

# SCHOOL-SCOUT.DE

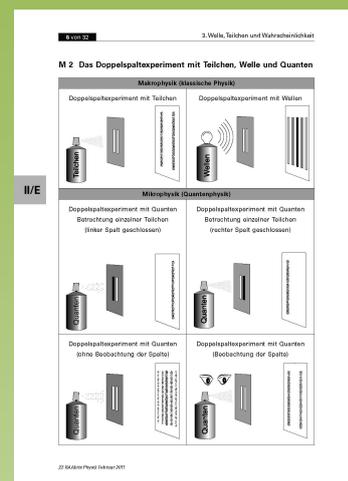
Unterrichtsmaterialien in digitaler und in gedruckter Form

**Auszug aus:**

*Welle, Teilchen und Wahrscheinlichkeit - ein Quantenzirkel*

Das komplette Material finden Sie hier:

[School-Scout.de](http://School-Scout.de)



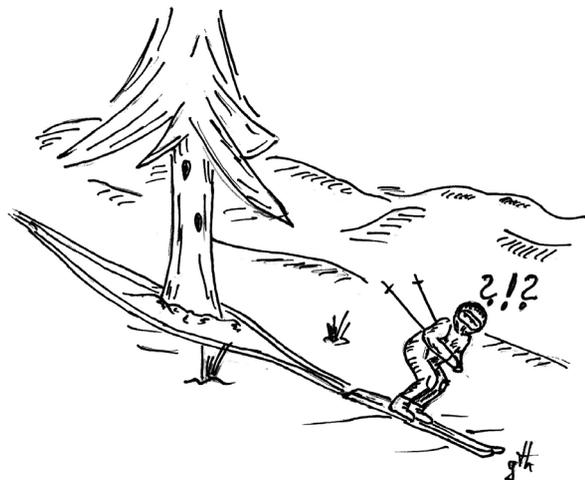
## Welle, Teilchen und Wahrscheinlichkeit – ein Quantenzirkel

Dr. Johannes Günther, Karlstadt

Die Welt des Mikrokosmos ist geheimnisvoll. Die Gesetzmäßigkeiten, die wir aus unserer alltäglichen Erfahrung ableiten, verlieren hier ihre Gültigkeit und müssen durch die entsprechenden Gleichungen der Quantenphysik ersetzt werden. Dies birgt so manche Überraschung!

In Zusammenhang mit Interferenzphänomenen wird Licht als Welle betrachtet. Aber diese Theorie hat ihre Grenzen. So lassen sich die Phänomene beim Fotoeffekt nur mit dem Teilchencharakter der Lichtquanten erklären. Verdeutlichen Sie den Lernenden dieses Dilemma.

Führen Sie Ihre Schüler dann schrittweise an das anspruchsvolle Thema Quantenphysik heran. Bringen Sie Ihren Schülern den Begriff der Aufenthaltswahrscheinlichkeit so weit nahe, dass sie ihn beim Quantenfußball spielerisch auf die Position des Balls anwenden können.



II/E

**Eigenverantwortlich  
und mit Freude  
an Stationen lernen!**

Der Beitrag im Überblick	
<p><b>Klasse:</b> 12 (G8)</p> <p><b>Dauer:</b> circa 6 Stunden</p> <p><b>Ihr Plus</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Quantenfußball – eine spielerische Auseinandersetzung mit den Grundlagen des quantenmechanischen Messprozesses</li> <li>✓ Schülerexperimente</li> </ul>	<p><b>Inhalt</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beugung und Interferenz am Einfach- und Doppelspalt und an einem Haar</li> <li>• Fotoeffekt</li> <li>• Abhängigkeit des Fotoeffekts von der Farbe des Lichts</li> <li>• Fluoreszenz des Chlorophylls</li> <li>• Quantenradierer</li> </ul>

## Fachliche und didaktisch-methodische Hinweise

### Einführung

Beugung und Interferenz am Spalt legen nahe, Licht als elektromagnetische Welle anzusehen. Blitzen Sie hingegen das Becken eines Schlagzeugs (Cymbal) mit einem leistungsstarken Blitz an, so ist ein leiser Ton zu hören. Dabei überträgt das Licht Impuls auf das Becken und regt es dadurch zu Schwingungen an. Um diese Beobachtung zu erklären, interpretiert man Licht hier als Strom massebehafteter Energiequanten (= Photonen).

