

**Didaktik  
und  
Methodik**



# Didaktische Vorbemerkungen zur Quantenphilosophie in der Schule

*Josef Leisen*

## Inhalt

<b>0 Einleitung .....</b>	<b>172</b>
Bausteine in der Qualifikationsphase des Leistungskurses Physik .....	173
<b>1 Der didaktische Ansatz zu Interpretationsfragen der Quantenphysik .....</b>	<b>175</b>
<b>2 Das Doppelspaltexperiment als didaktischer Alleskönner .....</b>	<b>177</b>
<b>3 Im Doppelspaltexperiment steckt Welliges, Körniges und Stochastisches .....</b>	<b>178</b>
Das Doppelspaltexperiment mit Licht ( <i>Taylor-Experiment</i> ) .....	182
Das Doppelspaltexperiment mit Elektronen ( <i>Jönsson-Experiment</i> ) .....	183
Welliges, Körniges und Stochastisches in der Quantenphysik .....	184
<b>4 Im Doppelspaltexperiment steckt die Unschärferelation .....</b>	<b>185</b>
4.1 Der Weg über das <i>Heisenberg</i> -Mikroskop .....	185
4.2 Der Weg über die Unschärfe von Wellenpaketen .....	186
4.3 Der Weg über den Potentialtopf .....	186
4.4 Der Weg über die Beugung am Einzelspalt .....	187
<b>5 Im Doppelspaltexperiment steckt die ganze Palette der Interpretationen .....</b>	<b>190</b>
5.1 Erkenntnistheoretische Positionen .....	190
Aussagen zum Doppelspaltexperiment .....	191
5.2 Die Debatte zwischen Realisten und Kopenhagenern .....	193
<b>6 Literatur .....</b>	<b>198</b>

## 0 Einleitung

Es gibt inzwischen eine ganze Reihe didaktischer Konzepte zur Quantenphysik mit unterschiedlicher Akzentuierung hinsichtlich der Nomenklatur, des Formalismus, des Zugangs und der Zielsetzung. Die Unterschiede in den Konzepten zeigen sich bei der Beantwortung folgender Fragen:

- Welche begriffliche Fassung wird dem Unterrichtskonzept zugrunde gelegt (z. B. Mikroobjekte, Zustandsbegriff, Wechselwirkungsbegriff)?
- Welche Prinzipien des quantenmechanischen Formalismus werden zugrunde gelegt und welcher Formalismus ist mit welchem Ausprägungsgrad realisierbar (z. B. Zeigerformalismus, Operatorschreibweise, *Schrödinger*formalismus)?
- Welcher Zugang bietet sich an (z. B. über Elektronen oder Photonen, über den Fotoeffekt oder über das Doppelspaltexperiment)?
- Zu welchem Ziel hin wird die Quantenphysik unterrichtet (z. B. Grundlage für nachfolgende Themen oder technologische Anwendungen, Einblick in die nichtklassische Physik, Weltbildcharakter der Physik)?

Auf der Grundlage des Lehrplans Physik ist mit der Handreichung [FDK, 2000] ein Unterrichtskonzept vorgelegt, in dem das Doppelspaltexperiment mit Mikroobjekten (Elektronen, bzw. Photonen) gleichermaßen Zugang wie Bezugsexperiment der quantenmechanischen Prinzipien und Begrifflichkeiten darstellt. Darüberhinaus ist das Doppelspaltexperiment einschließlich seiner experimentellen Erweiterungen ein ausgezeichneter Zugang zu den Interpretationen der Quantenphysik.

Die erwähnten didaktischen Konzepte geben Antworten auf die obigen Fragen. Dem gegenüber ist der Bereich der Interpretationsfragen didaktisch noch relativ unbearbeitet. Es gibt eine ganze Reihe von didaktischen Aufsätzen zu dem Thema, vorwiegend jedoch unter dem Gesichtspunkt einer Elementarisierung für den Lehrer. Es ist das große Verdienst jener Autoren, den Lehrern die Interpretationsfragen der Quantenphysik in den fachlichen und didaktischen Horizont zu bringen. Völlig unbearbeitet hingegen ist der Bereich der methodischen Umsetzung und der konkreten Unterrichtsgestaltung zu dieser Thematik.

Das vorliegende didaktische Konzept setzt entsprechend der Handreichung [FDK, 2000] das Doppelspaltexperiment mit seinen experimentellen Erweiterungen durchgängig in das Zentrum des Quantenphysikunterrichts. Das Doppelspaltexperiment fungiert als „didaktischer Alleskönner“ und trägt bis zu den Interpretationen der Quantenphysik, so wie des der Baustein des Lehrplans [Lehrplan, 1998] vorsieht.

## Bausteine in der Qualifikationsphase des Leistungsfaches Physik

<b>Sach- und Methodenkompetenz</b>	
<b>Inhalte</b>	<b>Ziele/Hinweise</b>
<b>10</b>	
<b>Mikroobjekte I</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- quantenmechanisches Verhalten von freien Elektronen und Photonen am Doppelspalt (experimentelle Befunde)</li> <li>- Wahrscheinlichkeitswelle</li> <li>- <i>Heisenbergsche</i> Unschärferelation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• In die quantenmechanische Denkweise als Fundament naturwissenschaftlicher Bildung einführen.</li> <li>• Die Problematik der Begriffsbildung auf der Basis der experimentellen Befunde am Doppelspaltexperiment thematisieren.</li> </ul>
<b>10</b>	
<b>Mikroobjekte II</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>Braggreflexion</i>; 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>10</b>	
<b>Mikroobjekte III</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fotoeffekt</li> <li>- <i>Comptoneffekt</i></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 Formen der Photon-Elektron-Wechselwirkung verdeutlichen. Beim traditionellen Einstieg in die Quantenphysik über den Fotoeffekt müsste dieser vorgezogen werden.</li> </ul>
<b>10</b>	
<b>Interpretationen der Quantenphysik</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>

