

# Fachdidaktik Physik: Quantenobjekte

Hans-Otto Carmesin

Gymnasium Athenaeum Stade, Studienseminar Stade

Hans-Otto.Carmesin@t-online.de

16. März 2021

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Lernstruktur der UE</b>	<b>2</b>
2.1	Fachliche Sicht . . . . .	2
2.2	Quantenobjekte in der Lebenswelt . . . . .	3
2.3	Pädagogische Umsetzung . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Materiewellen</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Photonen</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Einzelphotonen</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>Aufgaben</b>	<b>32</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>32</b>

---

# 1 Einleitung



Erstaunlich: Bei der UE Quantenobjekte entdecken die SuS eine faszinierende neuartige Welt.

Durch viele lebensweltliche Kontexte wie Sehen, Beleuchtung, Fotografie, Elektronik, Computer oder Solarzellen<sup>1</sup> können unsere SuS Quantenobjekte kennen lernen. Dabei können sie neuartige und universell gültige physikalische Konzepte entdecken.

## 2 Lernstruktur der UE

### 2.1 Fachliche Sicht

Die Bedeutung der Quantenobjekte für die Physik verdeutliche ich durch eine Betrachtung der grundlegenden Bewegungsgleichungen: Isaac Newton führte 1687 die Grundgleichung der Mechanik zur Vorausberechnung der Bahnen massiver Körper ein,  $F = m \cdot a$ . James C. Maxwell formulierte 1861 bis 1864 die Maxwell'schen Gleichungen. Diese beschreiben neben elektromagnetischen Feldern die Ausbreitung von Licht als elektromagnetische Welle. Max Planck entdeckte 1900, dass Licht auch Teilcheneigenschaft hat, welche durch das Planck'sche Wirkungsquantum  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Js charakterisiert wird. Albert Einstein erkannte, dass die Maxwell'schen Gleichungen der Lorentz-Transformation entsprechen und formulierte als Konsequenz 1905 seine spezielle Relativitätstheorie mit der Äquivalenz von Masse und Energie,  $E = m \cdot c^2$ . Louis de Broglie vermutete 1924, dass die für Photonen bereits bekannte Welleneigenschaft mitsamt der Gleichung  $\lambda = h/p$  auch für massive Teilchen gilt.

Die bisherigen Entdeckungen zeigten, dass sowohl Photonen als auch massive Teilchen wie Elektronen sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaft haben. Entsprechend formulierte Erwin Schrödinger 1926 die Schrödingergleichung als universelle Bewegungsgleichung für Quantenobjekte<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup>Auch modernste Solarzellen der dritten Generation können ein Kontext für sehr interessanten und effektiven Physikunterricht sein (s. [Martens \(2010\)](#)).

<sup>2</sup>Bereits 1925 formulierte Heisenberg eine äquivalente Matrizenmechanik für Quantenobjekte (s. [Wußing u. Brentjes \(1987\)](#)). Für die Dynamik ist neben der Wellenfunktion auch der Kollaps der Wellenfunktion beim Messprozess wichtig.

Eine Besonderheit eines einzelnen Quantenobjekts ist, dass sich seine Wellenfunktion in viele Richtungen ausbreiten kann, dabei "Information" beispielsweise über Polarisationsfilter großräumig und simultan einsammelt und bei anschließender Überlagerung instantan berücksichtigt. Diese Eigenschaft wird als Nichtlokalität von Quantenobjekten bezeichnet (s. [Auldreich \(2006\)](#)).

Zusammenfassend sind die beiden Grundpfeiler der modernen Physik die Theorie der Quantenobjekte und die Relativitätstheorie. Ich illustriere an einem Beispiel, wie damit grundlegende Beobachtungen gedeutet werden können: Ein Proton ist ungefähr  $10^{-15}m$  groß. Warum kann es nicht wesentlich kleiner sein? Das Proton hat die Masse  $1,7 \cdot 10^{-27}kg$ . Das entspricht der Energie  $E = m \cdot c^2 = 1,5 \cdot 10^{-10}J$ . Der zugehörige Impuls des Protons als Materiewelle beträgt gemäß  $E = \frac{1}{2}m \cdot v^2 = \frac{p^2}{2m}$  gerade  $1,7 \cdot 10^{-19} \frac{kg \cdot m}{s}$ . Das Proton als Materiewelle hat ungefähr die Ausdehnung der Wellenlänge  $\lambda = \frac{h}{p} = 0,9 \cdot 10^{-15}m$ . Wäre es kleiner, so müsste es eine kürzere Wellenlänge und folglich eine größere Masse haben.

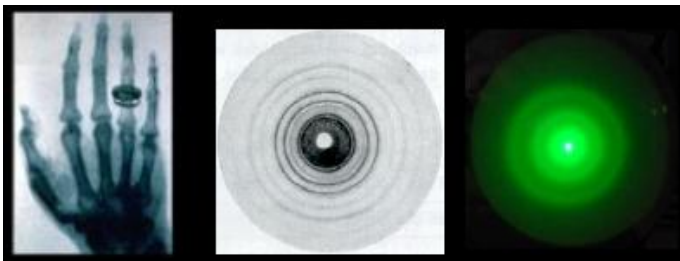


Abbildung 1: Durchleuchten:  
Links: Hand. Mitte: Polykristalline Silberfolie mit Röntgenstrahlen. Rechts: Polykristalline Graphitfolie mit Elektronen im Schulversuch.

## 2.2 Quantenobjekte in der Lebenswelt

Vielen Erscheinungen der Lebenswelt liegen Quantenobjekte zugrunde. Einige Beispiele sind: Die Lichtempfindlichkeit des Auges ist dadurch begrenzt, dass es noch einzelne Photonen erfassen kann. Um noch empfindlicher zu sein, müsste es bei gegebener Pupillengröße auch auf halbe oder geteilte Photonen ansprechen (s. [Carmesin \(2001\)](#)). Die Sehschärfe des Auges ist wesentlich durch die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation bestimmt ([Carmesin u. a. \(2020\)](#)). Moderne Energiesparlampen und LED-Lampen senden Lichtquanten gemäß elektronischen Energieniveaus, Energiebanden oder Energiestufen aus. Solche Energiestufen sind grundlegend für die Elektronik und damit für die Computer und die digitale Revolution. In CCD-Kameras und Solarzellen heben einzelne Photonen einzelne Elektronen auf eine höhere Energiestufe. Aus der Medizin ist das Durchleuchten mit Röntgenstrahlen bekannt. Dieses wird auf die Materialuntersuchung mit Hilfe der Beugung von Röntgenstrahlen und Elektronenwellen ausgeweitet.

## 2.3 Pädagogische Umsetzung

Wir lassen unsere SuS Quantenobjekte an lebensweltlichen Beispielen entdecken. Unsere SuS können die Teilcheneigenschaft des Photons am Beispiel ihrer Digitalkamera und die Welleneigenschaft des Elektrons beim Durchleuchten entdecken. Zusammen mit der bereits bekannten Welleneigenschaft des Photons und der Teilcheneigenschaft des Elektrons erkennen sie so den Welle-Teilchen-Dualismus. Dieser wird durch die Nichtlokalität noch einmal verdeutlicht.

Die UE gliedert sich in drei Sequenzen (s. Tabelle 1). Die UE beginnt mit den zwei voneinander unabhängigen Sequenzen *Materiewellen* und *Photonen*. Hier entdecken die SuS, dass

---

Materie auch Welleneigenschaften und elektromagnetische Wellen auch Teilcheneigenschaften haben. In der darauf aufbauenden Sequenz *Einzelphotonen* entdecken die SuS, dass Quantenobjekte nicht Wellen und Teilchen, sondern weder Wellen noch Teilchen sind.

Wir können uns vorstellen, dass ein Quantenobjekt wie ein Elefant ist, den ein Zoologe erstmals in extrem dichtem Nebel vorfindet. Dieser Biologe beobachtet nur den Rüssel sowie den Schwanz und denkt, das neue Tier sei ein "Rüsselschwanz". In Wirklichkeit ist es weder Rüssel noch Schwanz, sondern ein erst teilweise entdecktes Tier.

Untersuchungen zu Schülervorstellungen zeigen, dass die Lernenden den **Kalkül** mit der Wellenfunktion  $\psi$  relativ stabil erfassen. Dem Photon werden relativ sicher **Wellen- und Teilcheneigenschaft** zugeschrieben, es wird jedoch weniger souverän als Quantenobjekt, sondern auch als Teilchen bezeichnet (das entspricht auch dem lushigen Sprachgebrauch in der Physik, so spricht man vom Teilchenbeschleuniger und nicht vom Quantenobjektbeschleuniger). Die **Nichtlokalität** ist den SuS ebenfalls bewusst. Die Lernenden finden es spannend, die Nichtlokalität bei der Quantenkryptografie anzuwenden (Carmesin u. a. (2020)). Weiterhin stellt die Nichtlokalität ein interessantes Gebiet physikalischer Grundlagenforschung dar (Carmesin (2021)).

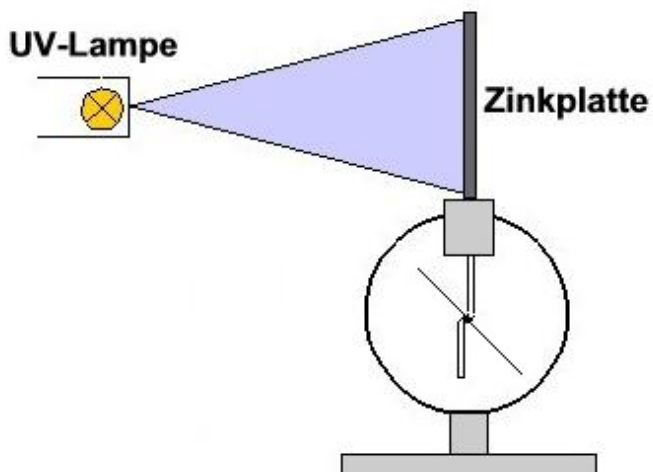


Abbildung 2: Lichtteilchen:

Das Auslösen von Elektronen mit Hilfe von Licht ist das Grundprinzip der Digitalkamera. Es kann mit einer Zinkplatte illustriert werden: UV-Strahlung löst die Elektronen der anfangs geladenen Zinkplatte und entlädt die Platte. Sichtbares Licht kann das nicht. Das deuten wir mit der Teilcheneigenschaft: UV-Strahlen haben besonders energiereiche Teilchen, welche die Elektronen von der Zinkplatte ablösen können.

