

UNTERRICHTS MATERIALIEN

Physik

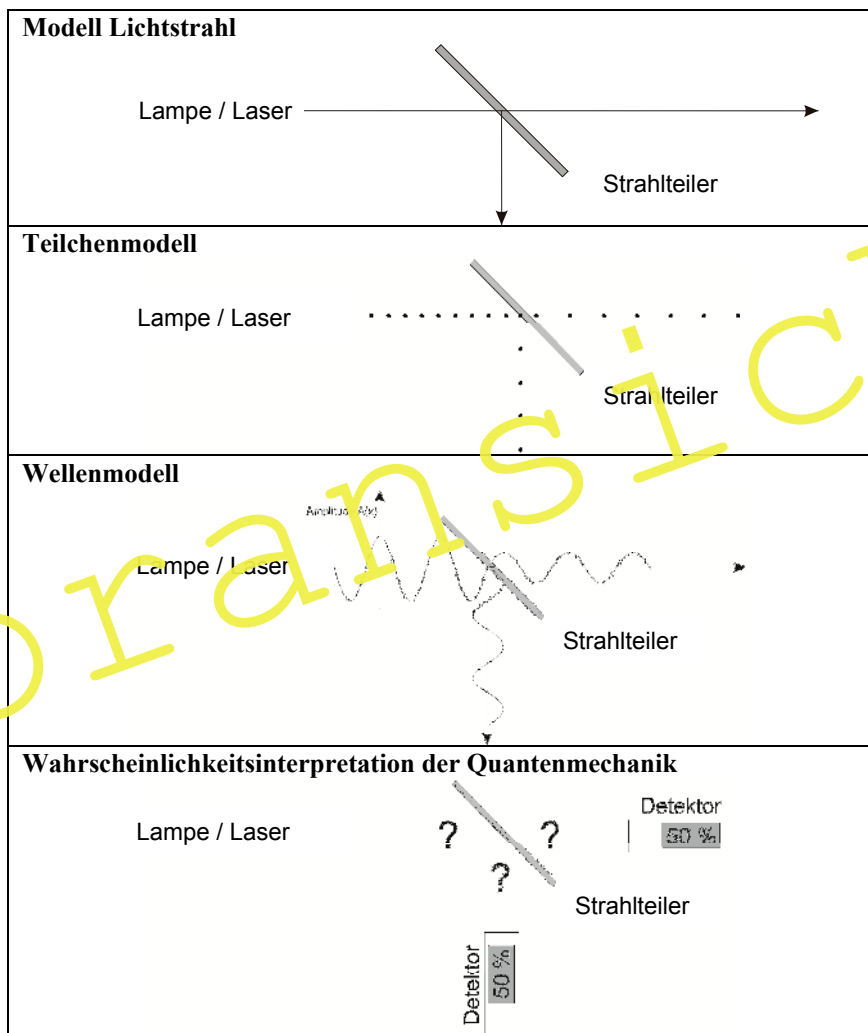


Welle, Teilchen, Wahrscheinlichkeit – Experimentierfundus

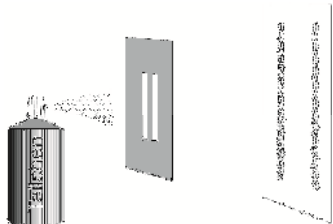
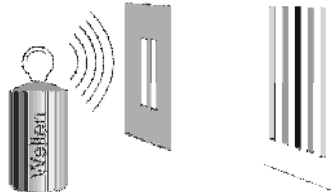
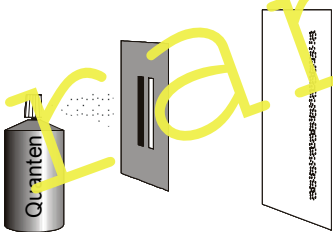
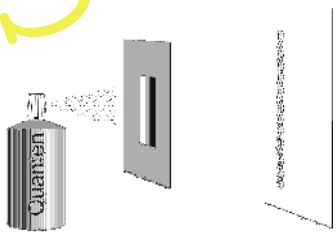
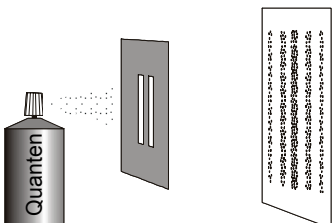
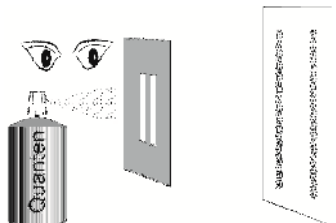
Grundlagen der Quantenphysik