Um in dem zur Verfügung stehenden Zeitrahmen bis zu den Interpretationen der Quantenphysik vorzustoßen, ist ein diszipliniertes und zielstrebiges Vorgehen notwendig. Im Lehrplan und in der Handreichung werden die Begrifflichkeiten am Doppelspaltexperiment derart eingeführt und verwendet, dass eine frühzeitige Thematisierung erkenntnistheoretischer und philosophischer Fragestellungen möglich ist. Unverzichtbare Inhalte der Quantenphysik, nämlich Fotoeffekt und *Comptoneffekt* sind an passenden Stellen unter dem Teilthema der Photon-Elektron-Wechselwirkung behandelt. Der rote Faden ist das Doppelspaltexperiment mit Elektronen bzw. Photonen (vgl. Teil 1.2–1.4 in [FDK, 2000]). Darüber hinaus stecken im Doppelspaltexperiment viele andere wichtige Experimente. Im Beitrag von *Wolfram Mai* wird das erweiterte Doppelspaltexperiment für die Schule beschrieben, und das *Aspect*-Experiment und die *Zeilinger*-Experimente können als erweiterte Doppelspaltexperimente betrachtet werden. Auch wenn die experimentellen Anordnungen anders sind, so ist die Grundidee des Doppelspaltexperiments doch beibehalten: durch Spalte bzw. Strahlteiler und Markierer (z. B. Polarisationsfilter) dafür zu sorgen, dass gleichartig präparierte Mikroobjekte zur Überlagerung von unterscheidbaren bzw. ununterscheidbaren Möglichkeiten gebracht werden.

Durch die aufregenden Experimente der jüngsten Zeit hat sich die didaktische Lage im Umgang mit Interpretationsfragen der Quantenphysik in der Schule grundlegend geändert: Erstmalig gibt es die Möglichkeiten der experimentellen Überprüfung und Falsifikation an Hand der *Bellschen* Ungleichung als Unterscheidungskriterium der Interpretationsansätze. Es ist das Anliegen dieser Arbeits- und Unterrichtshilfen, den Physikunterricht mit genau diesen experimentellen Befunden inhaltlich und didaktisch zu bereichern und methodische Wege anzudeuten. Wenngleich die Schulphysik selbst diese Experimente nicht durchführen kann, so vermag sie dennoch die Prinzipien elementar und anschaulich zu verdeutlichen und im Fall der Photonen mittels Polarisationsfiltern am Doppelspalt experimentell grundlegende Einsichten zu vermitteln.

## 1 Der didaktische Ansatz zu Interpretationsfragen der Quantenphysik

Interpretationsfragen der Quantenphysik sind aus mehreren Gründen heraus ein für die Lehrkraft schwieriges unterrichtliches Unterfangen:

- Interpretationsfragen gehören in der Regel nicht zu den Standardinhalten der Physiklehrerausbildung. Hier besteht fachlicherseits ein Ausbildungsdefizit.
- Die philosophische Komponente in ihrer Frage- und Argumentationshaltung, obgleich sie der Physik originär innewohnt, führt in der universitären Ausbildung ein Schattendasein, stehen doch Formalismen, faktenorientiertes Wissen und arbeitsmethodische Fertigkeiten im Vordergrund der Ausbildung. Interpretationsfragen liegen etwas quer zu den Denkansätzen der sonst üblichen Fachsozialisation.
- Die Tatsache, dass es bei den Interpretationsfragen einen ganzen Strauß an wohlbegründeten Interpretationen gibt, die allesamt im Einklang mit dem Formalismus stehen, über deren Richtigkeit aber experimentell nicht in der gewohnten Weise der Physik entschieden werden konnte, machte diese Fragestellungen in den Augen der Physiklehrer ehrfurchtsvoll anrühlich wie gleichermaßen suspekt.
- Interpretationsfragen gehören berechtigterweise zu den fachlich schwierigen Themen und evozieren leicht das Gefühl der fachlichen Unsicherheit. Um sich nicht dem Vorwurf des Dahindilletierens auszusetzen, wird auf das Unterrichten verzichtet oder die Thematik wird bestenfalls nur angerissen.
- Es liegen kaum didaktische Konzepte und methodischen Vorschläge zum Unterrichten dieser Thematik vor. Es ermangelt einer Unterrichtstradition ebenso wie einer Verpflichtung seitens der Lehrpläne.

Das vorliegende didaktische Konzept verfolgt folgende Grundideen:

- Der Unterricht in Quantenphysik wird von Anfang an konsequent auf seinen philosophischen Gehalt und auf das philosophische Ende, nämlich auf die Interpretationsfragen hin, ausgerichtet.
- Die philosophischen Fragestellungen, hier die erkenntnistheoretischen Positionen, sollen ebenso wie die fachlichen Inhalte (Begriffe, Formalismen) und die experimentellen Überprüfungen möglichst durchgängig an ein und demselben Beispiel behandelt werden können. Hierzu bietet sich das Doppelspaltexperiment an.
- Die Interpretationsfragen sollten nicht als Zusatzstoff neben den üblichen Inhalten der Quantenphysik behandelt werden, sondern erwachsen aus den Fachinhalten als die philosophische Seite derselben heraus.
- Über die Interpretationen der Quantenphysik sollte aber methodisch dabei nicht bloß berichtet werden, sondern die Schüler sollten möglichst selbsttätig an diesen Fragestellungen arbeiten. Demzufolge müssen die Fachinhalte methodisch so aufbereitet werden, dass sie die intendierten philosophischen Fragestellungen erzwingen.

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.

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.

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.

Die nachfolgenden Überlegungen basieren auf dem Lehrplan Physik und erläutern den Baustein *Interpretationen der Quantenphysik* unter Einbindung der Bausteine *Mikroobjekte I, II, III* des Lehrplans in angemessener Form. Hierzu wird auf die Handreichung [FDK, 2000] verwiesen.

## 2 Das Doppelspaltexperiment als didaktischer Alleskönner

Der Unterrichtsvorschlag in der Handreichung [FDK, 2000] setzt das Doppelspaltexperiment mit Elektronen (*Jönsson-Experiment*) an den Anfang und durchgängig in das Zentrum des Unterrichts. 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 *Comptoneffekt* werden unter dem Gesichtspunkt der Photon-Elektron-Wechselwirkung behandelt.