Die Grundlagen der Quantenphysik behandeln Sie in der Regel erst am Ende der Sekundarstufe II, meist als Anhängsel der Atomphysik. Anhand des Foto- und Compton-Effekts zeigen Sie die Grenzen der Wellennatur des Lichts auf. Den Franck-Hertz-Versuch besprechen Sie, um den Schülern die Quantisierung der Energieniveaus in der Atomhülle zu vermitteln. Alle drei Versuche lassen sich nur erklären, wenn man den Energieportionen ( $E = h \cdot f$ ) Teilcheneigenschaften wie Energie, Impuls und Masse zubilligt.

Der sogenannte Welle-Teilchen-Dualismus wird in den Lehrbüchern zwar diskutiert, oft aber nicht weiter vertieft. Interferenzphänomene deutet man weiterhin mit dem Wellenmodell, für Stoßprozesse hingegen wird der Teilchencharakter von Photon und Elektron zur Erklärung herangezogen, ohne das eigentliche Dilemma, die Unvereinbarkeit von Wellen- und Teilchenvorstellung, zu thematisieren.

Die Quantenphysik sieht Lichtquanten weder als Korpuskeln an, die auf Bahnen fliegen, noch als Wellen mit kontinuierlicher Energieverteilung. Einzelprozesse sind hier stochastisch verteilt. Nichtsdestotrotz ist die Wahrscheinlichkeitsdichte dieser Photonenlokalisationen aber streng determiniert, beispielsweise bei Beugungsversuchen durch die geometrische Anordnung und die Wellenlänge des Lichts. Die Einführung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit bildet eine in sich konsistente Beschreibung der Quantenphänomene.

### Quantenphysik widerspricht dem gesunden Menschenverstand

Aus den Postulaten von Max Planck (1858 – 1947) ergeben sich einige überraschende Vorhersagen für die physikalischen Vorgänge in der Mikrowelt, die aber experimentell bestätigt werden können. Die moderne Technik beruht heutzutage in weiten Teilen auf Quantenphänomenen.

#### 1. Unschärfe:

Ort und Impuls eines Photons oder Elektrons können nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmt werden. Für das Produkt beider bildet das Planck'sche Wirkungsquantum eine untere Grenze.

#### 2. Tunneleffekt:

Das Modell der Aufenthaltswahrscheinlichkeit lässt es zu, dass Elektronen oder Photonen Bereiche durchdringen können, in denen sie sich eigentlich nicht aufhalten dürften. Es gibt Experimente, die dieses Phänomen belegen.

#### 3. Quanteninterferenz:

Ein Objekt kann scheinbar gleichzeitig zwei unterschiedlichen Wegen folgen. Beispielsweise kann ein Photon am Doppelspalt gleichzeitig sowohl durch den linken als auch durch den rechten Spalt dringen, um dahinter mit sich selbst zu interferieren.

#### 4. Komplementaritätsprinzip:

Was wir beobachten, hängt davon ab, wonach wir suchen. Je nachdem, wie wir unser Experiment gestalten, werden wir Interferenz als Welleneigenschaft oder einen Aufenthaltsort als Teilcheneigenschaft messen; nie aber beides gleichzeitig. Wellen- und Teilchencharakter werden daher als *komplementär* bezeichnet.

## Hinweise zur Gestaltung des Unterrichts

### Experimente – so machen Sie Quantenphysik erfahrbar

Der vorliegende Beitrag zeigt einen experimentell orientierten Weg auf, wie Sie den Welle-Teilchen-Dualismus und die Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Quantenphysik einführen. Er konzentriert sich auf die Grundaussagen der Quantenphysik und verdeutlicht ihre Andersartigkeit im Vergleich zu Teilchen- und Wellenphysik.

### Voraussetzungen, die Ihre Lerngruppe mitbringen sollte

- Die Gesetze der Strahlenoptik sollten nicht völlig unbekannt sein. So wissen die Schüler, dass Licht *gestreut, gebrochen, reflektiert* oder *gebeugt* werden kann, und können diese Begriffe auch auseinanderhalten.
- Die Grundlagen mechanischer Wellen müssen beherrscht werden. Wiederholen Sie die Begriffe *Amplitude* (eine ortsabhängige Größe), *Polarisation, Reflexion, (transversale) Eigenschwingung* und das Phänomen *stehender Wellen*. Lassen Sie die Schüler das *Huygens'sche Prinzip* im Merkheft festhalten. Zur anschaulichen Demonstration der Überlagerung von Elementarwellen eignen sich Experimente mit Seilwellen, der Wellenmaschine oder der Wellenwanne sowie entsprechende Computersimulationen.

