \text{J} \approx 10^6 \text{eV} = 1 \text{MeV}$ .

Die Elektronen im Atom sind mit ungefähr 10 eV an das Atom gebunden. Die Energieportion, die auf das Elektron zufliegt, ist mit 1 MeV eine Energiebombe, die mühelos jedes Elektron, das getroffen wird, losreißen kann.

Jedes Elektron ist aus der Sicht des Photons quasifrei, wie ein freies Elektron. Das Elektron sieht nicht nur seine Bindung gefährdet, sondern auch seine "Existenz", wenn das Photon seine ganze Energie an das Elektron abgibt, die doppelt so groß ist wie seine eigene Ruheenergie von 511 keV  $\approx 0,5$  MeV. Es braucht Hilfe, die vom Atom, bzw. vom Kristall kommen kann. Das Atom hat eine erheblich größere Ruheenergie und ist fast leer.

Wenn das Elektron (quasi) frei ist, kann das Atom keinen Impuls übernehmen wie das beim Fotoeffekt der Fall war. Photon und Elektron müssen also den Impuls unter sich selbst regeln, ohne Beteiligung des Atoms. Da ein Photon als Energie- und Impulsbrocken nur beides ganz und gleichzeitig unter eigener Vernichtung abgeben kann, würde das bedeuten, dass das Elektron die gesamte Energie und den gesamten Impuls aufnehmen müsste. Das aber kann das Elektron nicht. Hilfe erhält es von einem neuen Photon (=Streustrahlung) mit verminderter Energie  $E'$  und vermindertem Impuls  $p'$ , indem das Elektron und das neue Photon den Energie- und Impulssatz unter sich regeln.



Die Streustrahlung müsste eine um  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$  größere Wellenlänge haben, die vom Winkel zwischen Elektronenimpuls und neuem Photonenimpuls abhängt. Dieser Effekt ist der COMPTON-Effekt.

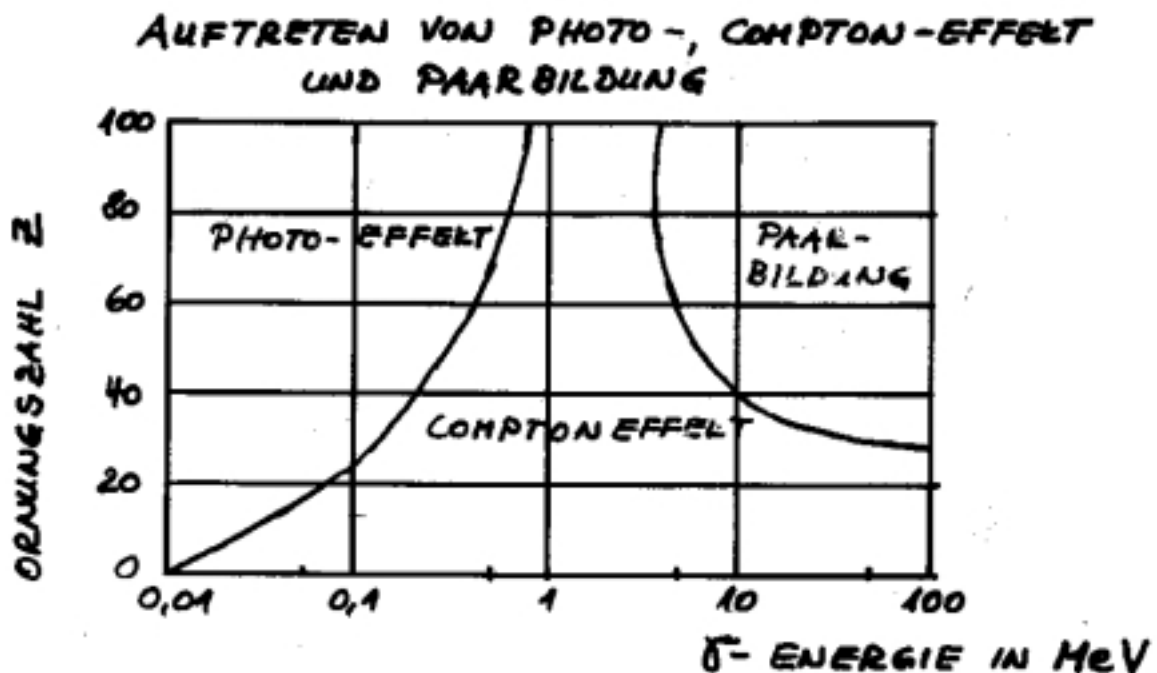
Die Antwort auf die Frage, wo das Elektron beim COMPTON-Effekt herkommt, ist nun einfach: von einem freien oder quasifreien Elektron. Die Faustregel lautet: Der COMPTON-Effekt findet bevorzugt dann statt, wenn die Photonenenergie viel größer als die Bindungsenergie ist.