„Das zentrale Geheimnis der Quantentheorie steckt im Doppelspaltexperiment.“ So schätzt *Richard Feynman* die Rolle und Bedeutung des Doppelspaltexperiments ein. In der Handreichung [FDK, 2000] und in den Ausführungen dieser Unterrichtshilfen wird deutlich, was alles im Doppelspaltexperiment steckt. Darin „steckt“:

- das „Wellige“, das „Körnige“ und das „Stochastische“ der Quantenphysik (vgl. Beitrag von *Joachim Lillig* in diesem Heft und vgl. unten),
- die *Heisenbergsche* Unschärferelation (vgl. Beitrag von *Joachim Lillig* in diesem Heft und vgl. unten),
- die Frage des Messprozesses (vgl. Beitrag von *Rolf Seibel-Schüürmann* in diesem Heft),
- die Frage der Nichtlokalität (vgl. Beitrag von *Stephan Balk* in diesem Heft),
- viele andere wichtige Experimente (vgl. Beitrag von *Wolfram Mai* in diesem Heft),
- die ganze Palette der Interpretationen (vgl. Beitrag von *Joachim Lillig* in diesem Heft und vgl. unten).

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.

Das fachliche Potenzial des Doppelspaltexperiments respektive des „Welligen“, des „Körnigen“ und des „Stochastischen“ der Quantenphysik ist im Beitrag von *Joachim Lillig* in diesem Heft ausführlich dargestellt. Unter didaktischen und unterrichtlichen Gesichtspunkten werden einige Aspekte nochmals wiederholt.

### 3 Im Doppelspaltexperiment steckt Welliges, Körniges und Stochastisches

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

- das *Young*-Experiment (vgl. [Impulse, 1998], S. 172),
- das *Taylor*-Experiment (vgl. [Impulse, 1998], S. 197) und
- das *Jönsson*-Experiment (vgl. [Impulse, 1998], S. 191).

Das *Young*-Experiment um 1800 führte nach einer langen Durchsetzungsgeschichte, hier ist *Fresnel* zu nennen, letztlich zum klassischen Wellenmodell 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 Lichtes erklären kann. Die sichtbaren Interferenzstreifen sind der Fingerabdruck des „Welligen“ im Licht, oder vorsichtiger formuliert, des „Welligen“, das uns das Licht zeigt.

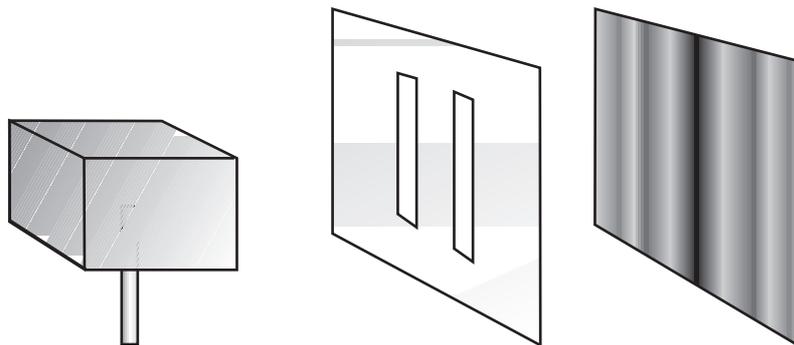


Abb. 1: Doppelspaltapparatur

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.

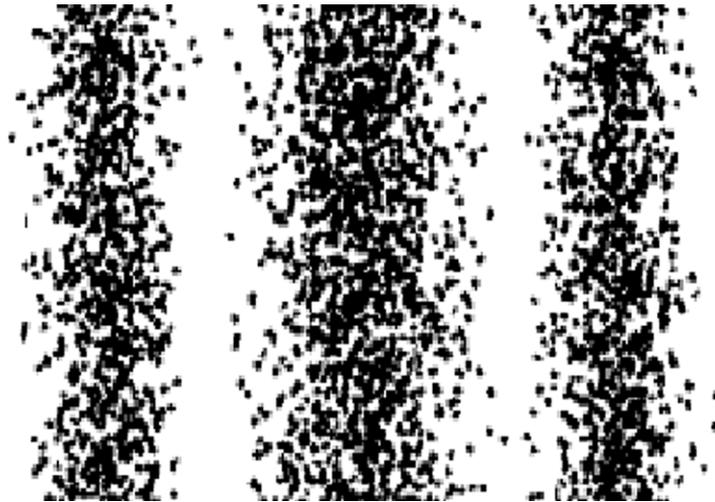


Abb. 2: Interferenzmuster

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*, *Möllnstedt* und *Dücker*.)

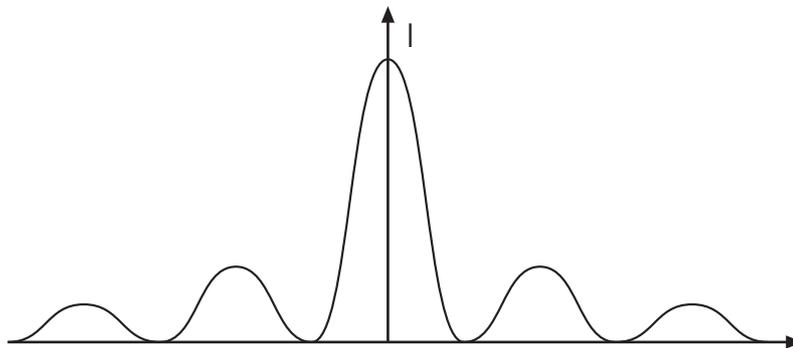


Abb. 3: Intensitätsverteilung

Hinweis: Die Originalarbeiten von *Taylor* [Taylor, 1919] und *Jönsson* [Jönsson, 1961] sind auszugsweise auch für Schülerinnen und Schüler lesbar und können im Unterricht sehr gut eingesetzt werden (vgl. dazu Handreichung [FDK, 2000], S. 64–86).

Die genannten Doppelspaltexperimente sind experimentelle und faktische Grundlagen 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 herauströpft, 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 z. B. 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.