Inhaltsbezogene Kompetenzen: SuS ...	Prozessbezogene Kompetenzen: SuS ...
<p>... beschreiben das Experiment mit der Elektronenbeugungsröhre.</p> <p>... ermitteln die Wellenlänge bei Quantenobjekten mit Ruhemasse mithilfe der de-Broglie-Gleichung.</p> <p>... eA: nennen in diesem Zusammenhang die Definition des Impulses.</p>	<p>... deuten die Beobachtungen mithilfe optischer Analogieversuche an Transmissionsgittern (eA: oder mithilfe der Bragg-Reflexion).</p> <p>... bestätigen durch Auswertung von Messwerten die Antiproportionalität zwischen Wellenlänge und Geschwindigkeit.</p>
<p>... deuten die jeweiligen Interferenzmuster bei Doppelspaltexperimenten für einzelne Photonen bzw. Elektronen stochastisch.</p> <p>... eA: beschreiben die wesentliche Aussage der Unbestimmtheitsrelation für Ort und Impuls.</p>	<p>... beschreiben die entsprechenden Interferenzmuster bei geringer und hoher Intensität.</p> <p>... eA: verwenden zur Deutung der Interferenzmuster die Zeigerdarstellung oder eine andere geeignete Darstellung.</p> <p>... eA: beschreiben den Zusammenhang zwischen der Nachweiswahrscheinlichkeit für ein einzelnes Quantenobjekt und dem Quadrat der resultierenden Zeigerlänge bzw. der Amplitude der resultierenden Sinusfunktion.</p> <p>... eA: wenden ihre Kenntnisse auf die Deutung von Experimenten mit Quantenobjekten größerer Masse (z. B. kalte Neutronen) an.</p> <p>... eA: erläutern an einem Mehrfachspaltexperiment die Unbestimmtheitsrelation für Ort und Impuls.</p>
<p>... eA: beschreiben den Aufbau eines Mach-Zehnder-Interferometers.</p> <p>... eA. interpretieren ein Welcher-Weg-Experiment unter den Gesichtspunkten Nichtlokalität und Komplementarität.</p>	<p>... eA: erläutern die Begriffe Komplementarität und Nichtlokalität mithilfe der Beobachtungen in einem Welcher-Weg-Experiment.</p>
<p>... erläutern die Bestimmung der planckschen Konstante <math>h</math> mit LEDs in ihrer Funktion als Energiewandler.</p>	<p>... deuten das zugehörige Experiment mithilfe des Photonenmodells.</p> <p>... überprüfen durch angeleitete Auswertung von Messwerten die Hypothese der Proportionalität zwischen Energie des Photons und Frequenz.</p>
<p>... eA: beschreiben ein Experiment zur Bestimmung der Energie der Photoelektronen beim äußeren lichtelektrischen Effekt mit der Vakuum-Fotozelle.</p> <p>... eA: erläutern die Entstehung des Röntgenbremspektrums als Energieübertragung von Elektronen auf Photonen.</p>	<p>... eA: wenden ihre Kenntnisse über das Photonenmodell des Lichts auf diese Situation an.</p> <p>... eA: deuten das zugehörige f-E-Diagramm.</p> <p>... eA: ermitteln aus Röntgenbremspektren einen Wert für die plancksche Konstante <math>h</math>.</p>

Tabelle 1: KC: (s. [Beime u. a. \(2012\)](#); [Brüning u. a. \(2010\)](#); [Frenzel \(2017\)](#); [Gehmann \(2015\)](#)).

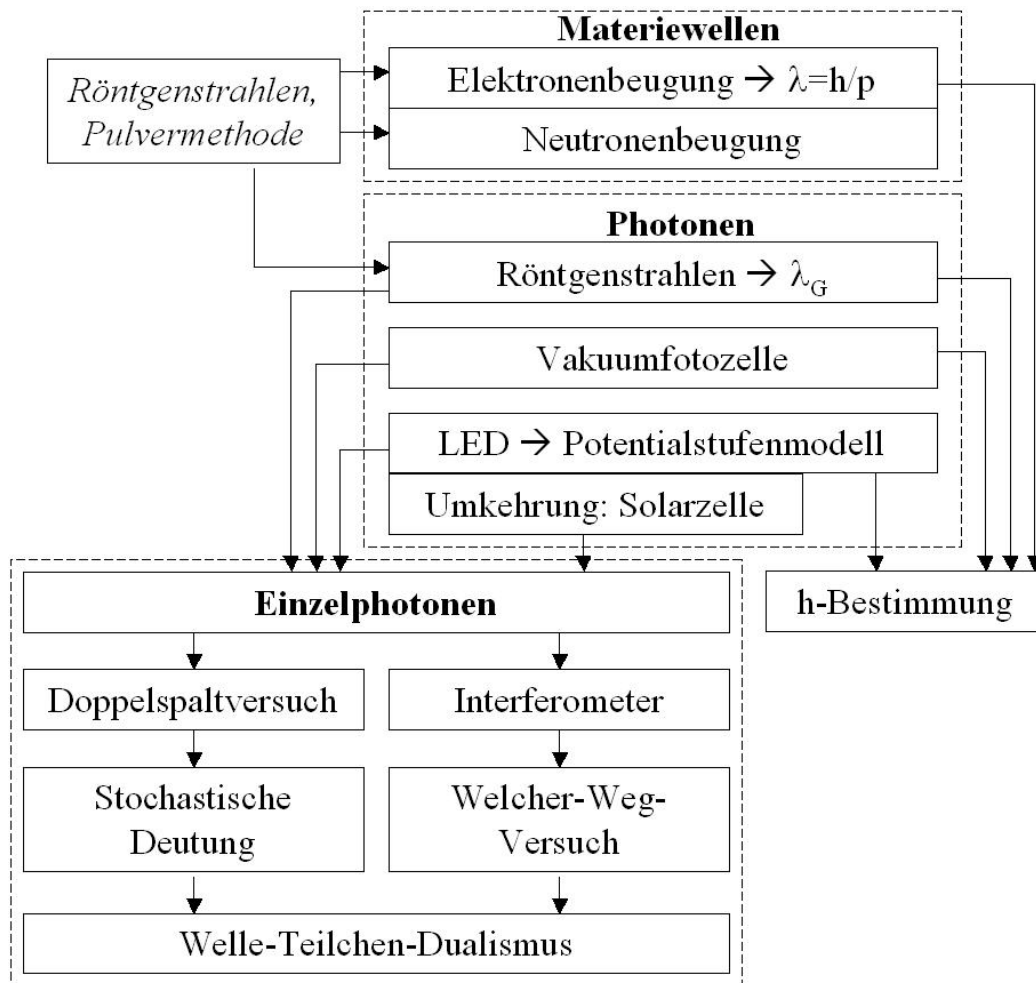
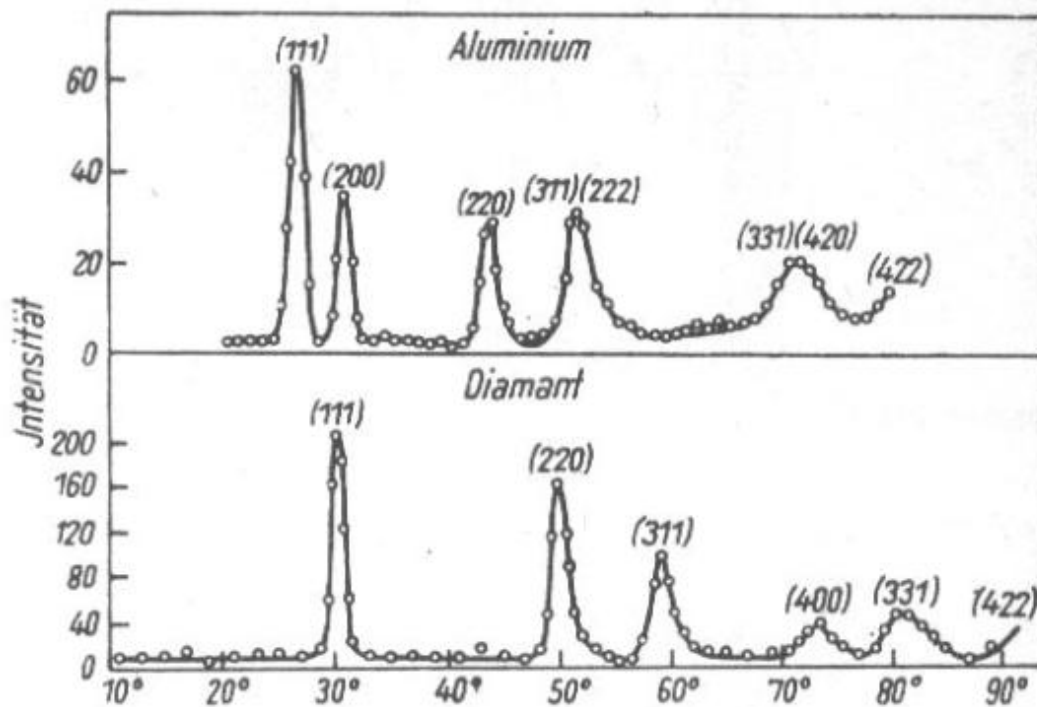


Abbildung 3: Mögliche Lernstruktur zur UE. Kursiv: Lernvoraussetzung aus der Wellenlehre.

## Beugung von Neutronen



Neutronen der Wellenlänge 106 pm wurden an Diamant- sowie Aluminiumpulver gebeugt. Die Intensität wurde für verschiedene Ablenkwinkel aufgetragen.

- 1) Bestimmen Sie die Geschwindigkeit der Neutronen.
- 2) Bestimmen Sie den größten Netzebenenabstand in Diamant und Aluminium!

Abbildung 4: Zur Beugung massiverer Teilchen erhalten die SuS Aufgabenblätter, da es kaum passende Schulversuche gibt.

### 3 Materiewellen

Eine mögliche Realisierung der Unterrichtssequenz veranschauliche ich durch einen Vorschlag für die Stundenabfolge und Kurzentwürfe für einige zentrale Stunden sowie ein Aufgabenblatt, s. Abb. 4.

Nr.	Stundenthema	Stundenlernziel
1	Entdeckung der Welleneigenschaft von Elektronen	Die SuS sollen die Wellennatur von Elektronen begründen können.
2	Entdeckung der Antiproportionalität der Wellenlänge und des Impulses bei Elektronen	Die SuS sollen die Gleichung $\lambda = h/p$ begründen können.
3	Entdeckung der Welleneigenschaft von Neutronen, Heliumatomen und C60-Fullerenen	Die SuS sollen die Wellennatur von Materie begründen können.

Tabelle 2: Unterrichtssequenz Materiewellen.

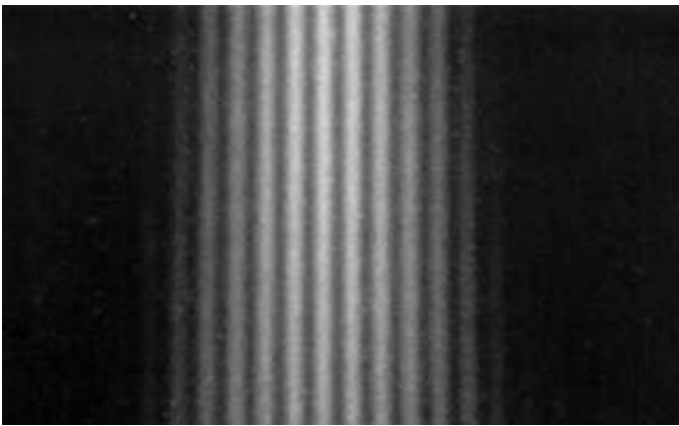


Abbildung 5: Elektronenbeugung am Doppelspalt:

1961 zeichnete Jönsson die Beugung von Elektronen am Doppelspalt auf. Er beschleunigte die Elektronen mit 50 kV, sandte sie durch einen Doppelspalt mit Spaltabstand 1,2 Mikrometer und erfasste das Beugungsmuster auf einem Schirm 40 cm hinter dem Doppelspalt.



**Kurzentwurf für eine Physikstunde**

Athenaeum

PH EN 12

**Thema der Unterrichtssequenz: Materiewellen**

Entdeckung der Welleneigenschaft von Elektronen

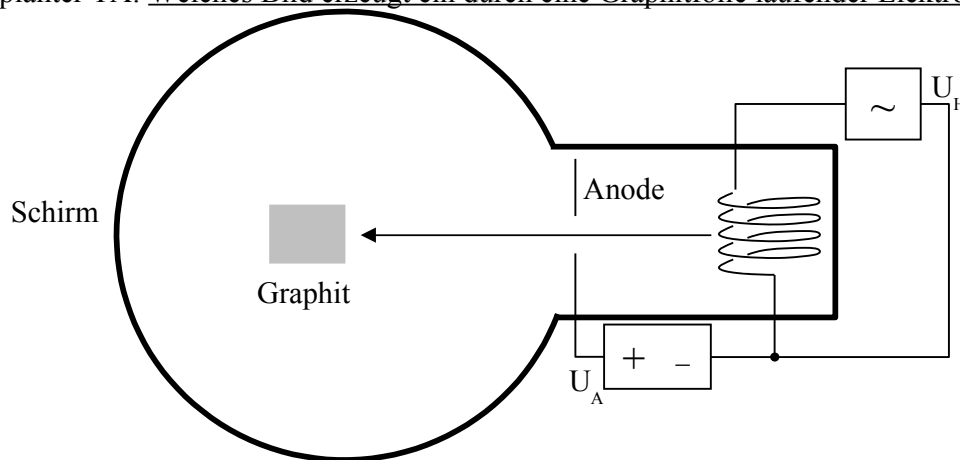
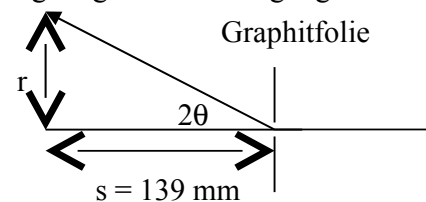
**Didaktik:** SLZ: Die SuS sollen die Wellennatur von Elektronen begründen können.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
Lernvoraussetzung: Beugung von Röntgenstrahlen	Erläutern
Lernvoraussetzung: Bragg-Bedingung	Erläutern, Anwenden
Lernvoraussetzung: Pulvermethode	Erläutern, Anwenden
Teillernziel: Wellennatur von Elektronen	Begründen
Teillernziel: Wellenlänge von Elektronen	Bestimmen

**Methodik:** Dominantes Lehrverfahren: Entdeckenlassend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Hinführung:</u> DE	Beschreiben	LSG
7	<u>Problemstellung:</u> Leitfrage	Entwickeln	LSG
15	<u>Analyse:</u> kognitiver Konflikt, Ideen	SuS vermuten und schlagen vor	MuG
35	<u>Lösung:</u> $\lambda$	Auswertung	GA
40	<u>Sicherung:</u> s.u.	SV, Reflexion, Deutung	SV
45	<u>Konsolidierung:</u> r für andere U	HA: $\lambda$ berechnen	EA

Geplanter TA: Welches Bild erzeugt ein durch eine Graphitfolie laufender Elektronenstrahl?

