

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Quantenphysik-Unterricht und Epistemologie	13
2.1	Didaktische Überlegungen	13
2.2	Epistemologische Überlegungen	18
2.2.1	Epistemologische Ansätze Gaston Bachelards	23
2.2.2	Didaktische Adaptation der Epistemologie Bachelards	30
2.3	Lichtausbreitung im Mach-Zehnder-Interferometer: Ein Unterrichtsvorschlag	32
3	Das Mach-Zehnder-Interferometer	41
3.1	Entstehung des Mach-Zehnder-Interferometers	41
3.1.1	Das Interferometer nach Zehnder	42
3.1.2	Das Interferometer nach Mach	45
3.2	Funktionsweise des MZ-Interferometers	46
3.2.1	Interferenzbild in einem Ausgang des Interferometers	47
3.2.2	Interferenzbild an zwei Ausgängen des Interferometers	51
3.3	Das MZ-Interferometer für einzelne Photonen	59
3.3.1	Welleneigenschaft: Interferenzbild	60
3.3.2	Teilcheneigenschaft: Welcher-Weg-Information	62
3.3.3	Komplementarität: Interferenzbild / Weginformation	64
3.4	Interpretationen der Quantenphysik	69
3.4.1	Interpretationen für Photonen im MZ-Interferometer	74

3.4.2	Das Thema Interpretationen im Quantenphysik-Unterricht	75
3.5	Das Thema MZ-Interferometer im Physik-Unterricht	79
4	Die Untersuchung	85
4.1	Fragestellungen und Ziele der Untersuchung	86
4.2	Methodisches Vorgehen	88
4.2.1	Das Kategoriensystem	88
4.2.2	Verlauf der Untersuchung	90
4.3	Die erste Teil-Untersuchung	91
4.3.1	Der halboffene Fragebogen	91
4.3.2	Analyse der Schüleraussagen im Fragebogen	96
4.3.2.1	Der konzeptuelle Raum	96
4.3.2.2	Schüleraussagen im thematischen Feld Teilchenbild	101
4.3.2.3	Schüleraussagen im thematischen Feld Wellenbild	109
4.3.2.4	Das konzeptuelle Profil der Schüler über Photonen	116
4.4	Die zweite Teil-Untersuchung	127
4.4.1	Der Fragebogen	127
4.4.2	Analyse der Schülerantworten im Fragebogen	130
4.4.2.1	Schülerverhalten im thematischen Feld Teilchenbild	132
4.4.2.2	Schülerverhalten im Thematischen Feld Wellenbild	132
4.4.2.3	Das konzeptuelle Profil der Schüler über Photonen	134
5	Zusammenfassung und Perspektiven	143
5.1	Das Unterrichtskonzept	143
5.2	Das Mach-Zehnder-Interferometer	144
5.3	Das konzeptuelle Profil	146
A	Lehrerhandreichung	155
B	Fragebogen	202
C	Vergleich: Gymnasien M und K	208

Kapitel 1

Einleitung

Im Hinblick auf die globalen Veränderungen und auf die zunehmende Technisierung unserer Gesellschaft wird die Vermittlung einer entsprechenden wissenschaftlichen Erziehung besonders benötigt, damit die wissenschaftlichen und technologischen Entwicklungen in den Grundzügen von allen verstanden und kritisch beurteilt werden können. Unkenntnis der Grundlagen gegenwärtiger Naturwissenschaft kann dagegen als Hürde zur vollständigen Partizipation der Bürger in wirtschaftlichen und auch in kulturellen Bereichen der Gesellschaft angesehen werden.

Naturwissenschaftliche Erziehung setzt allerdings nicht nur fachliche Kompetenz, sondern auch bewusste und aufgeklärte Köpfe voraus. In seinen Schriften zur Pädagogik schreibt Paulo Freire ¹: “Erziehung kann niemals neutral sein.”