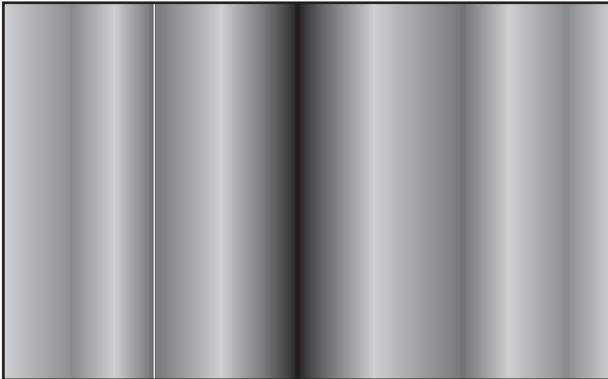
Es ist sinnvoll, das „klassische Wellen- und Teilchenkonzept“ neu zu denken und zu formulieren: Wir ordnen gleichartig präparierten Mikroobjekten eine (mathematische) Wahrscheinlichkeitswelle  $\psi$  zu, der im Sinne einer Messgröße selbst keine Realität zukommt.  $|\psi|^2 dV$  ist eine Messgröße und beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der die Mikroobjekte auf dem Schirm im Volumen  $dV$  auftreffen. (Bemerkung:  $|\psi|^2$  ist eine Wahrscheinlichkeitsdichte.)

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

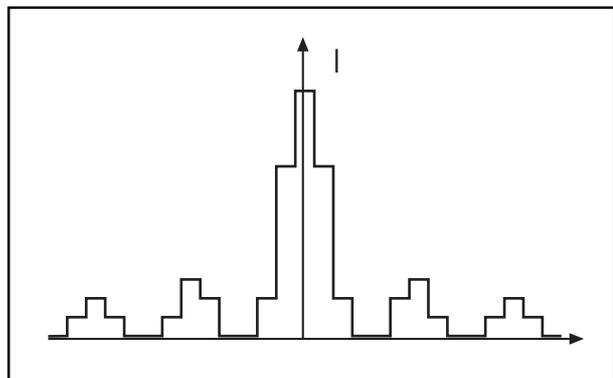
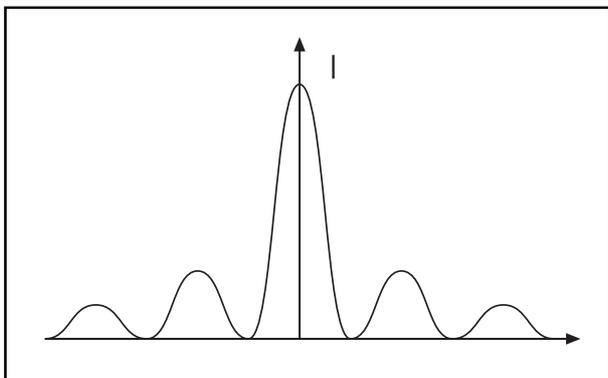
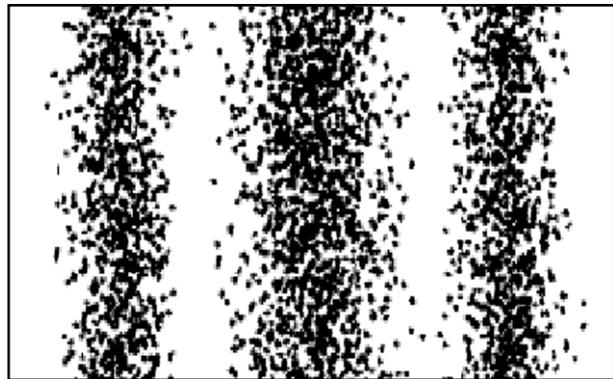
- Die Elektronenbeugungsröhre liefert die experimentelle Bestätigung der *De-Broglie*-Gleichung  $p = h/\lambda$ .
- Der Fotoeffekt liefert die experimentelle Bestätigung der *Einstein*-Gleichung  $W = h \cdot f$ .

## Doppelspaltexperiment mit Licht (*Taylor-Experiment*)

hohe Intensität



niedrige Intensität



### Beobachtung

- Wir sehen typische Doppelspalt-Interferenzstreifen in Übereinstimmung mit der Wellenvorstellung vom Licht.

### Konsequenz

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

### Beobachtung

- Stochastisch verteilte Schirmstellen leuchten im Widerspruch zur Wellenvorstellung vom Licht auf.
- Nach längerer Zeit tritt das klassische Interferenzmuster auf.
- Jede Schirmstelle absorbiert einen ganz bestimmten Energiebetrag.

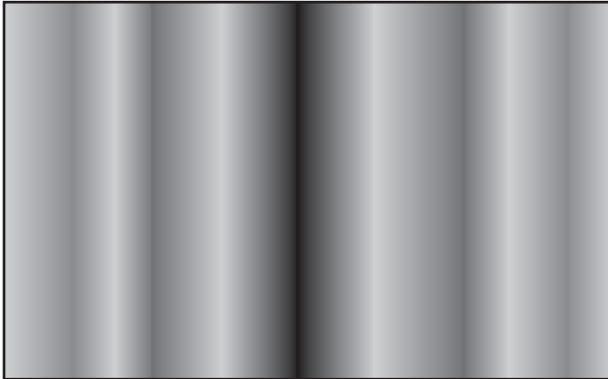
### Konsequenz

Wir müssen die Wahrscheinlichkeitstheorie zur Beschreibung des Stochastischen heranziehen.