### Zusammenfassung:

Die Betrachtungen zeigen, dass Fotoeffekt und COMPTON-Effekt gar nicht so verschieden sind; sie sind zwei Extremfälle der Photon-Elektron-Wechselwirkung. Sie sind Schwarz-Weiß-Malerei.

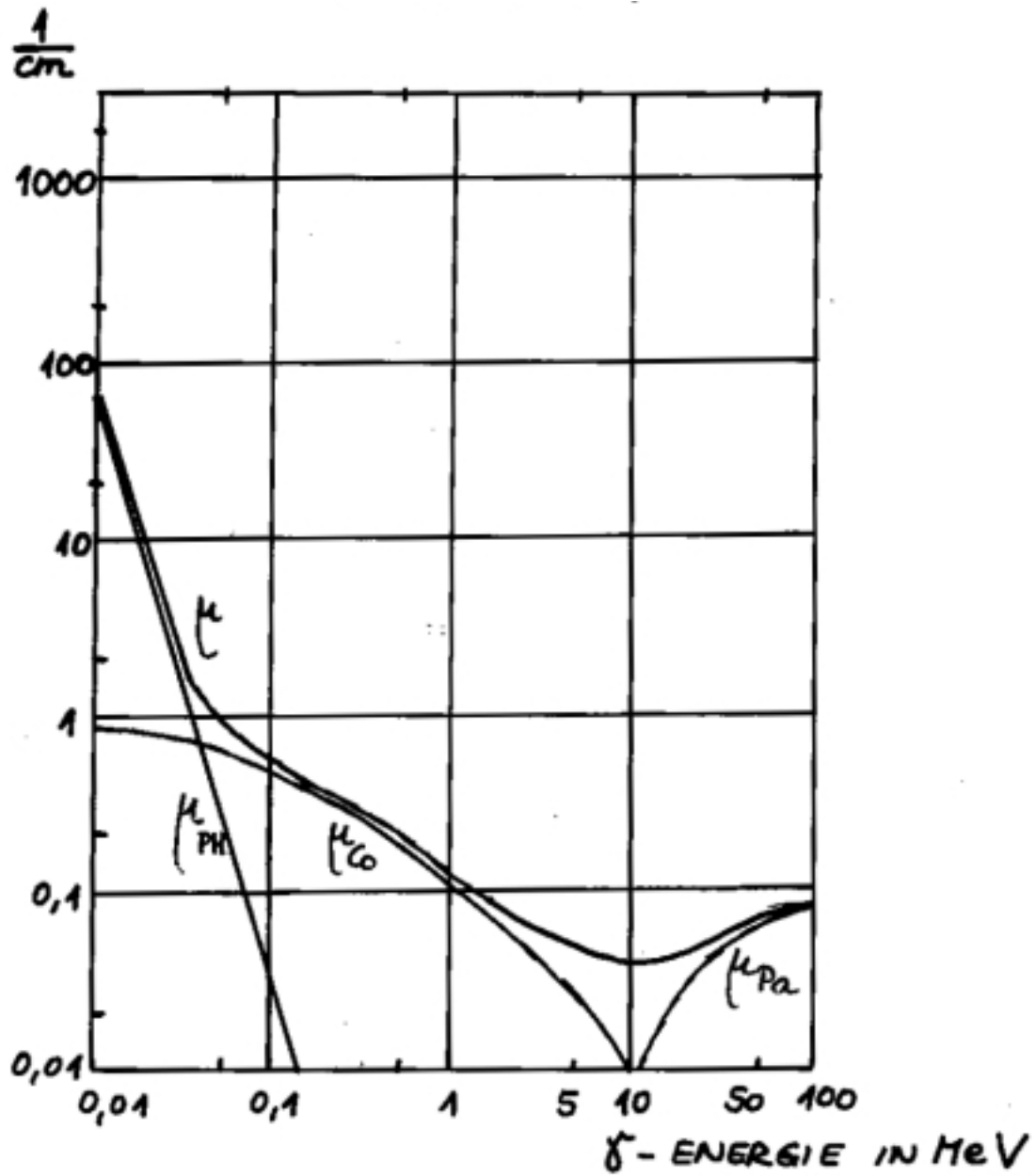
Was passiert bei Strahlung "mittlerer" Wellenlänge von  $\lambda \approx 10^{-10} \text{m}$ , zwischen  $\lambda \approx 10^{-7} \text{m}$  und  $\lambda \approx 10^{-12} \text{m}$ ? Das hängt davon ab, auf welches Material die Strahlung fällt. Ein Teil der Strahlung fällt auf "stärker" gebundene Elektronen und "macht" Fotoeffekt. Ein anderer Teil fällt auf quasifreie und freie Elektronen und "macht" COMPTON-Effekt. Je nach Energie (d. h. Wellenlänge) der Strahlung überwiegt bei dem Material der Fotoeffekt oder der COMPTON-Effekt. Das nachfolgende Diagramm gibt darüber Auskunft, bei welchem Material und bei welcher Photonenenergie man vorzugsweise mit Fotoeffekt bei welcher Photonenenergie man vorzugsweise mit COMPTON-Effekt rechnen muss.