II/E

### Vermitteln Sie den Charakter von Modellvorstellungen!

Die Interferenz am Spalt erklären die Schüler mit der Wellennatur des Lichts. Der Photoeffekt und der Nachweis von einzelnen Lichtquanten im Fotomultiplier, der leider im Schulexperiment nicht oder nur mit großem Aufwand erbracht werden kann, belegen den Teilchencharakter des Lichts. Arbeiten Sie mit Ihren Schülern heraus, dass ein Modell immer nur Aspekte des wirklichen Sachverhaltes beschreibt. Während man einem Teilchen zu jedem Zeitpunkt einen bestimmten Ort im Raum zuordnen kann, besitzt eine Welle eine räumliche Ausdehnung. Die Amplitude der Welle ist an allen Punkten des Raumes definiert.

Diskutieren Sie die verschiedenen Modellvorstellungen für das Licht anhand des Strahlteilers (M 1). Führen Sie dann den Welle-Teilchen-Dualismus anhand des Doppelspalt-Experiments (M 2) ein und formulieren Sie das zugrunde liegende Dilemma. Lassen Sie die Schüler mithilfe der verschiedenen Modellvorstellungen vorhersagen, wie das jeweilige Ergebnis ausfallen wird. Besprechen Sie mit Ihren Schülern, dass sich das Wellen- und Teilchenmodell gegenseitig ausschließen. Wir können uns nicht vorstellen, dass ein Photon gleichzeitig Wellen- und Teilcheneigenschaften hat. Präsentieren Sie das Wahrscheinlichkeitspostulat der Quantenphysik als Lösung des Dilemmas.

Ihre Lerngruppe wird am Ende staunen, dass das Versuchsergebnis selbst davon abhängt, welche Modellvorstellung man zur Erklärung des Versuchs heranzieht. Mit nur einem Modell lassen sich die Phänomene nicht befriedigend beschreiben. Gehen Sie auch darauf ein, dass das Ergebnis davon abhängt, ob wir den Durchgang durch den linken oder rechten Spalt beobachten oder nicht.

### Erkenntnistheoretische Auswirkungen

Dies wirft letztendlich die Frage auf, ob wir überhaupt erkennen können, was physikalisch Realität ist. Diese Frage reißen Sie aber nur kurz an. Der nachdenkliche Schüler wird sich dann vielleicht intensiver mit dem Thema auseinandersetzen und erkennen, welche erkenntnistheoretischen Auswirkungen die Quantenphysik hat und wie diese Theorie das Weltbild des 20. Jahrhunderts grundlegend verändert hat.

**Gott würfelt nicht – oder doch?**

Besprechen Sie mit Ihren Schülern, dass in der Quantenphysik die Zufälligkeit von Einzelprozessen nichts mit der Unvollkommenheit unserer Beobachtungswerkzeuge zu tun hat. Die Quantentheorie ist als statistische Theorie formuliert. Die von ihr postulierten Aufenthalts- und Übergangswahrscheinlichkeiten sind von fundamentaler Natur. Dies hat philosophische Konsequenzen, widerspricht es doch dem Kausalitätsprinzip der klassischen Physik. Für den Zerfall eines Atomkerns oder die Position des einzelnen Messpunktes beim Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen gibt es scheinbar keine Ursache.

**Lassen Sie Ihre Schüler miteinander diskutieren!**

Quantenphysik kann man nicht lernen, man muss sie anwenden und ausprobieren, um sie zu verstehen. Lassen Sie die Schüler ihre Gedanken formulieren. Die Quantenphysik erfordert viele Konzeptwechsel. Dazu ist es wichtig, sich zunächst der eigenen Gedanken und Vorstellungen bewusst zu werden. Keinesfalls geben Sie Patentrezepte vor. Diverse Materialien (wie Fotos oder Videos aus dem Internet) sind eine gute Anregung für Klassengespräche oder Diskussionsrunden.