Vermutungen: Verschwommener Fleck, denn die Elektronen werden zufällig etwas abgelenkt.Beobachtung: Am Schirm entstehen konzentrische Ringe. **WARUM?**Deutung: Die Elektronen verhalten sich hier wie Wellen, die an der Graphitfolie gebeugt werden. Denn die Ringe sehen genauso aus, wie die Beugungsringe bei der Beugung von Röntgenstrahlen nach der Pulvermethode.Messwerte: Die Radien sind  $r_1 = 1,7$  cm und  $r_2 = 2,9$  cm, bei  $U_A = 2,9$  kV.Netzebenenabstand:  $d_1 = 0,213$  nm &  $d_2 = 0,123$  nmAuswertung:  $\lambda = ?$ Geplante Schülerfolie:  $2 \cdot d \cdot \sin(\theta) = n \cdot \lambda$  mit  $n = 1 \rightarrow \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin(0,5 \cdot \arctan[r/s])$  $\lambda = 25,9$  pm für  $r_1$  $\lambda = 25,3$  pm für  $r_2$

## Kurzentwurf für eine Physikstunde

Athenaeum

PH EN 12

### Thema der Unterrichtssequenz: Materiewellen

Entdeckung der Welleneigenschaft von Elektronen

Entdeckung der Antiproportionalität von  $\lambda$  und  $p$  und des Planckschen Wirkungsquantums

**Didaktik:** SLZ: Die SuS sollen die Gleichung  $\lambda=h/p$  begründen können.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Elektronenwellen	Begründen
LV: $\lambda$ für Elektronenwellen	Bestimmen
LV: Impuls der Elektronen	Bestimmen
TLZ: $p \sim 1/\lambda$	Begründen
TLZ: $h = p\lambda$	Bestimmen

**Methodik:** Dominantes Lehrverfahren: Entdeckenlassend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Hinführung:</u> HA: $\lambda(U)$	SV	SV
7	<u>Problemstellung:</u> Leitfrage	Entwickeln	LSG
12	<u>Analyse:</u> Vermutungen	SuS schlagen vor	MuG
35	<u>Lösung:</u> $\lambda \sim 1/p$ ; $h$	Auswertung	GA
40	<u>Sicherung:</u> s.u.	SV, Reflexion, Deutung	SV
45	<u>Konsolidierung:</u> Elektronenmikroskop, AB	HA: $\lambda$ klein $\rightarrow$ Beobachtung genau	EA

Geplanter TA

$$\begin{aligned}
 \text{HA: } U_A = 2,9 \text{ kV} &\rightarrow \lambda = 25,6 \text{ pm} \\
 U_A = 1,3 \text{ kV} &\rightarrow \lambda = 34,2 \text{ pm} \\
 U_A = 5,2 \text{ kV} &\rightarrow \lambda = 16,4 \text{ pm} \\
 U_A = 9,5 \text{ kV} &\rightarrow \lambda = 12,2 \text{ pm}
 \end{aligned}$$

Wie hängt die Wellenlänge eines Elektrons von seinem Impuls ab?

Vermutungen:  $\lambda \sim 1/p$ ,  $\lambda \sim 1/p^2$ ,  $\lambda \sim 1/p^{0,5}$

Ergebnisse: Die Wellenlänge eines Elektrons ist antiproportional zu dessen Impuls.

Es gilt  $\lambda = h/p$  mit  $h = 6,72 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$  (Literaturwert  $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ).

Bezeichnung: Die neue Konstante  $h$  heißt Planck'sches Wirkungsquantum.

Geplante Schülerfolie:  $U \cdot e = 0,5 \cdot m \cdot v^2 = p^2/(2m) \rightarrow p = (2U \cdot e \cdot m)^{0,5}$

U in V	lambda in m	p in kg*m/s	lambda*p in Js
2900	2,56E-11	2,90599E-23	7,44E-34
1300	3,42E-11	1,94566E-23	6,65E-34
5200	1,64E-11	3,89132E-23	6,38E-34
9500	1,22E-11	5,25966E-23	6,42E-34
Mittelwert			6,72E-34

Abbildung 6: Kurzentwurf zur Entdeckung des Zusammenhangs von Wellenlänge und Impuls bei Elektronen.

## 4 Photonen

Eine mögliche Realisierung der Unterrichtssequenz veranschauliche ich durch einen Vorschlag für die Stundenabfolge und Kurzentwürfe für einige zentrale Stunden. Eine Veranschaulichung von Lichtteilchen ermöglicht ein Nachtsichtgerät oder eine Avalanche Photodiode, s. Abb. 7.

Nr.	Stundenthema	Stundenlernziel
1	Entdeckung des Photoeffekts bei der Vakuumfotозelle	Die SuS sollen den Photoeffekt analysieren können.
2	Deutung des Photoeffekts bei der Vakuumfotозelle	Die SuS sollen den Photoeffekt deuten können.
3	Bau einer LED-Taschenlampe	Die SuS sollen die für eine LED-Taschenlampe nötige Energie ermitteln können.
4	Entdeckung des Zusammenhangs von Energie und Wellenlänge bei Photonen	Die SuS sollen die Formel $E = h \cdot f$ begründen können.
5	Entdeckung der Grenzwellenlänge bei Röntgenstrahlen	Die SuS sollen die Grenzwellenlänge qualitativ und quantitativ deuten können.
6	Entdeckung der Umkehrbarkeit der Emission bei der LED	Die SuS sollen die LED als winzige Solarzelle betreiben und mit dem Energiestufendiagramm deuten können.

Tabelle 3: Unterrichtssequenz Photonen.

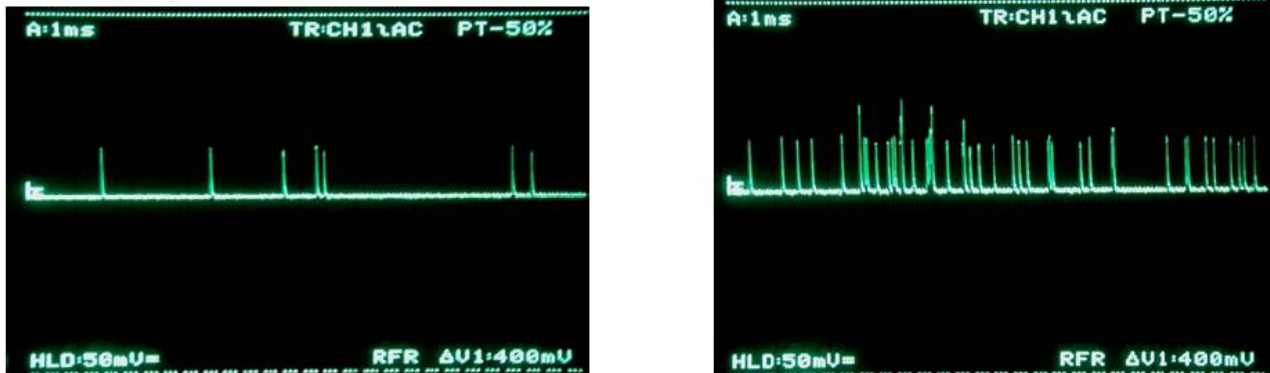


Abbildung 7: Einzelphotonen: In der Avalanche-Photodiode löst im Prinzip jedes Photon eine Elektronenlawine aus: Im Dunkeln lösen sich wenige Elektronenlawinen auch ohne Photon (links), während bei schwacher Beleuchtung einzelne Photonen als Maxima am Oszilloskop erscheinen (rechts).

**Kurzentwurf für eine Physikstunde**

Athenaeum

PH EN 12

**Thema der Unterrichtseinheit: Photonen**

Entdeckung des Photoeffekts bei der Vakuumfotозelle

**Didaktik:** Stundenlernziel: Die SuS sollen den Photoeffekt elektronisch deuten können.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Elektron, Strom, Spannung, Widerstand	Erläutern, Anwenden
LV: Wellenmodell des Lichts	Erläutern, Anwenden
TLZ: Photoeffekt	Beschreiben
TLZ: Stromstärke	Bestimmen
TLZ: Zusammenhang Stromstärke – Farbe - Beleuchtungsstärke	Ermitteln

**Methodik:** Dominantes Lehrverfahren: Fragend erarbeitend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
3	<u>Hinführung:</u> CCD-Kamera	DE Fotozelle	LSG
6	<u>Entwicklung der Stundenfrage:</u>	Leitfrage	LSG
20	<u>Erarbeitung:</u> DE, Messung von U, I- Bestimmung, elektronische Deutung	Experimentieren, Auswerten, Zusammenhang ermitteln	SSG
25	<u>Sicherung:</u> s.u.	SV, Reflexion	SV
30	<u>Konsolidierung:</u>	Skizzieren der Elektronenbewegung	EA

Geplanter TA

Wie können wir aus Licht Elektrizität erzeugen?Entdeckung: 1839, Alexandre EdmondFunktionsweise

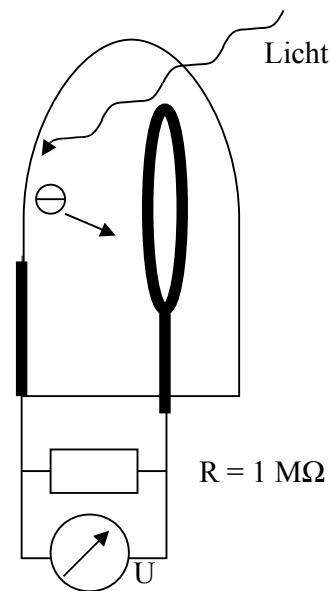
Licht trifft auf die Metallschicht.

Dabei wird ein Elektron aus dem Metall gelöst.

Dieses kommt zufällig zur Drahtschleife.

Die Ladung fließt durch das Messgerät  
zurück zur Metallfolie.

$$I = U/R = 1 \text{ mV}/1 \text{ M}\Omega = 1 \text{ nA}$$

Ergebnis: Licht kann Elektronen aus einem Metall lösen.