### Auftreten von Fotoeffekt, COMPTON-Effekt und Paarbildung

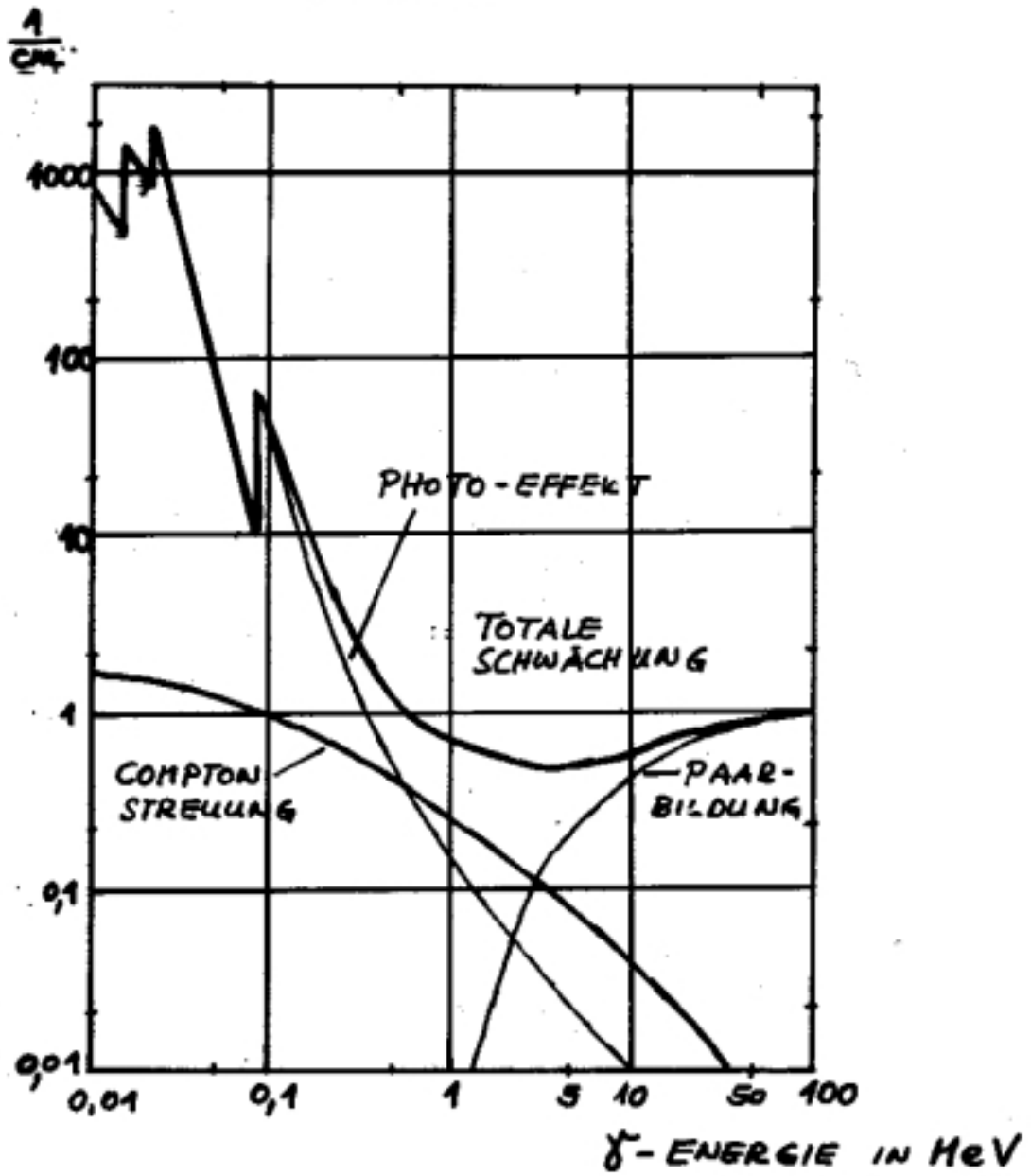




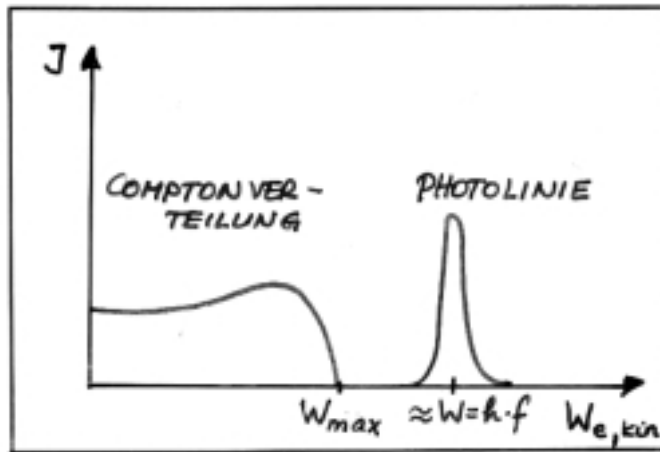
# Massenschwächungskoeffizient in Aluminium



Massenschwächungskoeffizient in Blei