II/E

**Ziel**

Ziel der Unterrichtseinheit ist es,

- den Schülern die Andersartigkeit der mikrophysikalischen Vorgänge näherzubringen,
- sie in Experimenten, die sie selbst durchführen, das seltsame Verhalten der Quanten erleben zu lassen,
- sie dadurch zu einer intensiven Auseinandersetzung mit den Modellvorstellungen für das Licht zu bewegen und auch dazu, über den Modellbegriff selbst nachzudenken,
- ihnen einen Zugang zu den abstrakten Begrifflichkeiten der Quantenphysik zu ermöglichen.

Wenn das zunächst schwerfällt, so trösten Sie Ihre Schüler. Alle, die sich mit Quantenphysik beschäftigen, empfinden sie – wie Feynman es formuliert – als schwer verständlich, da es nicht möglich ist, sich *anschauliche* Vorstellungen der ablaufenden Prozesse zu machen.

Weiterhin sollen die Schüler begreifen, dass die Quantenphysik eine Revolution in der Physik bedeutete und viele philosophische Fragen aufwirft.

**Vorschläge für eine Weiterführung des Themas**

Folgendermaßen können Sie das Thema weiterführen:

- Führen Sie auch für das Elektron die Materiewelle (De-Broglie-Welle) und die Schrödinger-Gleichung ein.
- Diskutieren Sie das Modell des Potenzialtopfes.
- Besprechen Sie die Vorgänge in den Atomorbitalen.
- Behandeln Sie Absorptionsspektren.

## Mediothek

### Literatur

**Küblbeck, Josef:** Quantenphysik. In: Kircher, Ernst; Girwidz, Raimund; Häußler, Peter: Physikdidaktik: Theorie und Praxis. Springer Verlag. Berlin, Heidelberg 2009. S. 455–478.

Ein fachdidaktischer Überblick über die Quantenphysik in der Schule.

**Zeilinger, Anton:** Einsteins Schleier: Die neue Welt der Quantenphysik. Goldmann Verlag, München 2005.

Anschauliche Beschreibung der Ideen, Konzepte und Begriffe der Quantenwelt.

**Schorn, Bernadette; Wiesner, Hartmut:** Die Quantenphysik in der Sekundarstufe I. In: Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, 6/57 (2008).

Ein Konzept, um die Quantenpyhsik schon in der 10. Klasse einzuführen.

### Internet-Adressen

Einige der hier vorgestellten Inhalte basieren auf dem Münchner Internetprojekt zur Lehrerfortbildung in Quantenmechanik (*milq*).

<http://homepages.physik.uni-muenchen.de/~milq/>

Besonders interessant ist ein zusammengefasstes Unterrichtskonzept für den neuen Lehrplan der 10. Klasse in Bayern:

[http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/materialien/inhalt\\_materialien/quantenphysik\\_sek1/quant\\_sek1.pdf](http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/materialien/inhalt_materialien/quantenphysik_sek1/quant_sek1.pdf)

Eine weitere lesenswerte Lektüre stellt das Unterrichtskonzept von Dr. F. Embacher dar. Er diskutiert Quantenphänomene, vor allem am Mach-Zehnder-Interferometer.

<http://homepage.univie.ac.at/Franz.Embacher/Quantentheorie/>

Der im Text erwähnte Artikel aus *Spektrum der Wissenschaft* kann unter

<http://www.spektrumverlag.de/artikel/874881>

kostenfrei heruntergeladen werden.

### Software

Die Simulationsprogramme, die im Rahmen der *milq*-Fortbildung entwickelt wurden, können unter:

<http://www.didaktik.physik.uni-muenchen.de/materialien/themen/quantenmechanik/index.html>

heruntergeladen werden.

### Bezugsadressen

Polarisationsfolie beim Astromedia Verlag: <http://www.astromedia.de>

Doppelspalt mit verstellbaren Polarisatoren (für den Quantenradierer) bei:

<http://www.muero-fraeser.de>

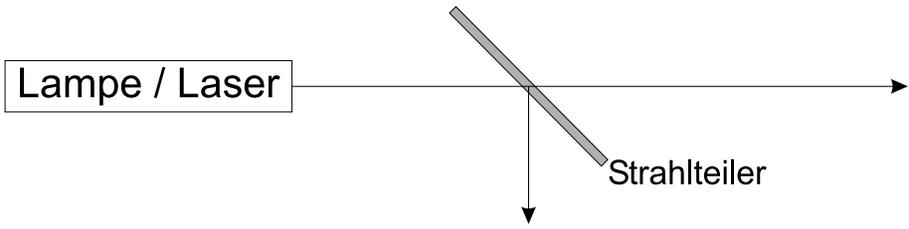
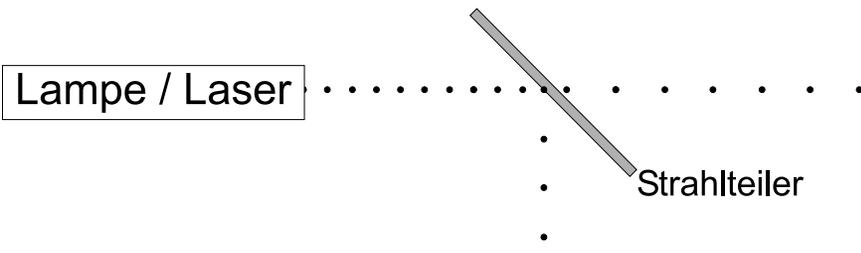
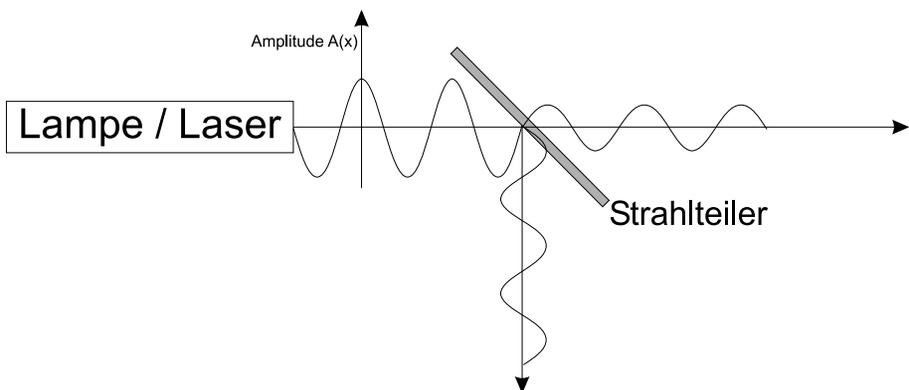
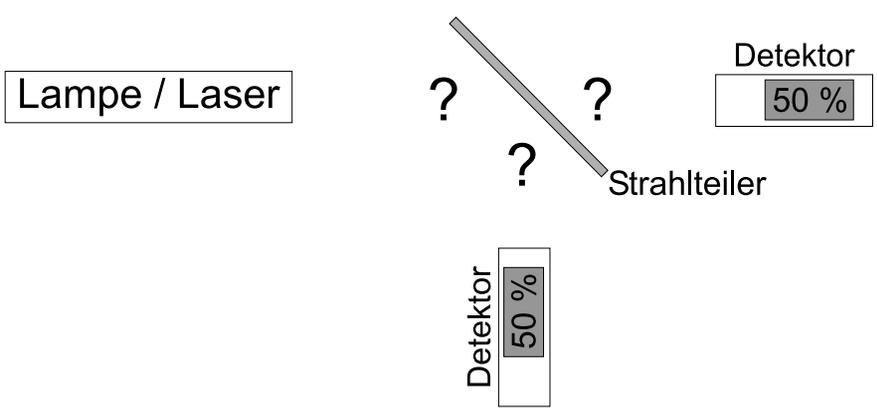
**Materialübersicht**

⌚ V = Vorbereitungszeit    SV = Schülerversuch    Ab = Arbeitsblatt/Informationsblatt  
 ⌚ D = Durchführungszeit    LV = Lehrerversuch    Fo = Folie