Welle, Teilchen, Wahrscheinlichkeit – ein Experimentierfundus

1 Die verschiedenen Modellvorstellungen für das Licht



2 Das Doppelspaltexperiment (Teilchen, Welle, Quanten)

Makrophysik (klassische Physik)	
Doppelspaltexperiment mit Teilchen 	Doppelspaltexperiment mit Wellen 
Mikrophysik (Quantenphysik)	
Doppelspaltexperiment mit Quanten Betrachtung einzelner Teilchen (linker Spalt geschlossen) 	Doppelspaltexperiment mit Quanten Betrachtung einzelner Teilchen (rechter Spalt geschlossen) 
Doppelspaltexperiment mit Quanten (ohne Beobachtung der Spalte) 	Doppelspaltexperiment mit Quanten (Beobachtung der Spalte) 

3 Laufzettel – Stationenzirkel zum Thema *Quantenphysik*

Achtung bei der Arbeit mit Laser und Kohlebogenlampe! Sehen Sie nie direkt in den Lichtstrahl. Blenden Sie niemanden. Die Lichtquellen sind so intensiv, dass sie Ihr Augenlicht schädigen können.

Außerdem ist Folgendes zu beachten:

- Arbeiten Sie an allen Stationen gewissenhaft.
- Lesen Sie sich die Arbeitsanweisung zunächst vollständig durch und besprechen Sie die Vorgehensweise mit Ihrem Partner.
- Machen Sie selbstständig Notizen zu Versuchsaufbau, -durchführung und -auswertung. Stellen Sie diese Informationen in Ihrem Heft übersichtlich zusammen.
- Hinterlassen Sie Ihre Stationen aufgeräumt.
- Nutzen Sie Leerlaufzeiten zwischen den Stationen zu Gesprächen und Diskussionen über die Experimente mit dem Lehrer oder Ihren Mitschülern.

Nr.	Versuch der Station	Erledigt ✓	Offene Fragen – stichpunktartig
1	Beugung an einem Haar		
2	Beugung am Einfachspalt		
3	Grundversuch zum Fotoeffekt nach Hallwachs		
4	Fotoeffekt und Farbe des Lichts		
5	Fotoeffekt mit Gitter		
6	Quantenfußball		
7	Fluoreszenz des Chlorophylls		
8	Der Quantenradierer		

Station 1 Ein Haar im Strahl des Lasers – was nun?

Schülerversuch ⌚ Vorbereitung: 5 min Durchführung: 30 min

Materialien

- | | |
|--|---|
| ☐ ein menschliches Haar | ☐ Laser oder Laserpointer |
| ☐ Projektionsschirm | ☐ Geodreieck und Tafellineal |

Ziel des Versuches

Sie erkennen, dass Ihre bisherigen Vorstellungen von Licht und Schatten nicht in allen Situationen gültig sind.

Versuchsaufbau

Der Versuch wird als Freihandversuch durchgeführt. Der Abstand zum Schirm sollte einige Meter betragen, während Sie das Haar nur circa 20 cm vor den Laserpointer halten.