“Entweder ist sie ein Instrument zur Befreiung des Menschen, oder sie ist ein Instrument seiner Domestizierung, seiner Abrichtung für die Unterdrückung.” Erziehung vollzieht sich immer im Rahmen einer politischen Gemeinschaft, die durch sie bestimmte Ziele erreichen will [...]. Das Wissen, wie das “was erkennen” zu bewerkstelligen ist, kann nicht getrennt werden von “zu welchem Zweck erkennen.” (Paulo Freire in: [Figueroa 1989], S. 25)

Die Überlegungen Freires lassen sich sehr gut im Bereich naturwissenschaftliche Erziehung anwenden, denn naturwissenschaftliche Erziehung genießt eine doppelte Eigenart: Einen doktrinären und einen befreienden Charakter.

Die Berücksichtigung der aus dem epistemologischen Kontext herausgelösten Physik im Unterricht – ein bloß instrumentalisierter Physikunterricht, in dem physikalische

¹Paulo Freire (1921 – 1997) ist vor allem durch seine Bildungsarbeit in Lateinamerika bekannt geworden. Freires Alphabetisierungskampagnen sind Ausdruck einer Pädagogik der Befreiung, die der unterdrückten Bevölkerungsmehrheit in der Dritten Welt ihre Lage bewußt machen will. Mit Ivan Illich teilt Freire den Kampf gegen Unterentwicklung, Ohnmacht und Elend. In: [Figueroa 1989]

Erkenntnisse pragmatisch und statisch, als “starre Größe” vorgestellt sind und in dem die Kultur der Protokollbücher herrscht – kann als eine Art doktrinäre und autoritäre naturwissenschaftliche Erziehung, welche insbesondere den kritischen und kreativen Schüler betäubt, angesehen werden.

Naturwissenschaftliche Erziehung soll die Zukunft der technologischen Gesellschaften garantieren, sie soll allerdings in unserer Sicht auch Anwendungen in sinnlichen und geistigen Bereichen finden, und insbesondere in diesem Zusammenhang sehen wir den konstruktiven Charakter des naturwissenschaftlichen Unterrichts.

Aus der Sicht der Naturwissenschaften gilt allerdings die Physik

[...] als die naturwissenschaftliche Disziplin schlechthin. Der Hinweis auf den etymologischen Zusammenhang der Begriffe ‘Physik’ und ‘Naturwissenschaft’ reicht nicht aus, um zu erklären, warum für den Laien die Physik noch mehr als die anderen Disziplinen einen streng naturwissenschaftlichen Eindruck vermittelt. Dennoch berührt dieser Zusammenhang das Wesentliche. [Emter 1994], S. 21

In der Physik ist die Quantenphysik – das Kind des frühen 20. Jahrhunderts – “die erfolgreichste Beschreibung der Natur”, die bis zu den derzeitigen Tagen erfunden worden ist [Zeilinger 1999].

Die Quantenphysik ist gerade deshalb für Reflexionen und epistemologische Überlegungen über den naturwissenschaftlichen Erkenntnisakt prädestiniert, weil sie nicht nur zur Entwicklung zahlreicher moderner Technologien beigetragen hat – wie beispielsweise der neuen Informationstechnologien, die eine neue Welt angekündigt haben –, sondern auch, weil sie eine konstruktive Freiheit gegenüber der deterministischen Weltanschauung der klassischen Physik ermöglicht, ein neues wissenschaftlichen Weltbild gezimmert hat.

Darüber hinaus bietet die Quantenphysik – wenn sie im Unterricht als Ausdrucksform menschlicher Kultur berücksichtigt wird – die Gelegenheit für einen aufgeklärten naturwissenschaftlichen Unterricht.

Problemstellung und Ziele der Arbeit

Aus didaktischer Sicht sind dennoch viele Schwierigkeiten zur Umsetzung der Quantenphysik in die Schule festzustellen, denn die Quantenwelt, die hauptsächlich über komplexe mathematische Modellierung darstellbar ist, widerspricht nicht nur unseren alltäglichen Wahrnehmungen, sondern auch *gewohnten* Aussagen der klassischen physikalischen Weltanschauung.