## Energieverteilung der Rückstoßelektronen



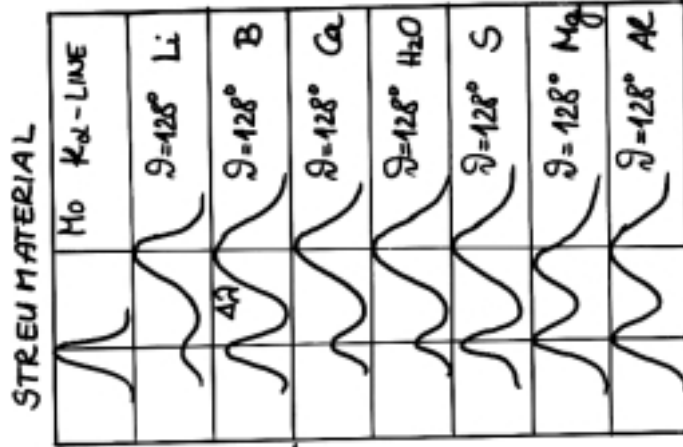
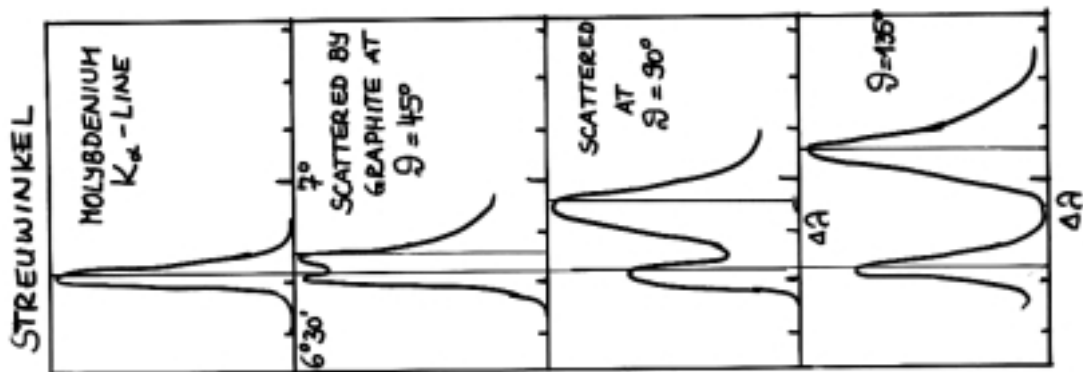
FÜR COMPTON-ELEKTRONEN SIND ALLE ENERGIEEN ZWISCHEN NULL (für  $\vartheta = 0^\circ$ ) UND  $W_{\max}$  (für  $\vartheta = 180^\circ$ ) möglich.