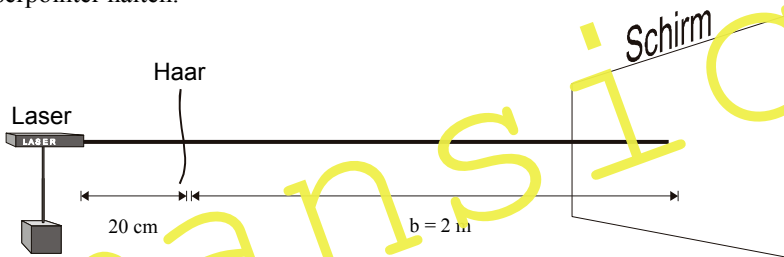


Abb. 1

Versuchsdurchführung

Betrachten Sie das Bild des Laserstrahles ohne Haar. Vermuten Sie zunächst, wie sich das Bild beim Einbringen des Haares in den Strahlengang verändert. Skizzieren Sie, welche Veränderung des Strahlenbildes Sie erwarten. Erst dann halten Sie das Haar in den Strahlengang des Laserpointers.

Aufgabe und Auswertung

Beschreiben Sie Ihre Beobachtung. Fertigen Sie dazu eine Skizze an. Erstellen Sie ein stichpunktartiges Versuchsprotokoll. Finden Sie eine Erklärung für das Versuchsergebnis.

Tip Mithilfe des Wellenmodells von Licht lässt sich das (unerwartete) Ergebnis erklären.

Aus Ihren Messungen zum Versuch können Sie sogar die Dicke des Haares bestimmen, wenn Sie das Haar als Doppelspalt annehmen.

Für Experten

Fällt Ihnen am Beugungsbild sonst noch etwas Ungewöhnliches auf?

Station 2 Beugung am Einfachspalt

Versuchsaufbau

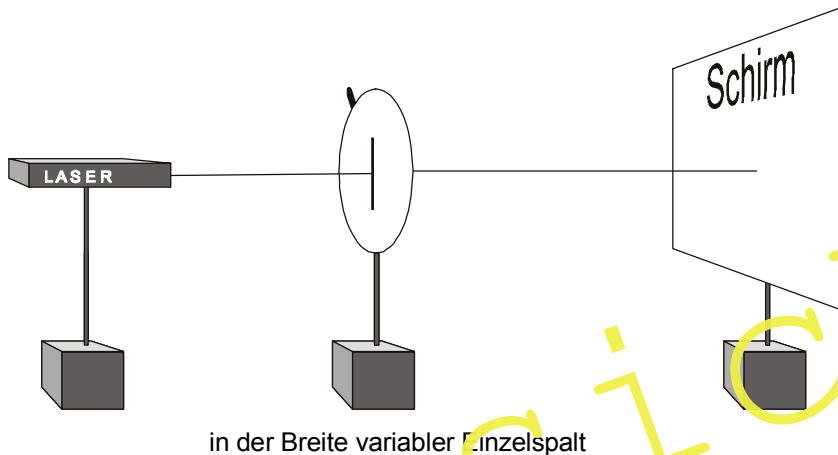


Abb. 2

Versuchsdurchführung

Leuchten Sie mit dem Laser durch den Spalt und schließen Sie dann den Spalt langsam. Beobachten Sie das entstehende Interferenzmuster auf dem dahinterliegenden Schirm.

Aufgabe

- Zeichnen und beschreiben Sie Ihre Beobachtungen abhängig von der Spaltbreite möglichst genau.
Was erwarten Sie?
Was überrascht Sie?
- Welche Modellvorstellung des Lichts kann diesen Versuch erklären, welche nicht?
- Beschreiben Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede zum Doppelspalt. Überlegen Sie, wie sich mit diesem Erklärungsansatz Maxima und Minima höherer Ordnung erklären lassen. Folgender Text hilft Ihnen dabei. (Siehe Seite 6).

Tipp

Jeder Punkt im Spalt sendet nach Huygens eine Elementarwelle aus. Wir betrachten insgesamt $2n$ Elementarwellen.

Der Gangunterschied zwischen der ersten und der letzten, $2n$ -ten Elementarwelle sei eine Wellenlänge. Dann ist der Gangunterschied zur mittleren n -ten Elementarwelle eine halbe Wellenlänge.