### Kurzentwurf für eine Physikstunde

Athenaeum

PH EN 12

**Thema der Unterrichtseinheit: Photonen**

Entdeckung des Photoeffekts bei der Vakuumfotозelle

**Entdeckung des Photons**

**Didaktik:** Stundenlernziel: Die SuS sollen das Lichtteilchenmodell begründen können.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Photoeffekt	Beschreiben
TLZ: Zusammenhang Stromstärke – Farbe - Beleuchtungsstärke	Nennen
TLZ: Energieportion	Begründen
TLZ: Photon	Erläutern
TLZ: Besonders energiereiche Photonen bei Blau	Begründen

**Methodik:** Dominantes Lehrverfahren: Fragend erarbeitend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
2	<u>Einstieg:</u> Farb-CCD-Kamera	DE Fotозelle	
10	<u>Entwicklung der Stundenfrage:</u> Zusammenhang Stromstärke – Farbe – Beleuchtungsstärke: kognitiver Konflikt	Leitfrage	LSG
30	<u>Erarbeitung:</u> s.u.	Vermuten, Argumentieren	SSG
40	<u>Sicherung:</u> s.u.	SV, Reflexion	SV
45	<u>Konsolidierung:</u> Materieteilchen	AB, HA	EA

Geplanter TA

Versuch: Wir beleuchten die Vakuumfotозelle mit blauem, grünem und rotem Licht.

Beobachtung:

Blau	Grün	Rot
0,5 mV	0,2 mV	0 mV
0,5 nA	0,2 nA;	0 nA
25 Lux	30 Lux	20 Lux

Warum erzeugt rotes Licht bei der Vakuumfotозelle keinen Strom?

Ideen: Weniger Wellenbäuche bei Rot, das erklärt nicht  $U=0$ .

Wir können es nicht mit dem Wellenmodell erklären.

Lichtteilchen

Ein Lichtteilchen löst ein Elektron aus dem Metall. ✓

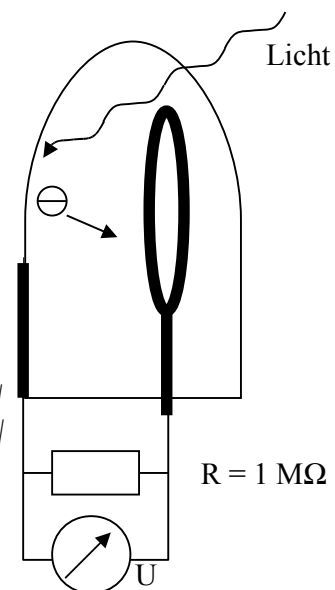
Ein Lichtteilchen des Blau kann ein Elektron aus dem Metall lösen. ✓

Ein Lichtteilchen des Rot kann kein Elektron aus dem Metall lösen. ✓

Deutung: Licht kommt in Form von Teilchen vor.

Bezeichnung: Die Teilchen des Lichts heißen Photonen.

Analogie: Ähnlich wie das Elektron hat auch das Licht Wellen- und Teilcheneigenschaften.



## Kurzentwurf für eine Physikstunde

Athenaeum

PH EN 13

### Thema der Unterrichtseinheit: Quantenobjekte

Entdeckung des Photoeffekts bei der Vakuumfotозelle

Deutung des Photoeffekts bei der Vakuumfotозelle

### Bau einer LED-Taschenlampe

**Didaktik:** SLZ: Die SuS sollen die für eine LED-Taschenlampe nötige Energie ermitteln können.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Photoeffekt	Erläutern, Deuten
LV: LED	Beschreiben
TLZ: U-I-Kennlinie der LED (1)	Ermitteln
TLZ: Spannung, ab der die LED leuchtet (2)	Ermitteln
TLZ: Minimalspannung einer Taschenlampe	Ermitteln

**Methodik:** Dominantes Lehrverfahren: Problemlösend

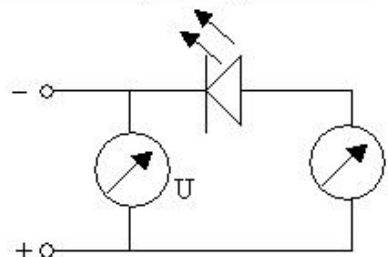
Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Hinführung:</u> LED-Taschenlampe	DE	LSG
7	<u>Problemstellung:</u> Lampenbau	Leitfrage	LSG
12	<u>Analyse:</u> Versuchsaufbau	Planung	MuG
35	<u>Lösung:</u> Durchführung	SE, themendifferenziert, s. o. (1), (2)	GA
40	<u>Sicherung:</u> s. u.	SV, Reflexion, OHP, Graph	SV
45	<u>Festigung:</u> Energiestufenmodell	AB	EA

Geplanter TA

Wie groß muss die Spannung einer LED-Taschenlampe wenigstens sein?

Material: LED, Voltmeter, Durchlassrichtung

Versuchsskizze:



Ergebnisse: Die Stromstärke nimmt ab einer bestimmten Spannung  $U_S$  (Schwellenspannung) abrupt zu. Bei dieser Spannung beginnt die LED zu leuchten. Diese Spannung muss die Taschenlampenbatterie wenigstens haben. Die Batterie einer roten Taschenlampe braucht besonders wenig Spannung.

$\lambda$ in nm	405	470	525	590	630	875
$U_S$ in V	2,5	2,1	1,85	1,4	1,33	0,95

Abbildung 8: Kurzentwurf zur LED-Lampe.

## Kurzentwurf für eine Physikstunde

Athenaeum

PH EN 13

### Thema der Unterrichtseinheit: Quantenobjekte

Entdeckung des Photoeffekts bei der Vakuumfotозelle

Deutung des Photoeffekts bei der Vakuumfotозelle

Bau einer LED-Taschenlampe

### Entdeckung des Zusammenhangs von Energie und Wellenlänge bei Photonen

**Didaktik:** Stundenlernziel: Die SuS sollen die Formel  $E = h \cdot f$  begründen können.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Energiestufenmodell	Erläutern, Anwenden
LV: Schwellenspannung bei LEDs	Ermitteln, Anwenden
TLZ: Nutzung der Schwellenspannungen	Begründen
TLZ: Frequenzen	Bestimmen
TLZ: $E \sim f$ und $E = h \cdot f$	Ermitteln

**Methodik:** Dominantes Lehrverfahren: Entdeckenlassend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Hinführung:</u> Vermutung zu energiereichen Photonen im Blau	Wiederholen	LSG
7	<u>Problemstellung:</u>	Leitfrage	LSG
12	<u>Analyse:</u> $U_S$	Planung	MuG
35	<u>Lösung:</u> Durchführung	SE, themendifferenziert, s. o. (1), (2)	GA
40	<u>Sicherung:</u> s.u.	SV, Reflexion	SV
45	<u>Festigung:</u> Beispiele		EA

Geplanter TA

Wie hängt die Energie eines Photons von dessen Frequenz ab?

Ideen:  $U_S \rightarrow E$ ;  $\lambda \rightarrow f$

Ergebnis: Die Energie eines Photons mit der Frequenz  $f$  beträgt  $E = h \cdot f$

Geplante Schülerfolie:

$\lambda$ in nm	$f$ in $10^{14}$ Hz	$U_S$ in V	$E$ in $10^{-19}$ J
405	7,40	2,5	4
470	6,38	2,1	3,36
525	5,71	1,85	2,96
590	5,08	1,4	2,24
630	4,76	1,33	2,128
875	3,43	0,95	1,52

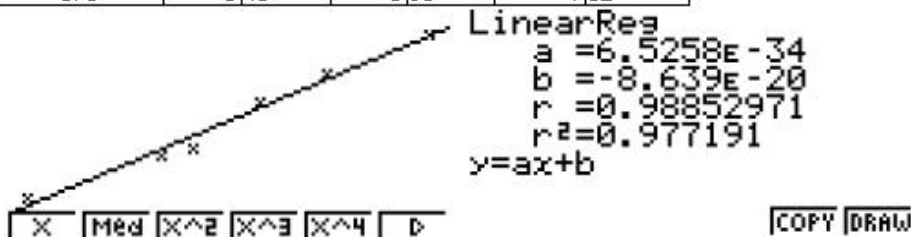
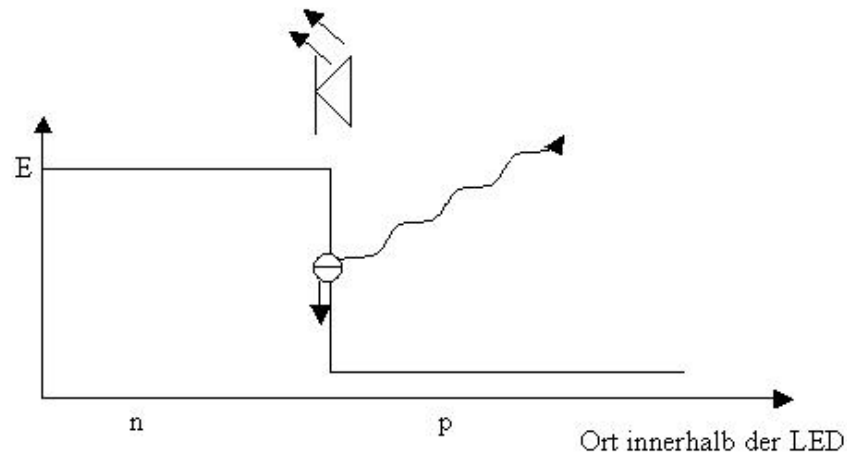


Abbildung 9: Kurzentwurf zur Energie des Photons.

**Energiestufenmodell der LED**



- Das Elektron kommt von links in den n-leitenden Bereich der LED, es hat dabei die Energie  $U \cdot e$  aus der Batterie.
  - Bei der Lichtaussendung gibt es seine Energie  $U \cdot e$  vollständig an ein Photon ab.
- 1) Skizzieren Sie die Bewegung des Elektrons durch die LED im Energiestufenmodell und im Schaltzeichen.
  - 2) Deuten Sie mit dem Energiestufenmodell, warum die Stromstärke der LED bei der Spannung  $U_G$  zunimmt, bei der die LED anfängt zu leuchten.

Abbildung 10: Das Energiestufenmodell (s. Gomolez u. a. (1998)) deutet die Emission bei der LED und bereitet Modelle der Atomphysik vor.

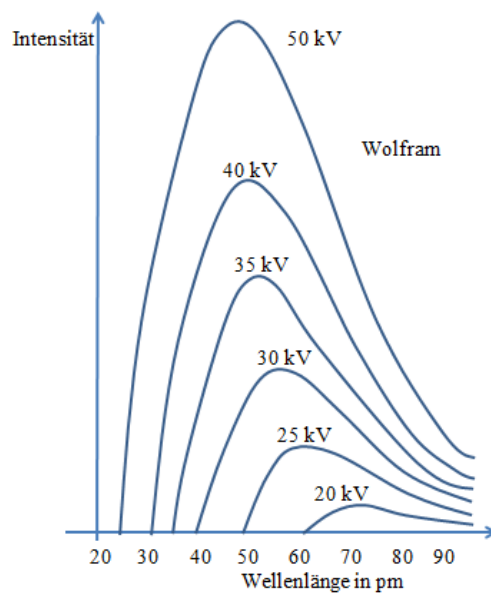
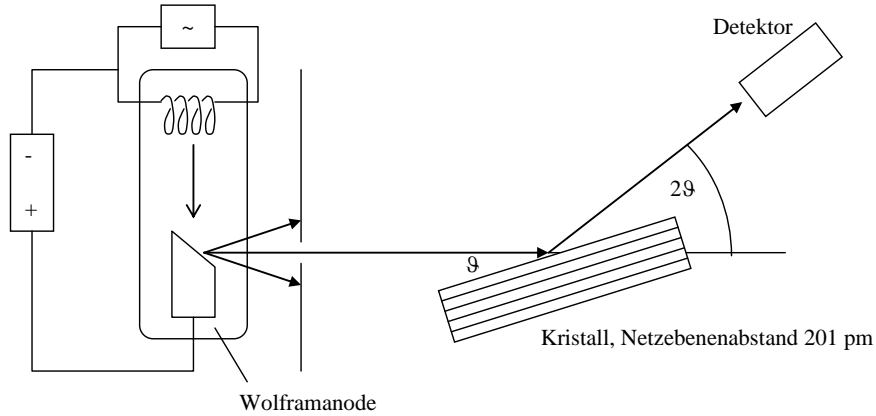


Abbildung 11: Umkehrung der Lichtemission der LED: Ein hochohmiges Voltmeter zeigt die von einer beleuchteten LED am Voltmeter durch Ladungsansammlung erzeugte Spannung in Volt an.