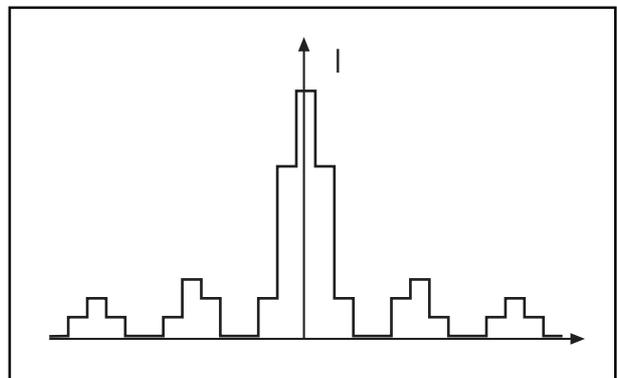
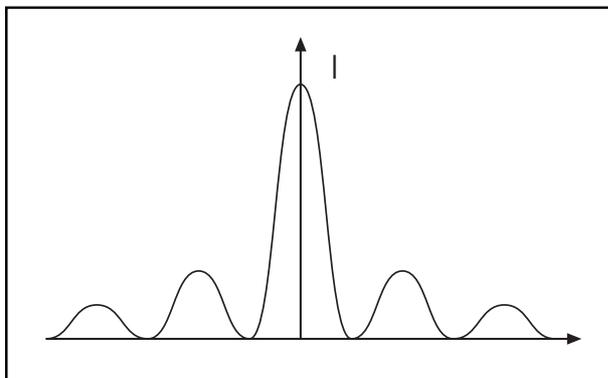
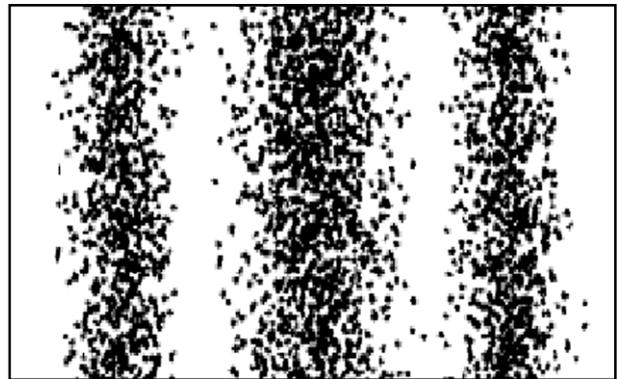
Für die einzelnen Photonen müssen wir die Welle als Wahrscheinlichkeitswelle interpretieren.

## Doppelspaltexperiment mit Elektronen (Jönsson-Experiment)

hohe Intensität



niedrige Intensität



### Beobachtung

- Wir sehen typische Doppelspalt-Interferenzstreifen im Widerspruch zur Teilchenvorstellung von Elektronen.
- Kontinuierliche Intensitätsverteilung.

### Konsequenz

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

### Beobachtung

- Stochastisch verteilte Schirmstellen leuchten in Übereinstimmung mit der Teilchenvorstellung von Elektronen auf.
- Nach längerer Zeit tritt überraschenderweise ein Interferenzmuster hervor.

### Konsequenz

Wir müssen die Wahrscheinlichkeitstheorie zur Beschreibung des Stochastischen heranziehen.

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

## 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.



## 4 Im Doppelspaltexperiment steckt die Unschärferelation

Die *Heisenbergsche* 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 *Heisenbergsche* Unschärferelation didaktisch widerspenstig. Die didaktische Widerspenstigkeit hat zwei Gründe:

- Der formale Grund für die Gültigkeit der *Heisenbergschen* Unschärferelation liegt darin, dass der Impulsoperator und der *Hamilton*-Operator nicht kommutieren.
- In der erkenntnistheoretischen Interpretation der *Heisenbergschen* 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 *Heisenbergschen* 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 *Heisenbergschen* Unschärferelation im Unterricht vorbei. In [Müller, 1997a] werden verschiedene, immer wieder angebotene Ansätze zur Vermittlung der Unschärferelation skizziert.

### 4.1 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 (*Comptoneffekt*) 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 *Heisenbergsche* Unschärferelation in der Form  $\Delta x \cdot \Delta p \approx h$  heuristisch plausibel machen.

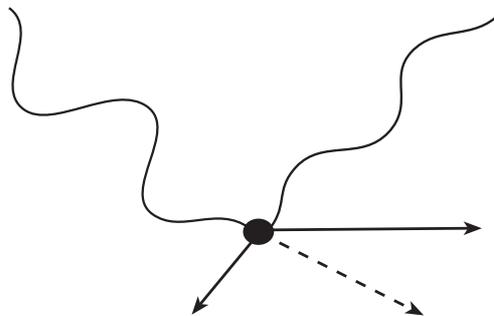


Abb. 4: Heisenberg-Mikroskop

## 4.2 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, so dass  $\Delta k \cdot \Delta x \geq 1/2$  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.

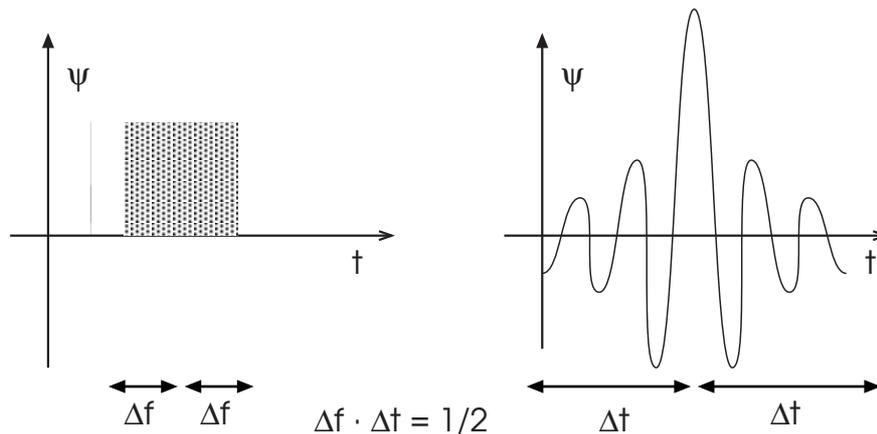


Abb. 5: Wellenpakete

## 4.3 Der Weg über den Potentialtopf

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 *Heisenbergsche* Unschärferelation  $(\Delta x)^2 \cdot (\Delta p)^2 \geq h^2 / (16\pi^2)$  herleiten.