$$\text{Für } \vartheta = 180^\circ \text{ gilt } \Delta\lambda = 2 \quad \Rightarrow \quad W' = \frac{h \cdot c}{\lambda'} = \frac{h \cdot c}{\lambda + 2 \cdot \lambda_c}$$

$$W_{\max} = W - W' = \frac{h \cdot c}{\lambda} - \frac{h \cdot c}{\lambda + 2 \cdot \lambda_c} = h \cdot f \cdot \frac{2 \cdot \lambda_c}{2 \cdot \lambda_c + \lambda} = h \cdot f \cdot \frac{1}{1 + \frac{c}{2 \cdot \lambda_c}}$$

FÜR PHOTO-ELEKTRONEN gilt  $W_{e,kin} = W - W_A \approx W = h \cdot f$   
da  $W_A \ll W$ .

# Spektrum der COMPTON-Streustrahlung



**ERGEBNISSE :**

1.  $\Delta\lambda$  nimmt mit zunehmendem Winkel  $\vartheta$  zu.
2. Die Intensität der Streustrahlung nimmt auf Kosten der Intensität der nichtverschobenen Linie zu.
3.  $\Delta\lambda$  ist Streumaterial unabhängig.
4. Mit wachsender Ordnungszahl des Streumaterials nimmt die Intensität der nicht verschobenen Linie zu.

## IV. Literatur

- [1] TAYLOR, G.I.: Interference fringes with feeble light. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. XV (1910), 114-115.
- [2] JÖNSSON, Claus: Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten. Zeitschrift für Physik 161(1961), 454-474.
- [3] MÜLLER, Rainer und Hartmut WIESNER: Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation im Unterricht. Physik in der Schule 11(1997), 380-384.
- [4] MÜLLER, Rainer und Hartmut WIESNER: Die Interpretation der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation (1). Physik in der Schule 5(1997), 177-179.
- [5] MÜLLER, Rainer und Hartmut WIESNER: Die Interpretation der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation (2). Physik in der Schule 6(1997), 218-221.
- [6] MÜLLER, Rainer und Hartmut WIESNER: Die Ensemble-Interpretation der Quantenmechanik (1). Physik in der Schule 10(1996), 343-346.
- [7] MÜLLER, Rainer und Hartmut WIESNER: Die Ensemble-Interpretation der Quantenmechanik (2). Physik in der Schule 11(1996),
- [8] MÜLLER, Rainer und Hartmut WIESNER: Die Energie-Zeit-Unbestimmtheitsrelation. Geltung, Interpretation und Behandlung im Schulunterricht. Physik in der Schule 12(1997), 420-422.
- [9] MÜLLER, Rainer; SCHMINCKE, Bernhard und Hartmut WIESNER: Atomphysik und Philosophie. Niels Bohrs Interpretation der Quantenmechanik - Ein Thema für die Schule. Physik in der Schule 5(1996), 165-170.
- [10] IMPULSE Physik 2. Stuttgart: Klett 1998.
- [11] MÜLLER, Rainer und Hartmut WIESNER: Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik. Manuskript. München: 1999.
- [12] SÜDBECK, W. (Hrsg.): Materialien zum Kursunterricht Physik. 50 Beispiele für Kursarbeiten Physik in der gymnasialen Oberstufe. Teil 4: Atomphysik, Kernphysik, Relativitätstheorie. Köln: Aulis 1991.
- [13] FISCHLER, Helmut (Hrsg.): Quantenphysik in der Schule. Kiel: IPN 1992.
- [14] WIESNER, Hartmut: Beiträge zur Didaktik des Unterrichts über Quantenphysik in der Oberstufe. Essen: Westarp 1989.
- [15] SIMONSOHN, Gerhard: Probleme mit dem Photon im Physikunterricht. Praxis der Naturwissenschaften 9(1981), 257-266.
- [16] <http://www.physik.uni-muenchen.de/sektion/didaktik/milq/index.html>
- [17] GAMOW, G.: Mister Tomkins seltsame Reisen. Braunschweig: Vieweg 1978.
- [18] Unterrichtshilfen zu Interpretationen der Quantenphysik. Herausgegeben vom Institut für Lehrerfort- und -weiterbildung. Mainz: ILF 2000.