Um die physikalische Welt zu betreten, muss man sich an einem vielseitigen Sozialisationsprozess beteiligen: Man verfremdet die gewöhnlichen Erfahrungen und entautomatisiert die eigenen Wahrnehmungen; dann kann man sich von der unmittelbaren Realität distanzieren und die Welt als eine physikalische Realität aufbauen. Bereits die Idee, dass Objekte aus dem Weltganzen gedanklich herausgelöst und auf diese Weise aus der Perspektive der klassischen Physik sinnvoll betrachtet werden können, muss erfasst werden.

Wenn wir dann bedenken, dass bereits beim Lehren und Lernen der klassischen Physik noch viele didaktische Schwierigkeiten und Defizite zu überwinden sind, ist es fraglich, ob die Berücksichtigung von Themen der Quantenphysik in der Schule sinnvoll ist.

Trotz aller didaktischen Schwierigkeiten plädieren wir für die Berücksichtigung der Quantenphysik in der Sekundarstufe II, allerdings für eine Betrachtung der Quantenphysik im Unterricht nicht aus der Perspektive der gewohnten Art von naturwissenschaftlicher Erziehung, die der positivistischen Wissenschaftsauffassung entspringt.

Solche Art von Erziehung wird metaphorischerweise von Freire als “Bankiers-Erziehung” gekennzeichnet, denn sie entwickelt nur affirmative Erziehungsmethoden, “die jede Darstellung der Welt als Problem ausschließen und sie statt dessen als starre Größe zeigen ..., dem sich Menschen als bloße Zuschauer anpassen müssen” und arbeitet nach dem “Prinzip der Anpassung an das Gegebene durch zweckrationale Beherrschung, Effizienz und Leistung”. [Figueroa 1989], S. 28

Wir sind der Ansicht, dass die Quantenphysik in einem solchen Verständnis von naturwissenschaftlicher Erziehung *nicht* in der Schule berücksichtigt werden soll, denn als bloße “Domestizierung” der Schüler zu einer positivistischen und pragmatischen Wissenschaftskultur dient die Quantenphysik nur zum “Inflationieren” des Rahmenplans der Sekundarstufe II.

Wir plädieren deshalb für die Betrachtung der Quantenphysik im Physikunterricht nicht als Instrumentarium zur Aufgabenlösung, sondern im Zusammenhang mit der Behandlung von Erkenntnisproblemen in der Physik, wobei in einem dialogischen Lernprozess eine situationsbezogene epistemologische Dimension der Physik im Unterricht eingeführt wird. Wir wollen die Quantenphysik im Physikunterricht nicht als Erweiterung oder Vollendung der klassischen Physik betrachten, sondern als ein neues physikalisches Weltbild präsentieren.

Für die Berücksichtigung der Quantenphysik aus einer epistemologischen Perspektive im Physikunterricht sind jedoch noch wichtige Barrieren zu überwinden, denn:

- Einerseits sind weitere Untersuchungen der Schülervorstellungen über die Quantenwelt erforderlich, damit neue didaktische Strategien und weitere Unterrichtsvorschläge zum Umsetzen der Quantenphysik auf einem für die Schüler zumut-

baren kognitiven Niveau entwickelt werden können.

- Andererseits werden fachliches Hintergrundwissen und didaktische Strategien von den Lehrern gefordert, damit wissenschaftstheoretische Fragen im Physikunterricht thematisiert werden können.

Zu diesen Anforderungen besteht immer noch Bedarf an Forschungserkenntnissen und methodischen Konzeptionen, die den Lehr- und Lernprozess unterstützen können.

In der vorliegenden Arbeit wird ein Unterrichtskonzept vorgestellt, das sowohl als Beitrag zur Untersuchung der Schülervorstellungen über das Verhalten von Photonen als auch als ein Unterrichtsvorschlag zur Einführung in die Quantenphysik aus einer epistemologischen Perspektive dienen soll.