#### 4.4 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.

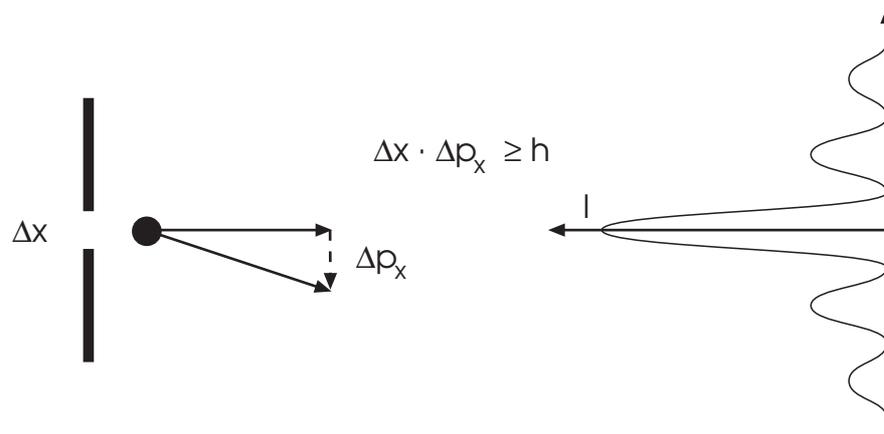


Abb. 9: Beugung am Einzelspalt

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 somit klassische Vorstellungen statt diese zu überwinden.
- Neue Experimente zur störungsfreien Wechselwirkung widersprechen dem *Heisenberg*-Mikroskop.

„Das *Heisenbergsche* Gedankenexperiment kann daher zur Illustration der Unbestimmtheitsrelation nur beschränkt empfohlen werden.“ ([Müller, 1997a], 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 [Müller, 1997a] 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 [Müller, 1997a]: „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.“ ([Müller, 1997a], 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 angesetzte 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.“ ([Müller, 1997a], 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 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 Heisenbergsche 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 Heisenbergsche Unschärferelation  $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/(4\pi)$  setzt der gleichzeitigen Verringerung eine Grenze. (Die Ortsstreuung ist dabei die Standardabweichung, die mittlere Ortsungenauigkeit.)*

Erkenntnistheoretisch hat die Heisenbergsche 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. Erkenntnistheoretisch liegen ihr zwei Punkte zugrunde:

- Die *Heisenbergsche* Unschärferelation bezieht sich nicht auf einzelne Mikroobjekte, sondern auf ein Ensemble von identisch präparierten Systemen (also einen Zustand).
- Die *Heisenbergsche* Unschärferelation gibt eine objektive Tatsache, nämlich die Unmöglichkeit einer bestimmten Präparation, wieder. (Vgl. [Müller, 1996b], S. 179)

Ein weiterer Vorzug liegt darin, dass sich die Schülerinnen und 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 Ortsunge-  
nauigkeit  $\Delta x$ , so lässt sich die mittlere Genauigkeit einer gleichzeitig stattfindenden Impulsmes-  
sung  $\Delta p_x$  prinzipiell nicht unter einen Wert senken, der sich aus der Unschärferelation  
 $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq h/(4\pi)$  ergibt. ([Impulse, 1998], S. 236)*

In der Unmöglichkeits-Formulierung ist die *Heisenbergsche* 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 *Heisenbergsche* Unschärferelation an Beispielen immer wieder sprachlich in verschiedenen Formulierungen angewandt wird. Weiterhin ist es dringend notwendig, die Bedeutung der *Heisenbergschen* 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 Fernsehöhre: Rechnungen mit einer Anodenöffnung von 0,1 mm und einer Beschleunigungsspannung von 10 kV ergeben nach der *Heisenbergschen* 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 *Heisenbergschen* Unschärferelation bei Sandkörnern als Makroobjekten.
- Elektronenbahnen in Atomen
- Lokalisationsenergie
- Stabilität der Atome

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

## 5 Im Doppelspaltexperiment steckt die ganze Palette der Interpretationen

### 5.1 Erkenntnistheoretische Positionen

In dem Beitrag von *Joachim Lillig* ist ein Strauß von Interpretationen der Quantenphysik ausführlich beschrieben und erläutert. Im folgenden werden erkenntnistheoretische Positionen zum Doppelspaltexperiment im Blick auf Interpretationen unter unterrichtlichen Gesichtspunkten betrachtet.

Das Doppelspaltexperiment liefert im Sinne von Erfahrungstatsachen eine 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 ein 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.

Didaktisch entscheidend ist die Anbindung an die eigenen metaphysischen Hintergrundüberzeugungen. Dies geschieht im folgenden Vorschlag 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 sie 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.

Nach individuellem Ankreuzen wird auf einer Folienkopie eine Strichliste aufgenommen, wodurch ein Bild der Positionen der ganzen 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.

### **Aussagen 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 aber 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 ist nicht prinzipiell unbestimmt, sondern dem Experimentator unbekannt.
- 12 Die Quantenmechanik beschreibt die physikalische Wirklichkeit des Doppelspaltexperiment unvollständig. Die Theorie enthält verborgene Parameter.
- 13 Ein Elektron ist ein Elektron, wenn es gemessen wird; kein elementares Phänomen ist ein reales Phänomen bis es ein beobachtetes Phänomen geworden ist. Die Beobachtung schafft 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 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 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 Tendenzen oder Möglichkeiten an und nicht der Welt der Dinge und Tatsachen.
- 24 Die Elektronen im Doppelspaltexperiment sind reale Teilchen, werden aber von einer realen unsichtbaren Gespensterwelle 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 die 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.

## 5.2 Die Debatte zwischen Realisten und Kopenhagenern

*Günter Quast* hat in seinem Beitrag neuere Entwicklungen in der Quantenphysik beschrieben, die starke Implikationen für die Quantenphilosophie haben. Selbstbewusst kann der Physikunterricht behaupten, den Unterschied zwischen der klassischen Philosophie und der Quantenphilosophie zu verdeutlichen:

- Der klassische Philosoph gibt zeitlose Antworten auf zeitlose Fragen.
- Der Quantenphilosoph gibt neue Antworten auf zeitlose Fragen.