## V. Anhang

- A. TAYLOR, G. I.: Interference frings with feeble light. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 1909.
- B. JÖNSSON, Claus: Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten. Zeitschrift für Physik 161 (1961), 454-474.  
© Springer Verlag, Heidelberg
- C. Beispiele aus Kursarbeiten
1. Doppelspaltexperimente mit Schall, Licht und Elektronen
  2. Präparationsexperimente mit Licht und Elektronen
  3. Atomphysik: Die Wechselwirkung zwischen Photon und Elektron
  4. Klassisches und quantenmechanisches Verhalten von Elektronen  
© SÜDBECK, W (Hrsg.): Materialien zum Kursunterricht Physik. 50 Beispiele für Kursarbeiten Physik in der gymnasialen Oberstufe. Teil 4. Köln: Aulis Verlag 1991. S. 637-641.
  5. Die Photon-Elektron-Wechselwirkung  
© SÜDBECK, W (Hrsg.): Materialien zum Kursunterricht Physik. 50 Beispiele für Kursarbeiten Physik in der gymnasialen Oberstufe. Teil 4. Köln: Aulis Verlag 1991. S. 704-713.
- D. Informationen
- FWU-Filme
  - Homepage des Münchener Lehrstuhls für Didaktik der Physik

Wir danken den Verlagen für die freundlicherweise erteilte Abdruckerlaubnis.

Die TIMS-Studie hat belegt, dass durch die moderne Physik ein beachtlicher Lernzuwachs erreicht wird. "Wenn man die Testergebnisse analysiert, sieht man, daß in der 13. Klasse in der modernen Physik ein echter Sprung stattfindet, aber auch in anderen Stoffgebieten dazugelernt wird. Unsere Erklärung ist, daß mit der Einführung der modernen Physik der Unterricht generell eine neue theoretische Perspektive gewinnt, die es erlaubt, auch andere Bereiche besser zu verstehen. Es ist ein Glücksfall, daß die moderne Physik etwas wirklich Integrierendes hat." (Prof. Dr. Jürgen Baumert)

Ohne Zweifel gehört die Physik der Mikroobjekte zu dem Spannendsten und Tiefgründigsten, was die Naturwissenschaften zu bieten haben. Die Quantenphysik zwingt uns zu ungewohnten Welt-Sehweisen. Die Welt in der das plancksche Wirkungsquantum regiert, zeigt sich uns anders als es unsere naive Alltagsvorstellung erlaubt: wellig, körnig und stochastisch gleichermaßen. Grundlegend und fundamental funktioniert die Welt der Mikroobjekte nach wenigen Prinzipien und Regeln. Die Quantentheorie ist ihrem Charakter nach formal, aber sie kann didaktisch gut elementarisiert werden. Quantenphysik ist verstehbar und lernbar. Das Doppelspaltexperiment mit Elektronen und Photonen in den verschiedensten Variationen erweist sich als didaktischer Alleskönner, und es ist ein Schlüssel zum Verständnis der Physik der Mikroobjekte.

In dieser Handreichung wird die Physik der Mikroobjekte, ausgehend vom Doppelspaltexperiment, didaktisch begründet und unterrichtspraktisch angegangen. Die philosophische Komponente der Quantenphysik wird konsequent und durchgängig mit dem Blick auf die Interpretationen der Quantenphysik hin mitgedacht.