So kann also die erste mit der n -ten, die zweite mit der $(n+1)$ -ten usw. destruktiv interferieren. Dies geht so weit, dass die $(n-1)$ -te Elementarwelle mit der $2n$ -ten destruktiv interferiert, sodass sich alle Elementarwellen jeweils paarweise aufheben und insgesamt ein Minimum entsteht.

Dies gilt wieder, wenn der Gangunterschied zwischen der ersten und der letzten zwei Wellenlängen beträgt. Dann wird das Licht, das durch den Spalt fällt, eben in vier Teilbündel zerlegt. Das Entstehen von Maxima höherer Ordnung lässt sich dadurch erklären, dass man das gesamte Lichtbündel in insgesamt $3, 4, \dots, n$ Teilbündel zerlegen kann, die jeweils miteinander interferieren. Der gesamte Gangunterschied ist dann jeweils n halbe Wellenlängen. Bei ungeraden Teilbündelzahlen findet jede Elementarwelle einen Partner zum Auslöschen, sodass insgesamt destruktive Interferenz auftritt.

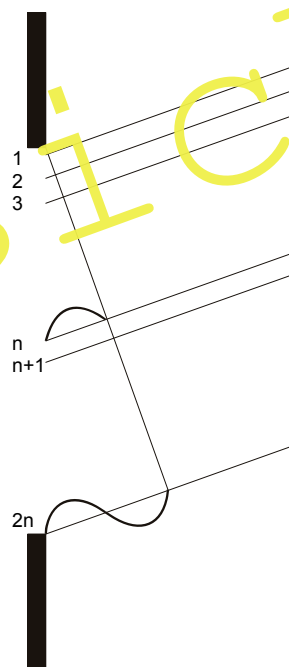


Abb. 3

Station 3 Grundversuch zum Fotoeffekt nach Hallwachs

Lassen Sie sich zunächst vom Lehrer in den Betrieb der UV-Lampe einweisen!
Blicken Sie nie direkt in die sehr helle Lampe, es gefährdet Ihr Augenlicht!

Versuchsaufbau

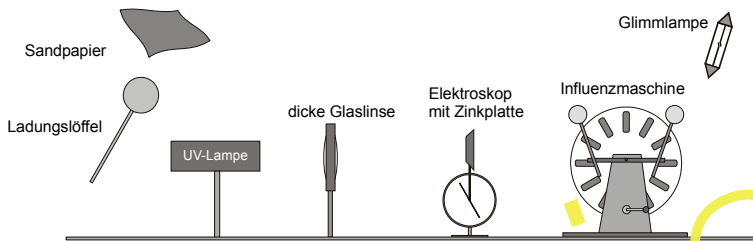


Abb. 4

Säubern Sie die Zinkplatte mit dem feinen Sandpapier, um eine (nicht sichtbare) Zinkoxidschicht zu entfernen, die durch Oberflächenkorrosion entstanden ist. Auf dem Sandpapier erkennen Sie gegebenenfalls das Zinkoxyd.

Tipp: Erst die Polarität prüfen

Prüfen Sie zuerst die Polarität der Influenzmaschine mit der Glimmlampe. Entladen Sie die Maschine, indem Sie die beiden Kugeln zusammenführen. Stellen Sie dann den Abstand der Kugeln auf wenige Millimeter ein und laden Sie diese durch nur eine Umdrehung auf. Halten Sie das eine Ende der Glimmlampe und berühren Sie eine Kugel mit dem anderen Kontakt. Dabei glimmt die Lampe kurz auf. Leuchtet die mit der Spitze verbundene Elektrode, so berühren Sie den Minuspol.