Röntgenspektrum der Bremsstrahlung

Versuchsskizze:



Analysieren Sie das Versuchsergebnis.

Abbildung 12: Ist in der Sammlung kein Röntgengerät, so kann die Grenzwellenlänge mit Hilfe von Applets oder Aufgabenblättern eingeführt werden (s. [Gomolez u. a. \(1998\)](#)).

---

## 5 Einzelphotonen

Eine mögliche Realisierung der Unterrichtssequenz veranschauliche ich durch einen Vorschlag für die Stundenabfolge und Kurzentwürfe für einige zentrale Stunden. Einen alternativen Zugang ermöglichen Versuche mit einem Teleskop und Sternenlicht (s. Carmesin (2006)).

Nr.	Stundenthema	Stundenlernziel
1	Analyse der Energiedichte elektrischer Felder	Die SuS leiten die Energiedichte her, um ihre Fachkompetenz zu schulen.
2	Bestimmen der Helligkeitsverteilung eines Beugungsmaximums	Die SuS bestimmen I, um ihre Erkenntnisgewinnungskompetenz zu schulen.
3	Entdeckung der Proportionalität der Antreffwahrscheinlichkeit zum Quadrat der Amplitude der Wellenfunktion	Die SuS begründen die Proportionalität, um ihre Mathematisierungskompetenz zu schulen.
4	Entdecken der Nichtlokalität	Die SuS sollen die Nichtlokalität von Photonen begründen können.
5	Entdecken der Komplementarität	Die SuS sollen die Komplementarität von Polarisationen begründen können.

Tabelle 4: Unterrichtssequenz Einzelphotonen.

**Kurzentwurf für eine Physikstunde**

Athenaeum

PH EN 11

**Thema der Unterrichtseinheit: Wellen oder Quantenobjekte**

...

**Analyse der Energiedichte elektrischer Felder****Didaktik:** KUZ: Die SuS leiten die Energiedichte her, um ihre Fachkompetenz zu schulen.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Kondensatorgleichungen zu E, C, U	Erläutern, Anwenden
LV: Elektrische Feldstärke	Erläutern, Anwenden
DS: Kondensatorenergie = Feldenergie	Erläutern, Anwenden
DS: Feldenergieformel	Herleiten, Anwenden

**Methodik:** Dominantes Lehrverfahren: Problemlösend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Einstieg:</u> Einstiegsbilder	Beschreiben	LSG
8	<u>Problemstellung:</u>	Leitfrage	LSG
20	<u>Analyse:</u> Ideen	SuS schlagen vor	MuG/LSG
35	<u>Lösung:</u> Herleiten	PMLH	GA
40	<u>Sicherung:</u> s.u.	SV, Reflexion, Deutung	SV
45	<u>Festigung:</u> Rechenbeispiele	Reserve	LSG

Geplanter TA

**Wie hoch ist die Energiedichte eines Blitzes mit  $|\vec{E}| = 200\,000\text{ V/m}$ ?**Durchmesser 3 cm, Länge 1000 m, Dauer 30  $\mu\text{s}$ Ideen:  $|\vec{E}| = U/d$ Kondensatormodell:  $E = 0,5 \cdot Q \cdot U = 0,5 \cdot C \cdot U^2$  mit  $C = \epsilon_0 \cdot A/d$ ;

Kondensatorenergie gleich Feldenergie, Gesucht: E/V

Geplante Schülerlösung:

$$E = 0,5 \cdot C \cdot U^2 = 0,5 \cdot U^2 \cdot \epsilon_0 \cdot A/d \quad | \quad U = |\vec{E}| \cdot d$$

$$E = 0,5 \cdot |\vec{E}|^2 \cdot \epsilon_0 \cdot A \cdot d \quad | \quad V = A \cdot d \quad | : V$$

$$E/V = 0,5 \cdot \epsilon_0 \cdot |\vec{E}|^2 = 0,5 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C/(V}\cdot\text{m)} \cdot 200\,000^2 \text{ V}^2/\text{m}^2 = 0,177 \text{ J/m}^3$$

Ergebnisse: Der Blitz hat die Energiedichte  $E/V = 0,177 \text{ J/m}^3$ . Die Energiedichte eines elektrischen Feldes mit einer Feldstärke  $|\vec{E}|$  beträgt:  $E/V = 0,5 \cdot \epsilon_0 \cdot |\vec{E}|^2$ Konsequenzen: Die Energiedichte einer elektromagnetischen Welle mit einer Feldstärkenamplitude von  $|\vec{E}|$  beträgt:  $E/V = 0,5 \cdot \epsilon_0 \cdot |\vec{E}|^2$ . Die Energiedichte einer elektromagnetischen Welle ist proportional zu ihrer Auslenkung  $\Psi(t,x)$ . Gesprochen: Psi

Einstiegsbilder:



**Kurzentwurf für eine Physikstunde**

Athenaeum

PH EN 11

**Thema der Unterrichtseinheit: Wellen oder Quantenobjekte**

... Analyse der Energiedichte elektrischer Felder

**Bestimmen der Helligkeitsverteilung eines Beugungsmaximums**

**Didaktik:** KUZ: Die SuS bestimmen I, um ihre Erkenntnisgewinnungskompetenz zu schulen.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Intensität ~ Energiedichte ~ Feldstärke <sup>2</sup>	Erläutern, Anwenden
LV: Beugung am Spalt	Erläutern, Anwenden
LV: Wellengleichung	Erläutern, Anwenden
LV: Zeigerdarstellung	Erläutern
DS: Intensitätsfoto	Erläutern, Durchführen
DS: Intensitätsauswertung	Erläutern, Durchführen
DS: Zeiger und Δφ	Erklären, Zeichnen, Berechnen
DS: Längenquadrat = Zeigerquadrat	Erklären, Anwenden
DS: Intensitätsverhältnisse	Berechnen

**Methodik:** Dominantes Lehrverfahren: Darbietend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Einstieg:</u> Einstiegsbild	Beschreiben	LSG
8	<u>Stundenfrage:</u>	Leitfrage	LSG
15	<u>Anknüpfen:</u> Zeigerdarstellung	Lernkontrolle	LSG
40	<u>Vermittlung von Regeln:</u>	LV, TA, Zusammenfassingsblatt	LV
60	<u>Überprüfen:</u> Berechne und messe I	GA, AB, themendifferenziert: Versuch, Auswerten, Berechnen	GA
80	<u>Sicherung:</u> s.u.	SV, Reflexion der Regeln	SV
90	<u>Festigung:</u> Feinanalyse	AB, evtl. HA	PA

Geplanter TA

Können wir die gemessene Intensität I auch berechnen?

Ideen: Intensität ~ Energiedichte ~ Feldstärke<sup>2</sup> ~ Auslenkung<sup>2</sup>

Addition von Auslenkungen ergibt Auslenkung am Schirm

BISHER:  $\cos(\varphi) + \cos(\varphi + \Delta\varphi)$

NEU: Zeiger:  $Z_1 = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{pmatrix}; Z_2 = \begin{pmatrix} \cos(\varphi + \Delta\varphi) \\ \sin(\varphi + \Delta\varphi) \end{pmatrix}$

$Z = Z_1 + Z_2 = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) + \cos(\varphi + \Delta\varphi) \\ \sin(\varphi) + \sin(\varphi + \Delta\varphi) \end{pmatrix} \rightarrow I = Z^2$

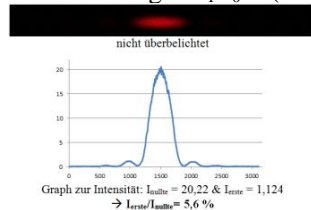
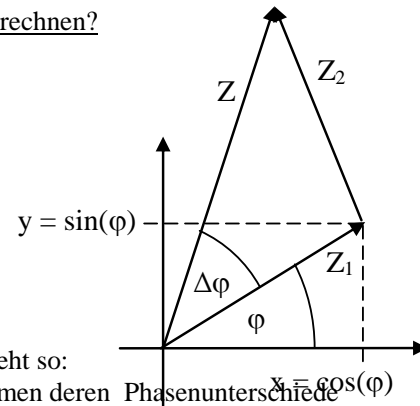
VORTEIL:  $Z^2$  ist unabhängig von  $\varphi \rightarrow$  wähle  $\varphi = 0$

Verfahren: Wir können die gemessene Intensität gut berechnen. Das geht so:

- Wir zeichnen gleichmäßig drei Strahlenbündel ein und bestimmen deren Phasenunterschiede  $\Delta\varphi$ .
- Wir bestimmen die Zeiger und addieren sie vektoriell.
- Wir bestimmen das Zeigerlängenquadrat  $Z^2 = I$

Ergebnisse: Je feiner wir das Lichtbündel unterteilen, desto genauer wird das Ergebnis:

- Drei Zeiger:  $I_1/I_0 = 1/9$
- Sechs Zeiger:  $I_1/I_0 = 2/36$
- Unendlich viele Zeiger:  $I_1/I_0 = (3\pi/2)^2 = 4,5 \%$



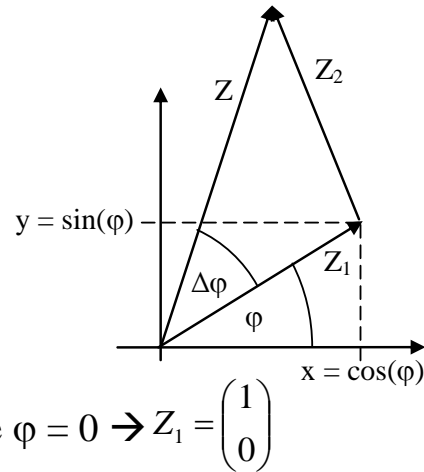
Einstiegsbild:

**Zeigerdarstellung**

BISHER:  $\cos(\varphi) + \cos(\varphi + \Delta\varphi)$

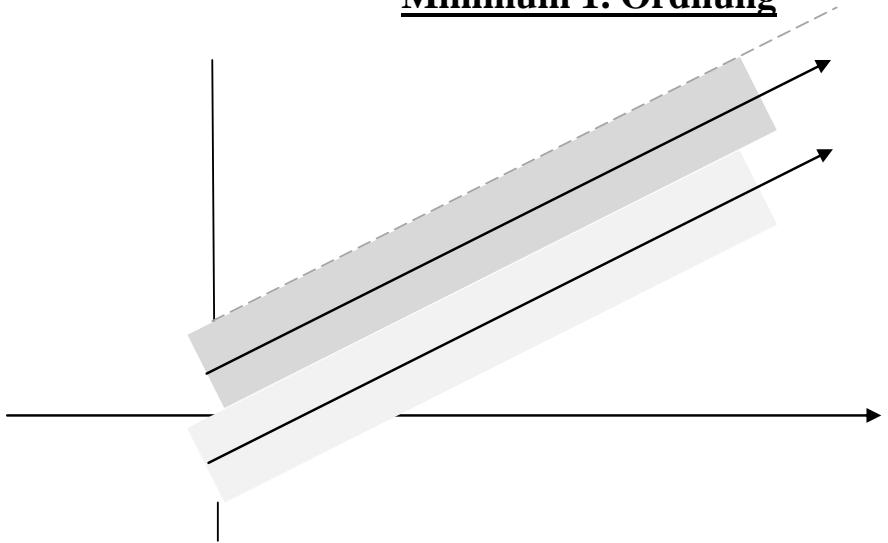
NEU:  $Z_1 = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \end{pmatrix}; Z_2 = \begin{pmatrix} \cos(\varphi + \Delta\varphi) \\ \sin(\varphi + \Delta\varphi) \end{pmatrix}$

$Z = Z_1 + Z_2 = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) + \cos(\varphi + \Delta\varphi) \\ \sin(\varphi) + \sin(\varphi + \Delta\varphi) \end{pmatrix}; I = Z^2$



VORTEIL:  $Z^2$  ist unabhängig von  $\varphi \rightarrow$  wähle  $\varphi = 0 \rightarrow Z_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$