Quantenphysik ist in diesem Sinne *experimentelle Philosophie* mit der Frage nach der Realität als der philosophische Kernpunkt der Quantenphysik. Im Unterschied zu allen bisherigen philosophischen Bemühungen um diese Frage gibt die Quantenphysik experimentell abgesicherte Antworten (empirische Evidenzen) wie das im Beitrag von *Wolfram Mai* beschrieben ist. Darüberhinaus ist die Quantenphilosophie endlich eine Philosophie mit Anwendungen, nämlich in der Quantenkryptografie, bei der Teleportation, beim Bau von Quantencomputern und für Sehgeräte, die funktionieren ohne anzuschauen.

Mit Recht wird die Quantenphysik als die Jahrhundertwissenschaft bezeichnet:

- Geburtsdatum: 14.12.1900, Vortrag von *Max Planck* vor der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.
- Quantenphysik und Realitätstheorie haben das Weltbild nachhaltig verändert.
- Die Quantenphysik ist die kopernikanische Revolution des 20. Jahrhunderts.

Was die Quantenphilosophie so spannend macht, das sind ihre „Verrücktheiten“:

### 1. Verrücktheit: Die Realität

- Was *Albert Einstein* nicht glauben mochte und worüber er mit *Niels Bohr* in Streit geriet: Das EPR-Paradoxon.
- Grundfrage der EPR-Debatte: Existiert eine vom Beobachter unabhängige Realität, und ist diese erkennbar? Was beschreibt die Physik? Beschreibt sie die Eigentümlichkeiten der Realität oder die Eigentümlichkeiten unserer Wahrnehmung?

### 2. Verrücktheit: Die Nichtlokalität (Separabilität, Holismus, Verschränktheit)

- Was *Albert Einstein* und viele andere nicht glauben mochten: Es gibt „spukhafte Fernwirkungen“. Teilchen-Zwillinge stehen auf immer miteinander in Verbindung.
- Grundfrage der Nichtlokalität: Hat eine lokale Beeinflussung auf ein Objekt hier einen direkten unmittelbaren Einfluss auf den Rest des Universums, wo immer das auch sei?

### 3. Verrücktheit: Wechselwirkungsfreie Messung (quantenphysikalisches Mehrwissen)

- Was die klassische Physik nicht glauben mag: Man kann „sehen“ ohne hinzuschauen.
- Grundfrage des Sehens: Kann man einen Gegenstand sehen, ohne dass ihn ein einziges Photon trifft?

Diese „Verrücktheiten“ sind eine Interessens- und Motivationsquelle für den Unterricht. Hier werden die Motive für das Erkenntnisstreben und für Weltbildänderungen angezapft (vgl. Beitrag von *Stephan Balk*).

Es folgen im Blick auf die „Verrücktheiten“ einige Ausführungen zum EPR-Paradoxon. Vorweg ein paar historische Anmerkungen:

- Ab 1935 entstand die EPR-Debatte mit der Veröffentlichung der Arbeit von *Albert Einstein, Boris Podolsky* und *Nathan Rosen*.
- Damals wurde die Debatte nur im Rahmen von Gedankenexperimenten geführt.
- Ab 1964 steht ein mathematisches Entscheidungskriterium durch die *Bellsche Ungleichung* zur Verfügung (vgl. Beitrag von *Joachim Lillig*).
- Ab 1982 werden Realexperimente (*Alain Aspect, Anton Zeilinger*) durchgeführt. Das ist der Sprung in die experimentelle Quantenphilosophie (vgl. Beiträge von *Günter Quast* und *Wolfram Mai*).

Die EPR-Debatte wurde 1935 von *Albert Einstein* initiiert und von *Niels Bohr* aufgegriffen. Daraus entwickelt sich der Standpunkt der Realisten (*Einstein, de Broglie, Schrödinger, Bohm, ...*) versus dem Standpunkt der Kopenhagener (*Bohr, Heisenberg, Pauli, von Weizsäcker, ...*). Diese Debatte ist in der folgenden Tabelle kurz einander gegenübergestellt.

Realisten	Kopenhagener
<b>Die EPR-Debatte (1935)</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Einsteins</i> Auffassung: „Die Physik ist eine Bemühung, das Seiende als etwas begrifflich zu erfassen, was unabhängig vom Wahrgenommen-Werden gedacht wird.“</li> <li>• EPR-Vollständigkeitsbedingung: „Jedes Element der physikalischen Realität muß seine Entsprechung in der physikalischen Theorie haben.“</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Bohrs</i> Angriff: „Es wird gezeigt, daß ein gewisses Kriterium der physikalischen Realität, (...) (<i>das von EPR</i>) formuliert wurde, eine wesentliche Zweideutigkeit aufweist, wenn man es auf Quantenphänomene anwendet.“</li> <li>• <i>Bohrs</i> Erklärungsansatz: “In diesem Zusammenhang wird ein mit ‚Komplementarität‘ bezeichneter Gesichtspunkt erklärt, (...)“</li> </ul>
<b>Das EPR-Gedankenexperiment</b> <p>Zwei Objekte haben kurzfristig eine bekannte Wechselwirkung.  Nach der Wechselwirkung werden Messungen durchgeführt.  Ortsmessung an 1 ermöglicht störungsfreie Ortsmessung an 2.  Impulsmessung an 1 ermöglicht störungsfreie Impulsmessung an 2.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– EPR-Schluss: Wenn beide Größen störungsfrei an Objekt 2 gemessen werden können, muss es beide als objektive Eigenschaften besitzen.</li> <li>– EPR-Folgerung: Die Quantentheorie ist unvollständig, da beide Messgrößen wegen der <i>Heisenbergschen</i> Unschärferelation kein Gegenstück in der Theorie haben.</li> </ul>	
<b>Das Ergebnis der EPR-Debatte</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– EPR-Glaube: „Während wir somit gezeigt haben, dass die Wellenfunktion keine vollständige Beschreibung der physikalischen Realität liefert, lassen wir die Frage offen, ob eine solche Beschreibung existiert oder nicht. Wir glauben jedoch, dass eine solche Theorie möglich ist.“</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>Bohrs</i> epistemische Haltung: Physik sagt nicht, wie die Natur funktioniert, sondern handelt davon, was über die Natur gesagt werden kann. Realität ist nur ein Wort, und man muss lernen, es korrekt zu benutzen.</li> </ul>