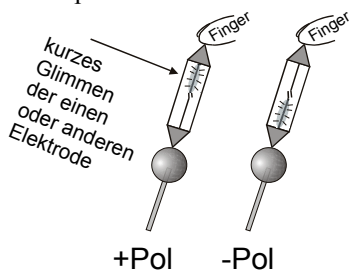


Abb. 5

Station 4 Die Abhängigkeit des Fotoeffektes von der Farbe des Lichts (mit Farbfiltren)

Versuchsaufbau

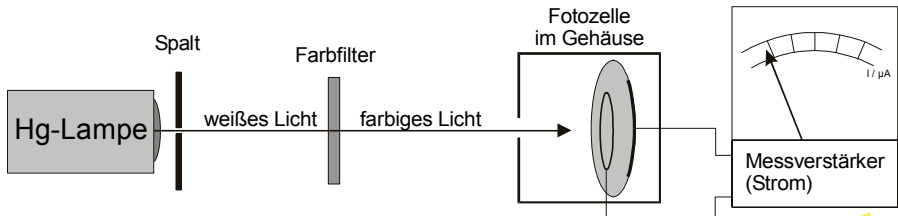


Abb. 6

Das weiße Licht einer hellen Lampe geht zunächst durch einen Farbfilter, der nur bestimmte Farbanteile des optischen Spektrums durchlässt. Mit dem in der Breite variablen Spalt kann die Helligkeit (Intensität) des Lichtstrahles verändert werden. Der Strahl trifft auf die Fotozelle.

Die Fotozelle ist eine evakuierte Glasröhre. Die Rückwand ist mit Metall beschichtet (Kathode) und in der Zelle ist ein dünner, ringförmiger Metalldraht (Anode).

Zur Abschirmung des Tageslichts ist die Fotozelle in einem Gehäuse mit einer kleinen Eintrittsöffnung untergebracht. Der Messverstärker wird als Amperemeter verwendet.

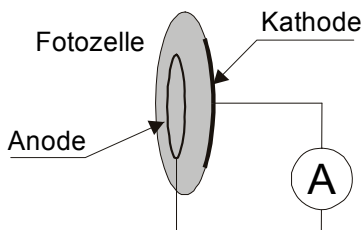


Abb. 7

Station 5 Die Abhängigkeit des Fotoeffektes von der Farbe des Lichts (mit Gitter)

Versuchsaufbau

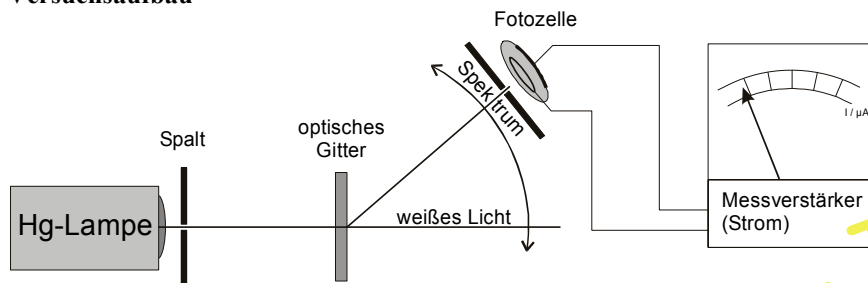


Abb. 8

Ein Gitter spaltet das Licht einer Quecksilberdampf Lampe durch Interferenz in seine Farbbestandteile (Spektrum) auf. Rotes Licht wird stärker abgelenkt. Um die Farben des Spektrums gut auflösen zu können, muss das Licht der Lampe durch einen Spalt zu einem schmalen Lichtstrich gebündelt werden. Ein Eintrittsspalt lässt dann nur Licht einer bestimmten Farbe in die Fotozelle treffen. Die Fotozelle ist eine evakuierte Glasröhre. Die Rückwand ist mit Metall beschichtet (Kathode) und in der Zelle ist ein dünner, ringförmiger Metalldraht (Anode).

An die Fotozelle ist ein Amperemeter mit Messverstärker angeschlossen, welches einen Strom von der Kathode zur Anode messen kann.