**Minimum 1. Ordnung**



1. Minimum  $\rightarrow$  Bündel interferieren destruktiv  $\rightarrow \Delta\varphi = 180^\circ$

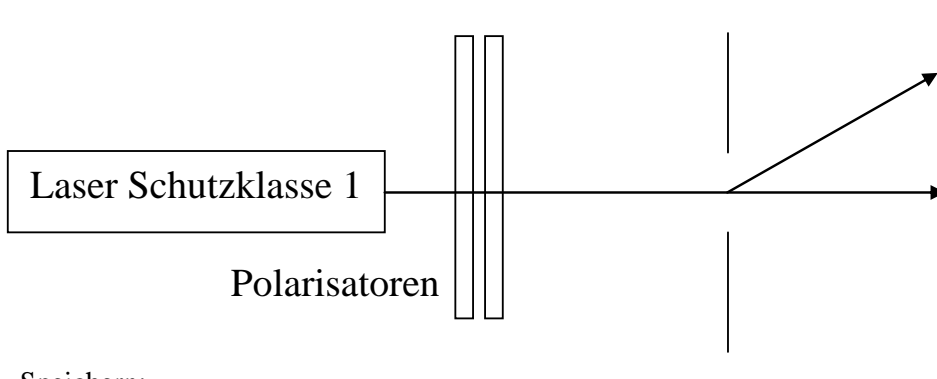
$Z_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}; Z_2 = \begin{pmatrix} \cos(180^\circ) \\ \sin(180^\circ) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix}$

$Z = Z_1 + Z_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}; I_{\text{erstes Minimum}} = Z^2 = 0$

0. Maximum  $\rightarrow \Delta\varphi = 0^\circ \rightarrow Z_2 = Z_1 \rightarrow Z = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix}$

$Z^2 = 2^2 + 0^2 = 4 = I_{\text{nullte}}$

$I_{\text{erstes Minimum}}/I_{\text{nullte}} = 0/4 = 0$

Fotografieren des BeugungsmustersSpeichern:

- Kopiere das Foto auf die Wiese im Desktop.
- Schneide mit „Paint“ einen Streifen aus.

Sicherheit: Zeige den Versuchsaufbau vorab dem Lehrer.

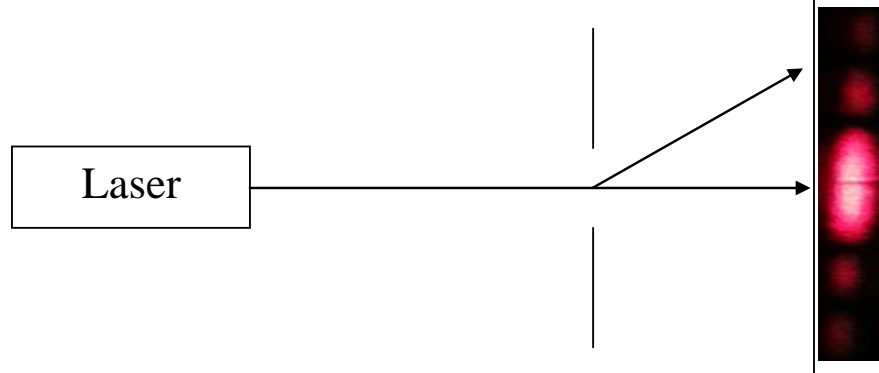
Auswerten des fotografierten BeugungsmustersErzeuge eine Liste:

- Öffne das Programm „Sonnenspektrum“.
- Lade dein Beugungsmuster oder „Beugung1.jpg“ durch Klicken auf den Dreipunktebutton vom Desktop.
- Speichere die Liste.

Bestimme die Intensitäten:

- Öffne „Excel“.
- Lade die Liste:
  - o Klicke „Daten“.
  - o Klicke „Aus Text“.
  - o Wähle deine Liste.
  - o Klicke „Getrennt“ und „Weiter“.
  - o Wähle „Leerzeichen“, „Weiter“ und „Fertigstellen“.
- Stelle die Intensitäten grafisch dar.
  - o Klicke „Einfügen“, „Punkt“ und die durchgezogene Linie.
- Lies die Intensitäten ab:
  - o Wähle die hellste der drei Farben.
  - o Bewege Pfeil über gewünschten Punkt und lies ab.

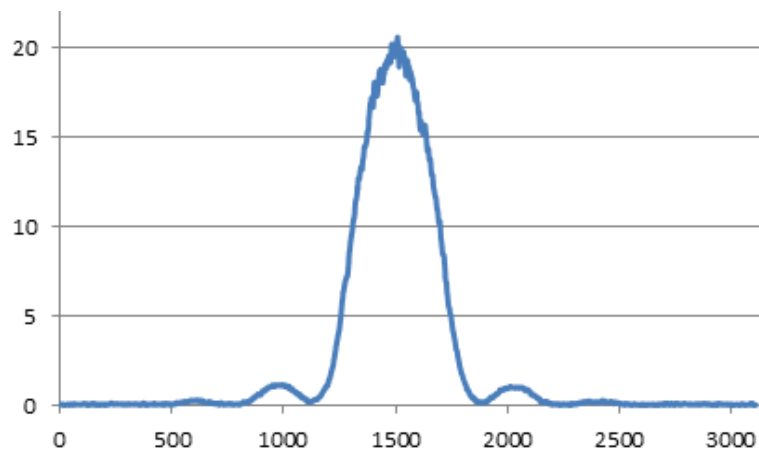
## Foto eines Beugungsmusters zur Beugung am Spalt



überbelichtet



nicht überbelichtet

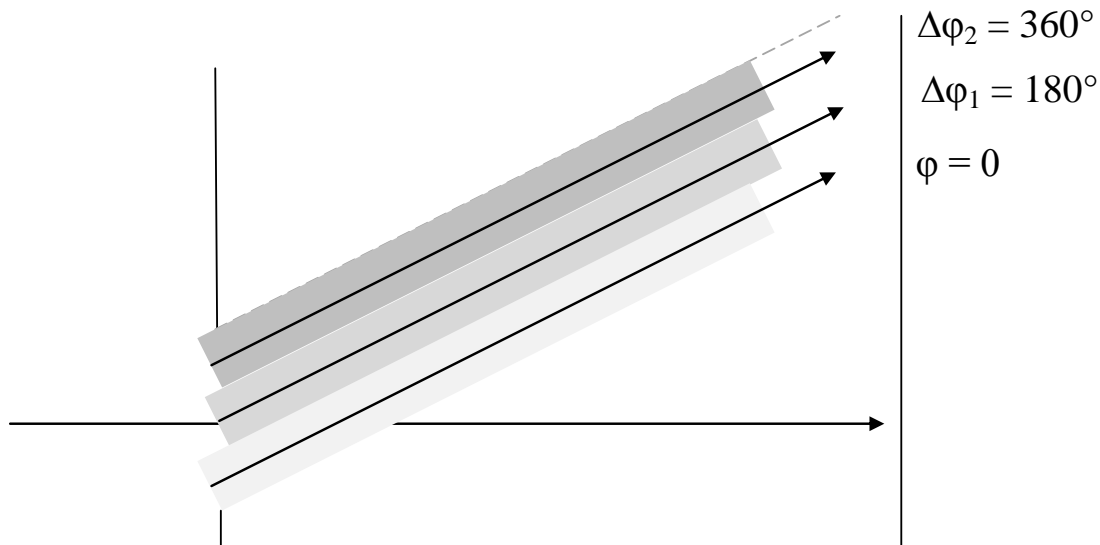


Graph zur Intensität:  $I_{\text{nullte}} = 20,22$  &  $I_{\text{erste}} = 1,124$

$$\rightarrow I_{\text{erste}}/I_{\text{nullte}} = 5,6 \%$$

## Maximum 1. Ordnung: Drei Bündel

Jedes Bündel stellen wir durch den mittleren Strahl dar.



1. Maximum → Erstes und zweites Bündel interferieren destruktiv.

$$Z_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$Z_2 = \begin{pmatrix} \cos(180^\circ) \\ \sin(180^\circ) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$Z_3 = \begin{pmatrix} \cos(360^\circ) \\ \sin(360^\circ) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad I_{\text{erste}} = Z^2 = 1$$

0. Maximum

$$Z = Z_1 + Z_2 + Z_3 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \end{pmatrix}$$

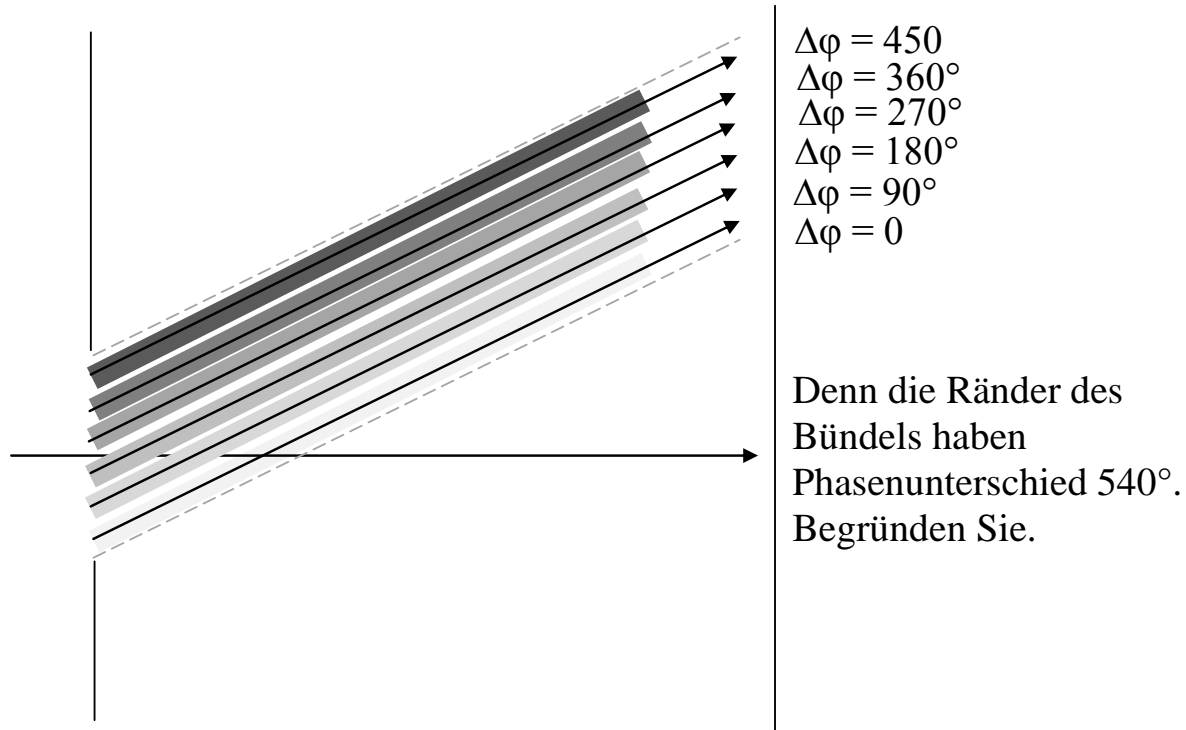
$$Z^2 = 9 \quad \rightarrow \quad I_{\text{erste}}/I_{\text{nullte}} = 1/9$$

Alternativer Lösungsweg: zeichnerisch:

Resultierende Zeigerlänge: 0. Ordnung  $Z = 3$ :  $\longrightarrow$

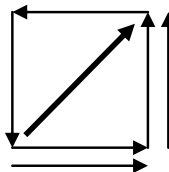
1. Ordnung  $Z = 1$ :  $\longleftrightarrow$



Maximum 1. Ordnung: Sechs Bündel

Berechnen Sie die Intensität.