Um über einige philosophische Konsequenzen der Quantenphysik nachzudenken, sind wir im Rahmen der vorliegenden Unterrichtskonzeption von dem Problem der begrifflichen Fassung der Quantentheorie ausgegangen. Dieses Problem entsteht vor allem aus der Notwendigkeit einer Charakterisierung der Quantenentitäten in den zwei – im Kontext der klassischen Physik – sich widersprechenden Weltbildern: Dem Teilchen- und dem Wellenbild.

Die Begriffe Teilchen und Wellen bringen

freilich konzeptionell immer [...] logisch “Unvereinbarkeit” mit sich [...].

Das mechanistische Weltbild basiert – in der historischen Entwicklung gleichsam als Gegenreaktion auf das mittelalterliche Weltbild – darin, daß korpuskulare Konzepte als unvereinbar mit Kontinua-Konzepten verstanden werden. Die Logik der Begrifflichkeiten, die der klassischen Physik entstammen, impliziert also die Unvereinbarkeit gerade jener Materiekonzepte, die die Quantenmechanik gleichberechtigt nebeneinander annimmt. [Neuser 1996], S. 9

In der Physikdidaktik zeigen viele Beiträge, dass Untersuchungen der Schülervorstellungen über das Verhalten von Quantenobjekten im Hinblick auf die Welle-Teilchen-Problematik auch wichtige Materialien zur Reflexion über den schulischen Lehr-Lernprozess in der Quantenphysik liefern können.

Mannila et al. [Mannila et al. 2002] untersuchten beispielsweise die Schülervorstellungen über das teilchen- bzw. wellenähnliche Verhalten von Quantenobjekten im Kontext eines Doppelspaltexperiments mit einzelnen Elektronen und klassifizierten die Schülervorstellungen mit Hilfe von vier Denkkategorien: Die quasi-klassischen Modelle, die auf den Bahnbegriff gründenden Modelle, die statistischen Modelle und die Quasi-Quantenmodelle. In diesem Zusammenhang zeigten die Autoren, dass bei der Mehrheit der Schüler klassische Vorstellungen die Lernprozesse der Quantenphysik dominieren.

Im Kontext dieser Arbeit beabsichtigen wir, ein konzeptuelles Profil der Schüler über das Verhalten von Photonen im Hinblick auf das Verhalten von Teilchen bzw. von Wellen zu skizzieren.

Um die Schülervorstellungen zu erheben und zu klassifizieren, werden wir die Lichtausbreitung im Mach-Zehnder-Interferometer als Problemsituation im Unterricht in Betracht ziehen. Mithilfe von Interferenzexperimenten für Quantenobjekte gelingt es mit relativ wenig Mathematik, in Grundprinzipien der Quantenmechanik und daher tief in grundlegende epistemologische Fragen der Quantentheorie zu blicken. Solche (Gedanken-)Experimente sind deshalb für die Einführung in die Quantenphysik und für die Untersuchungen der Schülervorstellungen über die Quantenwelt auf einer begrifflichen Ebene geeignet.

Das Mach-Zehnder-Interferometer für einzelne Photonen ist grundsätzlich analog dem Doppelspaltversuch mit Quantenobjekten. Der Hauptvorteil der Betrachtung eines Mach-Zehnder-Interferometers in dem vorliegenden didaktischen Zusammenhang liegt darin, dass der Justierungs- und der Modellierungsprozess, die bei Betrachtung des Doppelspaltexperiments im Unterricht normalerweise nicht thematisiert werden, im Mach-Zehnder-Interferometer eine zentrale Rolle zur Präsentation der Problemsituation spielen. Durch die Justierung und die Modellierung des Mach-Zehnder-Interferometers wollen wir erreichen, dass die Problemsituation – d.h. die Komplementarität zwischen Weginformation und Interferenzerscheinung im idealisierten Interferometer für einzelne Photonen – schrittweise mit zunehmender Abstraktion im Unterricht konstruiert wird. Auf diese Weise beabsichtigen wir, einige epistemologischen Hindernisse, die die Annahme einer ontologischen Realität der vorgestellten Phänomene durch die Schüler verhindern könnten, zu überwinden.