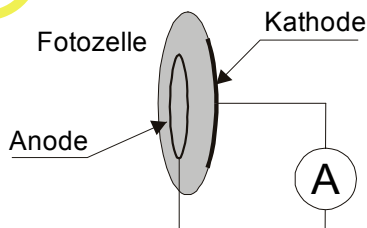


Abb. 9

Station 7 Fluoreszenz des Chlorophylls

Schülerversuch ⌚ Vorbereitung: 10 min

Materialien

- ☐ Einige grüne Blätter, z. B. Efeu
- ☐ Einige Milliliter Aceton
- ☐ Filterpapier und etwas gereinigter Seesand
- ☐ Mörser
- ☐ Reagenzglas
- ☐ Glastrichter für Filter

Zerreiben Sie die Blätter gemeinsam mit dem Seesand gründlich im Mörser. Anschließend geben Sie das Aceton zu und reiben nochmals kräftig. Dann können Sie die Lösung durch den Filter in ein Reagenzglas abfiltrieren. Aceton ist leicht flüchtig. Schließen Sie sowohl die Acetonflasche als auch das Reagenzglas mit einem Stopfen, damit nicht unnötig viel Aceton verdunstet.

Versuchsaufbau

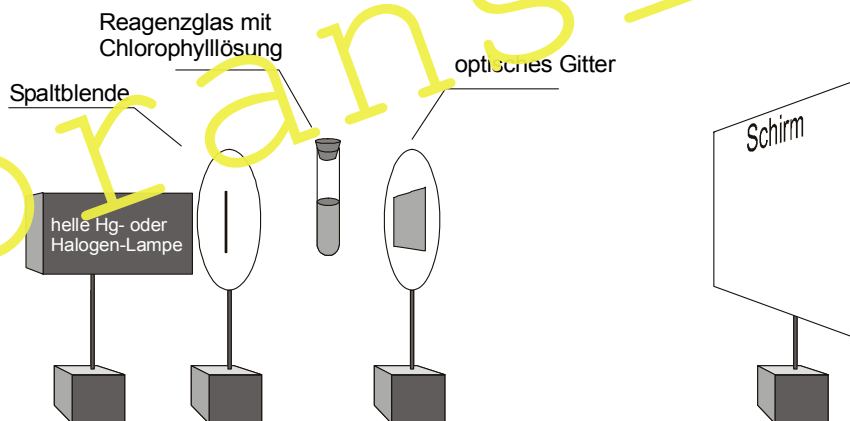


Abb. 11

Versuchsdurchführung

Betrachten Sie zunächst bei ausgeschaltetem Laser das Diarähmchen mit dem Metalldraht und den beiden Polarisationsfolien (= den künstlichen Doppelspalt) durch den Polarisationsfilter und drehen Sie den Filter dabei. Sie können erkennen, wie jeweils die eine oder andere Seite des Doppelspaltes dunkel bzw. durchsichtig wird. Bei einem Winkel von 45° können Sie durch beide Seiten gleichermaßen hindurchschauen.

Stellen Sie nun den polarisierenden Doppelspalt so in den Laserstrahl, dass ein Teil des Strahles links und ein Teil rechts an dem dünnen Metalldraht in der Mitte des Spaltes vorbeigeht. Gehen Sie zur Projektionsfläche, halten Sie mit der Hand den Polfilter in den Strahlengang und drehen Sie ihn langsam.

Versuchsbeobachtung

Je nach Winkel des Polarisationsfilters sollte sich die Projektion des Laserstrahles verändern:

**Aufgabe**

Lesen Sie auch den ausliegenden Artikel aus „Spektrum der Naturwissenschaften“ durch und deuten und diskutieren Sie die Ergebnisse in Ihrer Gruppe: Notieren Sie Ihre Beobachtungen und die entsprechenden Erklärungsansätze.