0. Maximum:  $\Psi_{\text{gesamt}} = 6 \cdot \Psi$

Zeigerdarstellung: zeichnerisch:Resultierende Zeigerlänge  $\sqrt{2}$ 

Rechnerisch: 1. Maximum:

$$\vec{z} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Rechnerisch: 0. Maximum:  $\vec{z} = \begin{pmatrix} 6 \\ 0 \end{pmatrix}$

Quadrieren

0. Maximum:  $|\vec{z}|^2 = 6^2 + 0^2 = 36$

1. Maximum:  $|\vec{z}|^2 = 1^2 + 1^2 = 2$

Da Intensität  $I_1/I_0 = 2/36 \rightarrow I_1 / I_0 = 5,56 \%$

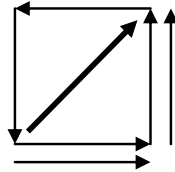
Gemessen: 5,6 %  $\rightarrow$  jetzt ist es genauer

## Maximum 1. Ordnung

### Zeichnerische Lösungen

#### 6 Bündel:

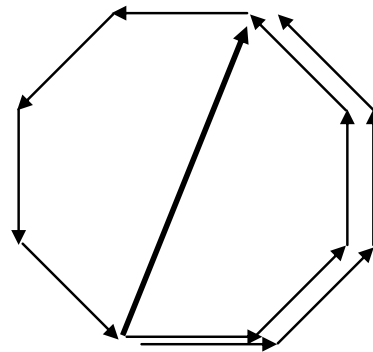
- 0. Maximum:  $Z = 6$
- 1. Maximum:  $Z = \sqrt{2}$
- $I_1/I_0 = 2/36$



#### 12 Bündel:

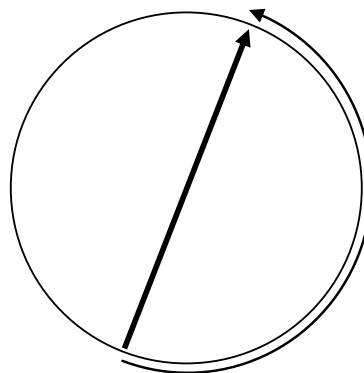
- 0. Maximum:  $Z = \dots 12$
- 1. Maximum:  $\vec{z} = \dots$
- 1. Maximum:  $Z^2 = \dots 1^2 + 2,4^2 = 6,8$
- 
- $I_1/I_0 = \dots 6,8/144 = 4,7 \%$

$$\vec{z} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} \\ -1/\sqrt{2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1/\sqrt{2} \\ -1/\sqrt{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1-\sqrt{2} \end{pmatrix}$$



#### Unendlich viele Bündel:

- 0. Maximum:  $Z = D$
- 1. Maximum:  $Z = 1,5 \cdot \pi \cdot D$
- $I_1/I_0 = \dots (3\pi/2)^2 = 4,5 \%$



Füllen Sie aus und erläutern Sie.

**Kurzentwurf für eine Physikstunde**

Athenaeum

PH EN 12

**Thema der Unterrichtseinheit: Einzelphotonen**

Deutung der Beugung einzelner Photonen

**Entdeckung der Proportionalität von  $w$  und  $\psi^2$** 

**Didaktik:** KUZ: Die SuS begründen die Proportionalität, um ihre Erkenntnisgewinnungskompetenz zu schulen.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Stochastische Deutung	Erläutern, Auswerten, Begründen
LV: Energiedichte $\epsilon$ proportional $\psi^2$	Erläutern, Anwenden, Begründen
LV: Energiedichte $\epsilon$ proportional $Z^2$	Erläutern, Anwenden, Begründen
LV: Teilchenzahl $n$ proportional $\epsilon$	Erläutern, Anwenden, Begründen
DS: Auswahl der LV	Erläutern
DS: Proportionalitäten	Nennen, Begründen

**Methodik:** Dominantes Lehrverfahren: Problemlösend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Einstieg:</u> Beugung am Doppelspalt, $\psi$	TA, DE	LSG
10	<u>Entwicklung der Problemstellung:</u> s. u.	Leitfrage	LSG
20	<u>Analyse:</u> Vermutungen, s. u.	Ideen aus LV	MuG
30	<u>Lösung:</u> Kombinieren, s. u.	Planen, Folgern	GA
40	<u>Sicherung:</u> s.u.	SV, TA	SV
45	<u>Festigung:</u> Beispiele	AB	PA

Geplanter TA

Wie hängt die Antreffwahrscheinlichkeit  $w$  von der Wellenfunktion  $\psi$  ab?

Ideen:  $w \sim n$ ;  $n \sim \epsilon$ ;  $\epsilon \sim \psi^2$ ; ;  $\epsilon \sim Z$

Ergebnis:

Die Antreffwahrscheinlichkeit ist proportional zum Quadrat der Wellenfunktion:  $w \sim \psi^2$

Die Antreffwahrscheinlichkeit ist proportional zum Quadrat der Zeigerlänge:  $w \sim Z^2$

Begründung:

$w \sim n$ ;  $n \sim \epsilon \rightarrow w \sim \epsilon$

$w \sim \epsilon$ ;  $\epsilon \sim \psi^2 \rightarrow w \sim \psi^2$

analog:  $w \sim Z^2$

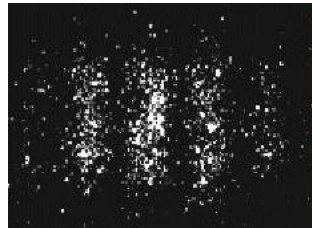
Einstiegsbild:



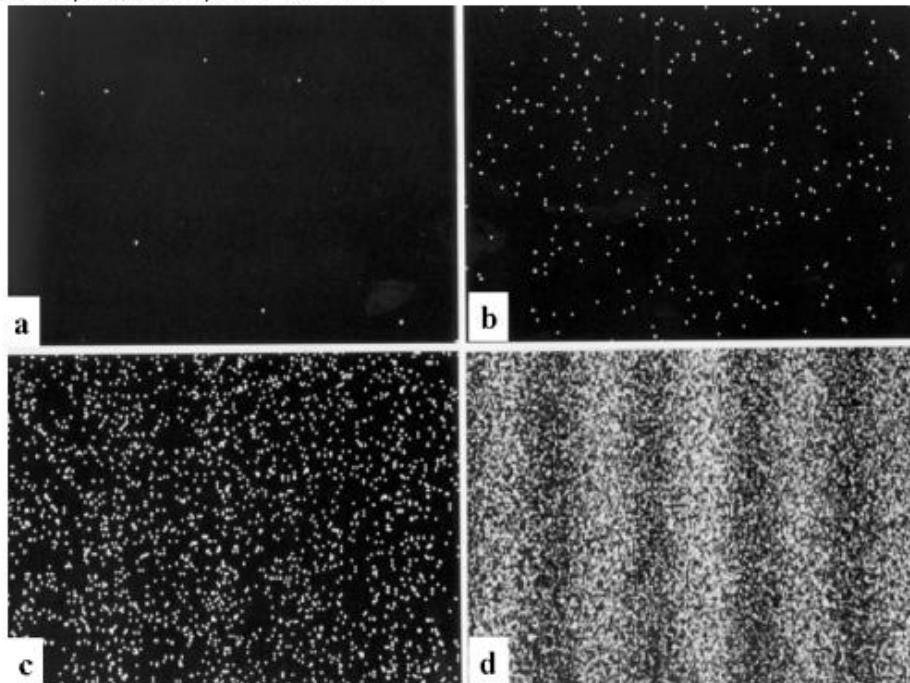
1s



2 s



10 s



1989 wurde ein Doppelspaltexperiment mit Elektronen durchgeführt, bei dem sich zu einer Zeit nur ein Photon in der Apparatur befand. Dabei entstanden die obigen Abbildungen, (a) weniger als 10 Elektronen, (b) 270 Elektronen, (c) 2000 Elektronen, (d) 60 000 Elektronen.

- Erstellen Sie eine passende Versuchsskizze!
- Begründen Sie mit den Ergebnissen die Quantennatur des Elektrons!
- Erläutern Sie an dem Beispiel die stochastische Deutung!

Abbildung 13: Elektronen dienen als weiteres Beispiel für die Beugung einzelner Quantenobjekte.

## Kurzentwurf für eine Physikstunde

Athenaeum

PH EN 12

### Thema der Unterrichtseinheit: Einzelphotonen

Deutung der Beugung einzelner Photonen

Herleitung eines Terms zur Antreffwahrscheinlichkeit für die Beugung am Doppelspalt

Analyse der Antreffwahrscheinlichkeit für die Beugung am Vierfachspalt

### Entdecken der Nichtlokalität

**Didaktik:** SLZ: Die SuS sollen die Nichtlokalität von Photonen begründen können.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Interferenz	Erläutern
LV: Photon	Erläutern
LV: Michelson-Interferometer	Erläutern
TLZ: Ohne Polfilter → Interferenzmuster	Beschreiben, Begründen
TLZ: Mit orthogonalen Polfiltern → kein Muster	Beschreiben
TLZ: Versuchsfolge	Deuten

**Methodik:** Dominantes Lehrverfahren: Problemlösend

Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Einstieg:</u> Einstiegsfolie (Skifahrer auf AB unten)	Beschreiben, unmöglich?	LSG
7	<u>Entwicklung der Stundenfrage:</u>	Leitfrage	LSG
17	<u>Analyse:</u> Versuche 1 bis 3, die auch mit Einzelphotonen funktionieren	Skizzieren, Beschreiben	SSG
25	<u>Lösung:</u> Entscheiden, Begründen	Gestufte LH	GA
30	<u>Sicherung:</u> s.u.	SV, OHP, TA, Reflexion	SV
45	<u>Festigung:</u> Doppelspalt	HA, AB 2	EA

Geplanter TA

Kann ein Photon zwei Wege zugleich verwenden?

Vermutungen:

Nein, denn es ist nicht teilbar

Ja, sonst wäre das kein Stundenthema

Skizze für Versuch 2:

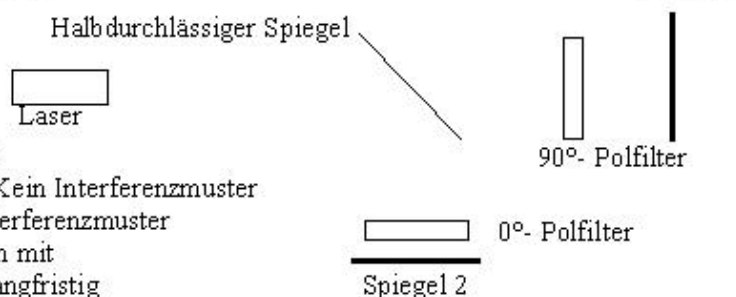
Beobachtungen:

Ohne Polfilter: Interferenzmuster

Zueinander senkrechte Polfilter: Kein Interferenzmuster

Zueinander parallele Polfilter: Interferenzmuster

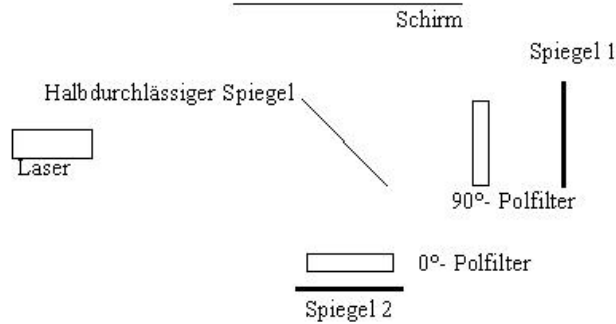
Information: Selbst bei Versuchen mit einzelnen Photonen würde man langfristig diese Beobachtungen erhalten.



Ergebnis mit Begründung: Das Photon muss beide Wege zugleich verwenden, denn sonst könnte es nicht unterscheiden, ob die Polfilter zueinander parallel oder senkrecht stehen.

Bezeichnung: Verwendet ein Quantenobjekt mehrere Wege oder Orte zugleich, so hat es die Eigenschaft Nichtlokalität.

Abbildung 14: Kurzentwurf zur Nichtlokalität von Photonen. Das Arbeitsblatt 2 findet sich in (s. Carmesin (2006)).