Die im Rahmen dieser Arbeit präsentierte Unterrichtskonzeption wird durch eine ganz spezifische Zieldimension gekennzeichnet: Der Schwerpunkt des Unterrichts liegt in der Formulierung eines Problems (d.h. in dem Problembewußtsein) und nicht in der Lösung des Problems. In anderen Worten: In der Unterrichtskonzeption geht es vor allem darum, den Schülern den Sinn der folgenden Frage bewusst zu machen: “Warum ist die Beschreibung des Verhaltens von Photonen bezüglich der Teilchen- bzw. der Wellenbeschreibung problematisch?”

Ausgehend von den oben geschilderten Überlegungen fassen wir die Hauptziele der vorliegenden Arbeit wie folgt zusammen:

- Entwicklung eines Unterrichtskonzepts zur Einführung in die Quantenphysik in der Sekundarstufe II aus einer epistemologischen Perspektive.
- Darstellung des konzeptuellen Profils der Schüler im Hinblick auf den Unterrichtsstoff.

Aufbau der Arbeit

Im Kapitel: *Quantenphysik-Unterricht und Epistemologie* sind die Grundsätze einiger ausgewählter didaktischer Konzeptionen zur Einführung in die Quantenphysik in der Sekundarstufe II sowie einige epistemologische Ansätze, die für die Entwicklung des Unterrichtskonzepts von wesentlicher Bedeutung sind, zusammengefasst. Unter Berücksichtigung der vorgestellten epistemologischen Überlegungen wird dann eine Unterrichtssequenz zur Einführung in die Quantenphysik präsentiert, in der die Lichtausbreitung im Mach-Zehnder-Interferometer im Verlauf von vier epistemologischen Unterrichtsfeldern mit zunehmender Abstraktion betrachtet wird.

Im Kapitel: *Das Mach-Zehnder-Interferometer* ist das erwähnte Interferometer, das eine zentrale Rolle innerhalb der Unterrichtsreihe spielt, sowohl für die Emission vieler Photonen pro Zeiteinheit (d.h. im klassischen Weltbild) als auch für einzelne Photonen (im Bereich der Quantenphysik) im Detail vorgestellt.

Im Kapitel: *Die Untersuchung* sind die Leitlinien und einige Ergebnisse einer explorativen Untersuchung der Schülervorstellungen über Photonen vorgestellt. Um die Schülervorstellungen über Photonen im Hinblick auf das Verhalten von Teilchen und Wellen auf einer ontologisch-epistemologischen Ebene zu erheben und zu klassifizieren, haben wir uns an dem Begriff des "konzeptuellen Profils" orientiert. Der Begriff des konzeptuellen Profils wurde bereits von Mortimer [Mortimer 1995] in der Chemie-didaktik in Anlehnung an den von Bachelard geprägten Begriff "epistemologisches Profil" [Bachelard 1980] eingeführt. Das konzeptuelle Profil der Schüler wird im Rahmen dieser Arbeit durch die Erhebung von fachlichen Kenntnissen und von ontologischen bzw. epistemologischen Positionen der Schüler zu den Unterrichtsthemen erfasst.

Im letzten Kapitel: *Zusammenfassung und Perspektiven* sind einige Überlegungen und Perspektiven zur Berücksichtigung der Quantenphysik im Physikunterricht im Hinblick auf die vorgestellte Unterrichtskonzeption geschildert.

Lehrerhandreichung und Unterrichtsmaterialien, die von Lehrern im Unterricht verwendet wurden, und die Fragebogen sind in den Anhängen am Ende der Arbeit beige-fügt.

In der Abbildung 1.1 sind die für die vorliegende Arbeit wichtigsten Begriffe wie beispielsweise: Epistemologischer Vektor, epistemologische Unterrichtsfelder und konzeptuelles Profil, die die theoretische Basis für die Entwicklung der Unterrichtssequenz bzw. der Untersuchung bilden, in Verbindung mit den entsprechenden Begriffen aus der Bachelard'schen Epistemologie im Überblick präsentiert.