Tippkarten

Tipp zu Station 1: Haar

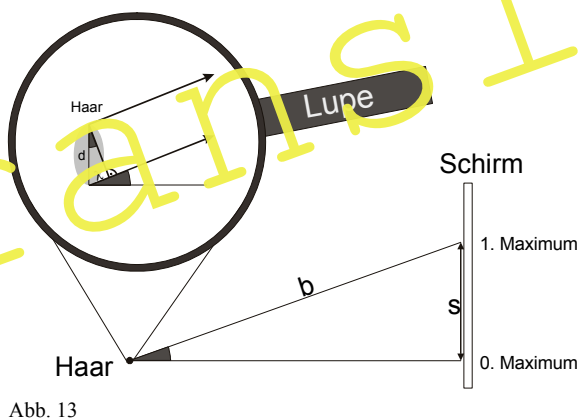
Das auftretende Muster ist ein Interferenzmuster.

Das Haar kann als *Trennwand* eines Doppelspaltes aufgefasst werden, das rechts und links vorbeigehenden Licht als zwei gleichphasige Quellen. Bei Auftreffen auf dem Schirm haben zwei Elementarwellen somit den Gangunterschied einer Wellenlänge.

Für die Wellenlänge des Lasers kann man $\lambda = 600 \text{ nm}$ annehmen. Die Abstände b und s sind im Experiment zu bestimmen. Aus der Ähnlichkeit beider Dreiecke folgt der Ansatz:

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{b}{s},$$

mit dem man die Haardicke bestimmen kann.



Tipp zu Station 8: Der Quantenradierer

Vorbereitung

Materialien

- ☐ Diarähmchen
- ☐ ein starrer Metalldraht (26 mm lang)
- ☐ entsprechend viel Polarisationsfolie
- ☐ etwas Sekundenkleber

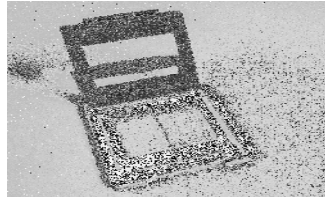


Abb. 15

Einen polarisierenden Doppelspalt können Sie bei der Firma MüRo-Fräser erwerben oder relativ schnell und einfach selbst basteln. Als Diarähmchen empfehlen wir die robusten Klapprähmchen von Alfi, die noch im Fotohandel erhältlich sind. Gute Polarisationsfolie können Sie beim Astromedia Verlag bestellen.

Zunächst wird der Metalldraht mit dem Sekundenkleber im Rähmchen fixiert (siehe Foto), dann kann die Polarisationsfolie zurechtgeschnitten und jeweils um 90° zueinander verdreht eingeklemmt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass keine Freiräume zwischen Folie und Draht bleiben, durch die dann unpolarisiertes Licht scheitern kann. Am besten berühren sich die beiden Folien vordere und hinter dem Draht. Eine Schneidemaschine garantiert hier einen geraden Schnitt.

Die nachfolgenden Fotos zeigen den polarisierenden Doppelspalt einmal ohne und einmal jeweils durch einen entsprechend gedrehten Polarisationsfilter betrachtet.

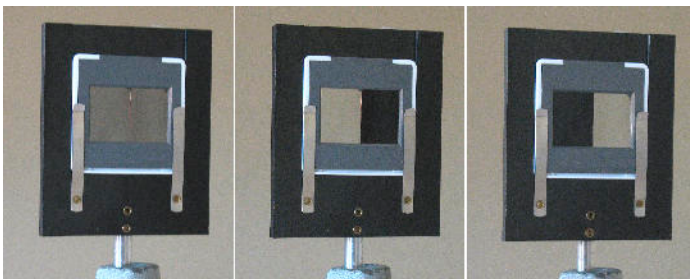
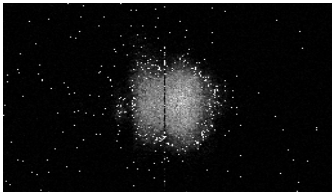
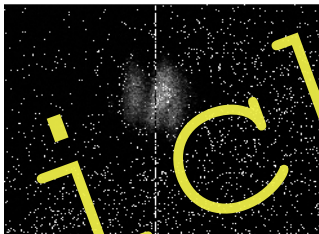
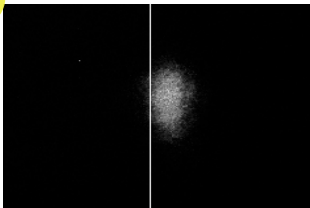
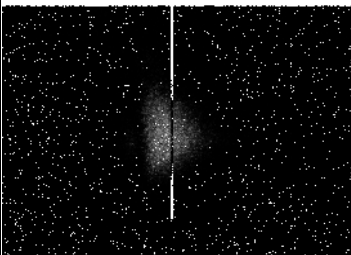