<b>Realisten versus Kopenhagener</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>Einstein, de Broglie, Schrödinger, Bohm, ...</i></li> <li>– Es existiert eine vom Beobachter unabhängige Realität.</li> <li>– Gleichartig präparierte Mikroobjekte sind physikalisch verschieden, zeigen messbar verschiedenes Verhalten.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <i>Bohr, Heisenberg, Pauli, von Weizsäcker, ...</i></li> <li>– Es gibt keine tieferliegende Realität.</li> <li>– Gleichartig präparierte Mikroobjekte sind physikalisch identisch, können aber messbar verschiedenes Verhalten zeigen.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Es gibt keine Quantenwillkür („Gott würfelt nicht“).</li> <li>– Die Wellenfunktion beschreibt das physikalische Verhalten eines einzelnen Mikroobjektes unvollständig und das stochastische Verhalten eines Ensembles vollständig.</li> <li>– Die Quantentheorie ist unvollständig.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Die Quantenwillkür stellt dem einzelnen Mikroobjekt verschiedene Realisierungsmöglichkeiten bereit.</li> <li>– Die Wellenfunktion beschreibt das physikalische Verhalten eines einzelnen Mikroobjektes vollständig.</li> <li>– Die Quantentheorie ist vollständig, sagt alles was man überhaupt wissen kann.</li> </ul>
<b>Vorteil</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Realitätsbeschreibung ohne Mystifikation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– konsistente vollständige Beschreibung</li> </ul>
<b>Kröten, die geschluckt werden müssen</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>– Kröte 1: Beschreibung durch reale unsichtbare Führungswelle</li> <li>– Kröte 2: Existenz verborgener Parameter</li> <li>– Kröte 3: superluminale Ausbreitung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Kröte 1: Beschreibung durch fiktive Stellvertreterwelle</li> <li>– Kröte 2: Kollaps der Wellenfunktion</li> <li>– Kröte 3: Nichtlokalität</li> </ul>

Was steuerte die Physik bei? Sie hat heute empirische Evidenzen vorzuweisen:

- *John S. Bell* hat 1964 bewiesen: Jede lokale Theorie muss mit den Voraussagen der Quantentheorie in Widerspruch geraten.
- *Aspect*-Experimente u. A. ab 1972 zeigen: Die Welt ist nichtlokal.
- *Zeilinger*-Experimente ab 1990 zeigen: Separibilität ist eine Fiktion, denn verschränkte Zustände bleiben verschränkt.

Zusammenfassend kann heute behauptet werden:

- Die Quantenphysik stellt nicht die Realität in Frage, aber sie zwingt dazu, unsere Alltagserfahrungen und klassischen Vorstellungen radikal zu modifizieren.
- Realität ist ein holistisches Ganzes im Sinne von nicht-lokalen, nicht-raum-zeitlichen, instantanen Korrelationen und keine Ansammlung von separierbaren Objekten.

Die Diskussion um die Interpretationen der Quantenwelt ist und bleibt spannend, wenn *Niels Bohr* mit seinem Diktum Recht hat: *Das Gegenteil einer richtigen Behauptung ist eine falsche Behauptung. Das Gegenteil einer tiefen Wahrheit kann durchaus ebenfalls eine tiefe Wahrheit sein.*

## 6 Literatur

- [FDK, 2000] **Fachdidaktische Kommission Physik**: Quantenphysik/Mikroobjekte. Handreichung zum neuen Lehrplan Physik in der Sekundarstufe II. Bad Kreuznach: Pädagogisches Zentrum 2000
- [Impulse, 1998] Impulse Physik 2. Stuttgart: Klett 1998
- [Jönsson, 1961] **Jönsson**, Claus: Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten. Zeitschrift für Physik 161 (1961), S. 454–474
- [Lehrplan, 1998] Fachdidaktische Kommission Physik: Lehrplan Physik. Mainz: Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Weiterbildung ohne Jahr (um 1998)
- [Müller, 1996a] **Müller**, Rainer; **Schmincke**, Bernhard; **Wiesner**, Hartmut: Atomphysik und Philosophie. Niels Bohrs Interpretation der Quantenmechanik – Ein Thema für die Schule. Physik in der Schule 34, 5 (Mai 1996), S. 165–170
- [Müller, 1996b] **Müller**, Rainer; **Wiesner**, Hartmut: Die Ensemble-Interpretation der Quantenmechanik (1). Physik in der Schule 34, 10 (Oktober 1996), S. 343–346
- [Müller, 1996c] **Müller**, Rainer; **Wiesner**, Hartmut: Die Ensemble-Interpretation der Quantenmechanik (2). Physik in der Schule 34, 11 (November 1996)
- [Müller, 1997a] **Müller**, Rainer; **Wiesner**, Hartmut: Die Interpretation der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation (1). Physik in der Schule 35, 5 (Mai 1997), S. 177–179
- [Müller, 1997b] **Müller**, Rainer; **Wiesner**, Hartmut: Die Interpretation der Heisenbergschen Unbestimmtheitsrelation (2). Physik in der Schule 35, 6 (Juni 1997), S. 218–221
- [Müller, 1997c] **Müller**, Rainer; **Wiesner**, Hartmut: Die Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation im Unterricht. Physik in der Schule 35, 11 (November 1997), S. 380–384
- [Müller, 1997d] **Müller**, Rainer; **Wiesner**, Hartmut: Die Energie-Zeit-Unbestimmtheitsrelation. Geltung, Interpretation und Behandlung im Schulunterricht. Physik in der Schule 35, 12 (Dezember 1997), S. 420–422
- [Müller, 1999] **Müller**, Rainer; **Wiesner**, Hartmut: Das Münchener Unterrichtskonzept zur Quantenmechanik. Unveröffentlichtes Script. München: 1999
- [Taylor, 1910] **Taylor**, G. I.: Interference fringes with feeble light. Proceedings of the Cambridge Philosophical Society XV (1910), S. 114–115