<b>M 1</b>	<b>Fo</b>	<b>Die verschiedenen Modellvorstellungen für das Licht</b>	
<b>M 2</b>	<b>Fo</b>	<b>Das Doppelspaltexperiment mit Teilchen, Welle und Quanten</b>	
<b>M 3</b>	<b>Ab</b>	<b>Laufzettel zum Stationenzirkel zum Thema <i>Quantenphysik</i></b>	
<b>St. 1</b>	<b>SV</b>	<b>Ein Haar im Strahl des Lasers – was nun?</b>	
	⌚ V: 5 min	<input type="checkbox"/> Laser oder Laserpointer	<input type="checkbox"/> Projektionsschirm
	⌚ D: 30 min	<input type="checkbox"/> ein menschliches Haar	<input type="checkbox"/> Geodreieck und Tafellineal
<b>St. 2</b>	<b>SV</b>	<b>Beugung am Einzelspalt</b>	
	⌚ V: 5 min	<input type="checkbox"/> Laser auf Stativ	<input type="checkbox"/> Projektionsschirm
	⌚ D: 15 min	<input type="checkbox"/> variabler Einzelspalt	
<b>St. 3</b>	<b>SV</b>	<b>Grundversuch zum Fotoeffekt nach Hallwachs</b>	
	⌚ V: 10 min	<input type="checkbox"/> UV-Lampe	<input type="checkbox"/> Zinkplatte
	⌚ D: 15 min	<input type="checkbox"/> dicke Glaslinse (als UV-Filter)	<input type="checkbox"/> Influenzmaschine
		<input type="checkbox"/> Elektroskop	<input type="checkbox"/> feines Sandpapier
		<input type="checkbox"/> Phasen- oder Polprüfer	<input type="checkbox"/> Ladungsöffel
<b>St. 4</b>	<b>SV</b>	<b>Die Abhängigkeit des Fotoeffektes von der Farbe des Lichts (mit Farbfiltern)</b>	
	⌚ V: 15 min	<input type="checkbox"/> helle Hg- oder Halogen-Lampe	<input type="checkbox"/> Messverstärker
	⌚ D: 15 min	<input type="checkbox"/> Fotozelle mit Gehäuse	<input type="checkbox"/> einige Farbfilter von Rot bis Blau
		<input type="checkbox"/> variierbare Spaltblende	
<b>St. 5</b>	<b>SV</b>	<b>Die Abhängigkeit des Fotoeffektes von der Farbe des Lichts (mit Gitter)</b>	
	⌚ V: 15 min	<input type="checkbox"/> optische Bank mit Drehgelenk	<input type="checkbox"/> Messverstärker
	⌚ D: 15 min	<input type="checkbox"/> 2 variierbare Spaltblenden	<input type="checkbox"/> optisches Gitter
		<input type="checkbox"/> Fotozelle mit Gehäuse	<input type="checkbox"/> ggf. einige Farbfilter von Rot bis Blau
		<input type="checkbox"/> helle Hg- oder Halogen-Lampe	
<b>St. 6</b>	<b>SV</b>	<b>Quantenfußball – die Aufenthaltswahrscheinlichkeit</b>	
	⌚ V: 5 min	<input type="checkbox"/> Aufzeichnung eines Fußballspiels	<input type="checkbox"/> genügend Kopien der Fußballfeldskizze
	⌚ D: 15 min	<input type="checkbox"/> PC oder DVD-Player mit Beamer	
	<b>Ab</b>	<b>Kopiervorlage <i>Quantenfußball</i></b>	
<b>St. 7</b>	<b>SV</b>	<b>Fluoreszenz des Chlorophylls</b>	
	⌚ V: 10 min	<input type="checkbox"/> Hg-Dampflampe oder	<input type="checkbox"/> Reagenzglas mit Chlorophylllösung
	⌚ D: 15 min	<input type="checkbox"/> Kohlebogenlampe	<input type="checkbox"/> optisches Gitter
		<input type="checkbox"/> Spaltblende ca. 1 mm	<input type="checkbox"/> Projektionsschirm
<b>St. 8</b>	<b>SV</b>	<b>Der Quantenradierer</b>	
	⌚ V: 20 min	<input type="checkbox"/> Laser	<input type="checkbox"/> Projektionsschirm
	⌚ D: 15 min	<input type="checkbox"/> polarisierender Doppelspalt	<input type="checkbox"/> Kopie des <i>Spektrum</i> Artikels
		<input type="checkbox"/> Polfilter	
<b>M 4</b>		<b>Tippkarten</b>	

II/E

**M 1 Die verschiedenen Modellvorstellungen für das Licht**

<p><b>Modell Lichtstrahl</b></p> 
<p><b>Teilchenmodell</b></p> 
<p><b>Wellenmodell</b></p> 
<p><b>Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Quantenmechanik</b></p> 

II/E

# SCHOOL-SCOUT.DE

Unterrichtsmaterialien in digitaler und in gedruckter Form

**Auszug aus:**

*Welle, Teilchen und Wahrscheinlichkeit - ein Quantenzirkel*

Das komplette Material finden Sie hier:

[School-Scout.de](http://School-Scout.de)