Abb. 16

Die folgende Tabelle zeigt mögliche Beobachtungen und die entsprechende Erklärung:

1. Laserpunkt ohne Quantenradierer <u>Beobachtung:</u> Es ist ein zweigeteilter Fleck zu sehen. <u>Erklärung:</u> Die Photonen gehen durch beide Spalte, interferieren aber nicht, da eine Weginformation vorhanden ist.	 Abb. 17
2. Quantenradierer in 45°-Stellung <u>Beobachtung:</u> Im Laserfleck erscheinen dunkle Interferenzstreifen. <u>Erklärung:</u> Die Photonen können interferieren, da der Radierer die Weginformation wieder ausgelöscht hat.	 Abb. 18
3. Quantenradierer vertikal <u>Beobachtung:</u> Nur die rechte Hälfte des Doppelflecks ist erkennbar. <u>Erklärung:</u> Nur die Photonen, welche die rechte Hälfte des Doppelspaltes passiert haben, können auch den Quantenradierer durchqueren.	 Abb. 19
4. Quantenradierer horizontal <u>Beobachtung:</u> Je nach Polarisation des Doppelspaltes wird nur die linke (oder rechte) Hälfte des Doppelfleckes erkennbar. <u>Erklärung:</u> Nur die Photonen, welche die linke Hälfte des Doppelspaltes passiert haben, können auch den Quantenradierer durchqueren.	 Abb. 20

Kompetenzprofil

- Niveau: einführend
- Fachlicher Bezug: Quantenphysik
- Kommunikation: Vermutungen äußern, argumentieren, präsentieren, vergleichen
- Problemlösen: reproduzieren, vernetztes Denken
- Modellierung: Modell entwickeln
- Medien: PC/Laptop mit Internetanschluss
- Methode: Einzelarbeit, Gruppenarbeit
- Inhalt in Stichworten: Beugung und Interferenz am Einfach- und Doppelspalt und an einem Haar, Photoeffekt, Abhängigkeit des Photoeffekts von der Farbe des Lichts, Fluoreszenz des Chlorophylls, Quantenradierer

Autor: Dr. Johannes Günther, Karlstadt

Lösung und Tipps zum Einsatz

- Die grauen Kästchen kennzeichnen Tipps zum Einsatz.

Kontext 1 und Kontext 2**Strahlteiler und Doppelstrahl**

- Kopieren Sie die Seiten 1 und 2 auf Folie.

Nach einer kurzen Behandlung des Wellenmodells für das Licht zeigen Sie anhand des Photoeffekts, dass Licht auch Eigenschaften von Teilchen hat. Der Photoeffekt zeigt nämlich, dass erst Licht ab einer bestimmten Grenzfrequenz f Elektronen aus dem Metall auslösen kann. Dies widerspricht der Wellenvorstellung von Licht. Hier müsste auch niederfrequentes Licht bei genügender Intensität Elektronen auslösen können.

Aus der experimentellen Auswertung mithilfe einer Geradengleichung folgt Einsteins Gleichung $E_{\text{kin}} = h \cdot f - W_A$, die als Energieerhaltung bei einem Stoß interpretiert werden kann, wenn man annimmt, dass erst Lichtteilchen mit genügend großer Frequenz und damit kinetischer Energie die Elektronen auslösen können. Die Energieportionen $E = h \cdot f$ bezeichnet man als *Photonen*, sie sind vom Amplitudenquadrat E^2 der Feldstärke der elektromagnetischen Welle unabhängig.