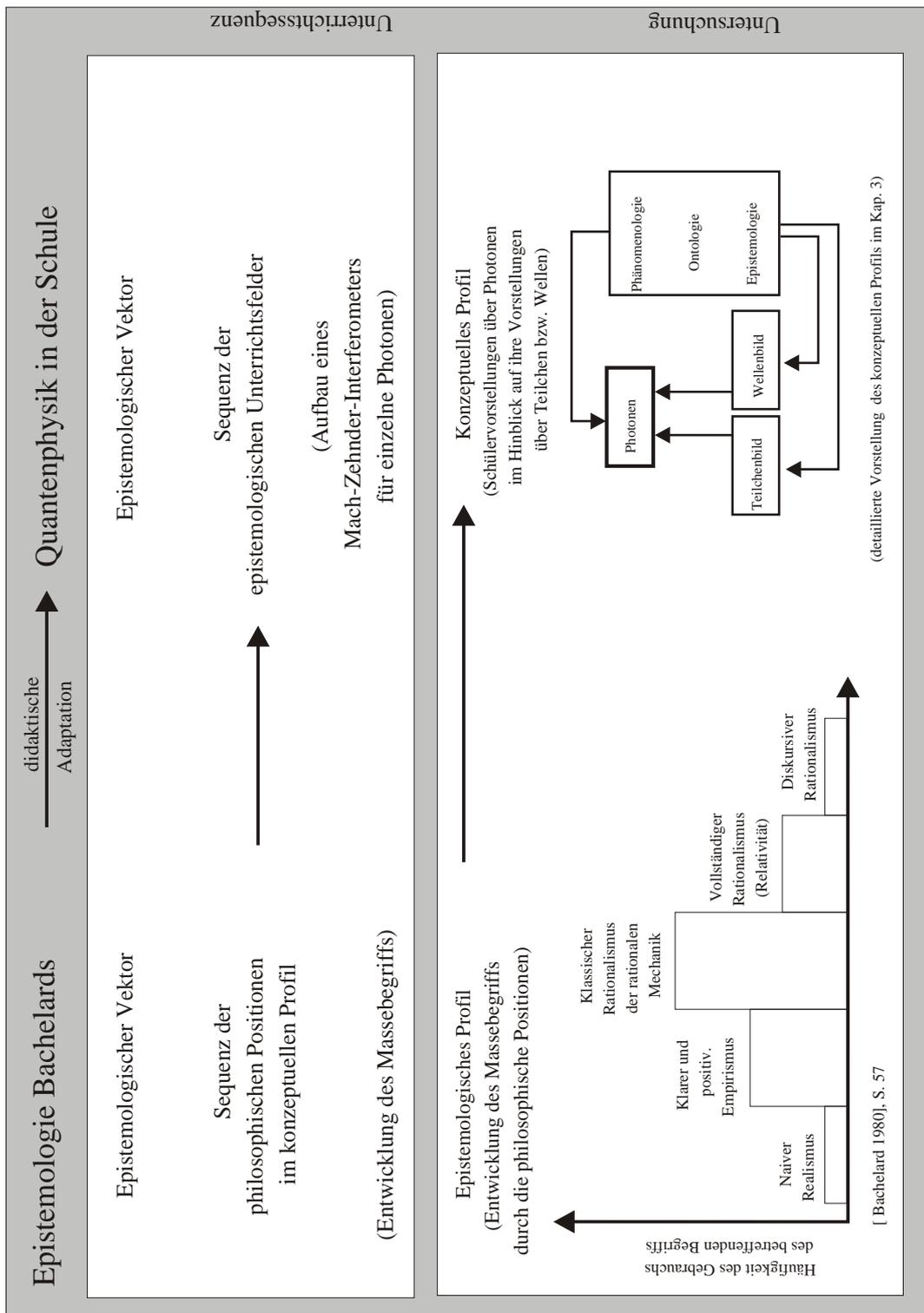


Abbildung 1.1: Leitfaden der Arbeit