- 1) Planen Sie einen Versuch, bei dem Sie mit Hilfe eines dritten Polfilters im obigen Versuchsaufbau feststellen können, welchen Weg ein Photon genommen hat, das auf den Schirm trifft.  
Bezeichnung: Kann man bei einem Quantenobjekt feststellen, welchen Weg es genommen hat, so haftet ihm Welcher-Weg-Information an.
- 2) Begründen Sie mit den drei Versuchen der Stunde, dass Quantenobjekte, denen Welcher-Weg-Information anhaftet, ihre Interferenzfähigkeit verlieren.
- 3) Begründen Sie, dass auch für Elektronen Formulieren der Welle-Teilchen Dualismus gilt.  
Welle-Teilchen-Dualismus: Ein Photon ist kein Teilchen, da es beide Polarisationsfilter zugleich durchquert. Ein Photon ist keine Welle, da es in der LED immer die ganze Energie der Energiestufe aufnimmt, wogegen eine Welle beliebig kleine Energiebeträge transportieren kann. Ein Photon hat aber Wellen- und Teilcheneigenschaften.



Abbildung 15: Aufgaben mit Versuchsergebnissen zur Interferometrie polarisierter und möglicherweise einzelner Photonen: So können die SuS die Nichtlokalität entdecken. Das Michelson-Interferometer, das Jamin'sche Interferometer und das Mach-Zehnder-Interferometer liefern im Prinzip gleichwertige Ergebnisse (s. [Gobrecht \(1978\)](#)). In der Didaktik wurde das Mach-Zehnder-Interferometer eingesetzt, da das Licht in diesem die Wege nicht vor und zurück durchläuft (s. [Müller u. Wiesner \(2000\)](#)). Da dieses Vor- und Zurücklaufen den SuS erfahrungsgemäß keine Schwierigkeiten bereitet und da Michelson-Interferometer in Schulen eher verbreitet sind, stelle ich Versuche mit diesen dar.

**Thema der Unterrichtseinheit: Einzelphotonen**

Deutung der Beugung einzelner Photonen

Herleitung eines Terms zur Antreffwahrscheinlichkeit für die Beugung am Doppelspalt

Analyse der Antreffwahrscheinlichkeit für die Beugung am Vierfachspalt

Entdecken der Nichtlokalität

**Wiederherstellen der Interferenzfähigkeit****Didaktik:** SLZ: Die SuS sollen die Interferenzfähigkeit wiederherstellen können.

Inhaltliche Aspekte	Verhaltensaspekte dazu
LV: Nichtlokalität	Erläutern
LV: Photon	Erläutern
LV: Michelson-Interferometer	Erläutern
TLZ: Vermutung	Begründen
TLZ: Versuch	Planen, Durchführen
TLZ: Bezeichnung Komplementarität	Erläutern, Anwenden

**Methodik:** Dominantes Lehrverfahren: Entdeckenlassend

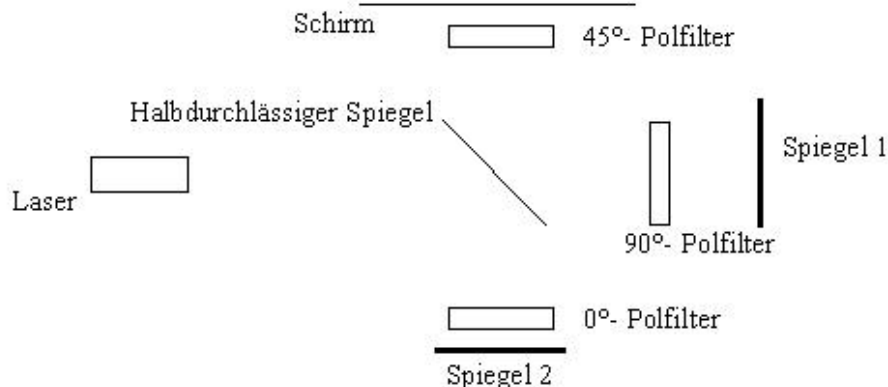
Zeit	Didaktische Erläuterungen	Methodische Erläuterungen	Sozialform
5	<u>Einstieg:</u> Interferenzverlust	Wiederholung	LSG
10	<u>Problemstellung:</u>	Leitfrage entwickeln	LSG
15	<u>Analyse:</u> Vermutung, Planung	Entwickeln	MuG
25	<u>Lösung:</u> Versuch	DE	SSG
30	<u>Sicherung:</u> s.u.	SV, DE, TA, Reflexion	SV
40	<u>Festigung 1:</u> AB mit Bezeichnung	AB	EA
45	<u>Festigung 2:</u> Lösung AB, HA AB 2	SV, OHP	SV

Geplanter TA

Lässt sich die Interferenzfähigkeit von orthogonal polarisierten Teilstrahlen wiederherstellen?

Vermutungen:

- 45° - Polarisationsfilter
- denn beim LCD-Display sahen wir, dass die Folge (0°-Polfilter|90°-Polfilter) undurchlässig ist, während die Folge (0°-Polfilter|45°-Polfilter|90°-Polfilter) durchlässig ist → Welcher-Weg-Information gelöscht → Interferenzfähig.



**Ergebnis:** Durchläuft ein Photon einen Polarisationsfilter, so sind vorherige Polarisationen, die einen Winkel von 45° zu diesem einschließen, aufgehoben. Dadurch kann die Interferenzfähigkeit zurückgewonnen werden.

Abbildung 16: Kurzentwurf zur Komplementarität.

---

## 6 Aufgaben

1. Analysieren Sie mögliche Lernschwierigkeiten der Stunde zur Einführung der Photonen.
2. Analysieren Sie mögliche Lernschwierigkeiten der Stunde zur Einführung der Welleneigenschaft der Photonen.
3. Analysieren Sie mögliche Lernschwierigkeiten der Stunde zur Berechnung der Antreffwahrscheinlichkeit.
4. Im Sinne des exemplarischen Lernens könnten wir von der CCD-Kamera ausgehen und an diesem Beispiel die Photonen behandeln. Erstellen Sie eine entsprechende Lernstruktur (s. [Wagenschein \(1999\)](#)).
5. Entwerfen Sie eine Klassenarbeit zur UE.
6. Skizzieren Sie eine Stunde zur Behandlung der Beugung von Neutronen, s. [Abb. 4](#).
7. Skizzieren Sie eine Stunde zur Umkehrbarkeit der Emission von Photonen bei der LED, s. [Abb. 11](#).
8. Skizzieren Sie eine Stunde zur Entdeckung der Grenzwellenlänge bei Röntgenstrahlen, s. [Abb. 12](#).
9. Erläutern Sie die Interferenz einzelner Photonen mit Hilfe des Zeigermodells und des Quadrats der Zeigerlänge als Maß für die Antreffwahrscheinlichkeit.

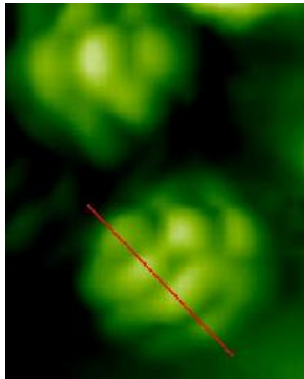


Abbildung 17: Materiewellen:  
Die Beugung massiver Teilchen gelang im Jahr 2000 sogar mit C<sub>60</sub>-Molekülen: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme, rote Linie entspricht 1,5 nm.

## 7 Zusammenfassung

Der Mikrokosmos ist nicht einfach eine Miniaturwelt, sondern er wird durch Quantenobjekte mit völlig neuartigen und universell gültigen physikalischen Gesetzmäßigkeiten charakterisiert. Während sich die Lebewesen schon seit Urzeiten an diese Gesetzmäßigkeiten angepasst haben, erobert die Technik diese neue Welt gerade. Daher können wir viele lebensweltliche und technologisch aktuelle Beispiele nutzen. Ich wünsche Ihnen mit Ihren SuS eine spannende Entdeckungsreise in diese phantastische Mikrowelt.



---

## Literatur

- [Audretsch 2006] AUDRETSCH, Jürgen: *Entangled World*. Bd. 1. Weinheim : Wiley-VCH, 2006
- [Beime u. a. 2012] BEIME, Christa ; HOPPE, Petra ; HUMMES, Klaus-Peter ; VÖPEL, Karl-Heinz ; VOSS, Christine ; ZEMANN, Winfried: *Kerncurriculum für die Integrierte Gesamtschule, Schuljahrgänge 5 - 10, Naturwissenschaften, Niedersachsen*. Hannover : Niedersächsisches Kultusministerium, 2012
- [Brüning u. a. 2010] BRÜNING, Thomas ; DÖTZER, Susanne ; ELSASSER, Wolfgang ; HEIKE, Christina ; JÜTTNER, Horst ; MICHALSKI, Regina ; MOORKAMP, Michael ; SUTTMAYER, Beate: *Rahmenrichtlinien für das Fach Naturwissenschaft in der Klasse 12 der Fachoberschule, Niedersachsen*. Hannover : Niedersächsisches Kultusministerium, 2010
- [Carmesin 2001] CARMESIN, Hans-Otto: Einführung des Energiebegriffs mit Hilfe menschlicher Sinnesorgane. In: NORDMEIER, Volker (Hrsg.) ; Deutsche Physikalische Gesellschaft (Veranst.): *Tagungs-CD Fachdidaktik Physik*. Berlin : DPG, 2001
- [Carmesin 2006] CARMESIN, Hans-Otto: Entdeckungen im Physikunterricht durch Beobachtungen des Himmels. In: NORDMEIER, Volker (Hrsg.) ; OBERLÄNDER, Arne (Hrsg.) ; Deutsche Physikalische Gesellschaft (Veranst.): *Tagungs-CD Fachdidaktik Physik, ISBN 978-386541-190-7*. Berlin : Deutsche Physikalische Gesellschaft, 2006
- [Carmesin 2021] CARMESIN, Hans-Otto: Quanta of Spacetime Explain Observations, Dark Energy, Graviton and Nonlocality. In: CARMESIN, Hans-Otto (Hrsg.): *Universe: Unified from Microcosm to Macrocosm - Volume 4*. Berlin : Verlag Dr. Köster, 2021
- [Carmesin u. a. 2020] CARMESIN, Hans-Otto ; EMSE, Anneke ; PIEHLER, M. ; PRÖHL, Inka K. ; SALZMANN, Wiebke ; WITTE, Lutz: *Universum Physik Sekundarstufe II Niedersachsen Qualifikationsphase*. Berlin : Cornelsen Verlag, 2020
- [Frenzel 2017] FRENZEL, Michael u. a.: *Kerncurriculum für das Gymnasium - gymnasiale Oberstufe, die Gesamtschule - gymnasiale Oberstufe, das Fachgymnasium, das Abendgymnasium, das Kolleg, Physik, Niedersachsen*. Hannover : Niedersächsisches Kultusministerium, 2017
- [Gehmann 2015] GEHMANN, Kurt u. a.: *Kerncurriculum für das Gymnasium, Schuljahrgänge 5 - 10, Naturwissenschaften, Niedersachsen*. Hannover : Niedersächsisches Kultusministerium, 2015
- [Gobrecht 1978] GOBRECHT, Heinrich: *Bergmann-Schäfer: Lehrbuch der Experimentalphysik Band III Optik*. 7. Berlin : Walter de Gruyter, 1978
- [Gomolez u. a. 1998] GOMOLEZ, Joachim ; GREHN, Joachim ; KRAUSE, Joachim ; PETERS, Georg ; SCHMIDT, Herbert ; SCHWARZE, Heiner: *Metzler Physik*. 2. Hannover : Schroedel, 1998. – 448–451 S.

- 
- [Martens 2010] MARTENS, Klaus: *Kontexte zur Einführung von Photonen im Physikunterricht eines Kurses auf erhöhtem Niveau. Ein Unterrichtsversuch im Doppeljahrgang eines Gymnasiums für das Abitur 2011.* Stade : Studienseminar Stade, 2010
- [Müller u. Wiesner 2000] MÜLLER, Rainer ; WIESNER, Hartmut: Photonen im Mach-Zehnder-Interferometer – ein Zugang zur Deutung der Quantenphysik. In: *Physik in der Schule* 38 (2000), S. 338
- [Wagenschein 1999] WAGENSCHHEIN, Martin: *Verstehen lehren.* Weinheim : Beltz Verlag, 1999
- [Wußing u. Brentjes 1987] WUSSING, Hans ; BRENTJES, Sonja: *Geschichte der Naturwissenschaften. 2.* Köln : Aulis-Deubner, 1987