

# Kapitel 2

## Quantenphysik-Unterricht und Epistemologie

*Wenn ihr erstmal genau wißt,  
wie die Frage wirklich lautet,  
dann werdet ihr auch wissen,  
was die Antwort bedeutet.  
(D. Adams; Per Anhalter durch die Galaxis)*

Das Hauptanliegen dieses Kapitels ist es, den Leitfaden eines Unterrichtsvorschlags zur Einführung in die Quantenphysik in der Sekundarstufe vorzustellen. Die ersten Abschnitte des Kapitels widmen sich jedoch der Vorstellung einiger didaktischer Überlegungen aus repräsentativen Unterrichtsvorschlägen zur Quantenphysik in der Sekundarstufe II und der Vorstellung grundlegender Ideen aus einigen ausgewählten wissenschaftstheoretischen Auffassungen – insbesondere aus der Epistemologie Gaston Bachelards –, die für die Entwicklung unseres Unterrichtskonzepts von Bedeutung sind. Die didaktische Übertragung der epistemologischen Auffassung Bachelards sowie die Unterrichtssequenz “Lichtausbreitung im Mach-Zehnder-Interferometer” werden dann im Verlauf dieses Kapitels präsentiert.

### 2.1 Didaktische Überlegungen

Das Thema Quantenphysik in der Sekundarstufe hat sich seit langem als Arbeitsfeld vieler Didaktiker etabliert. Infolgedessen stehen zahlreiche Unterrichtskonzeptionen, didaktische Materialien und Hilfsmittel zur Erörterung von Themen der Quantenphysik im Physikunterricht zur Verfügung. Oft wird behauptet, mit Hilfe von klassischen

Analogien, anschaulichen Bildern, Computersimulationen, Experimenten, mathematischen Metaphern usw. könnte die Quantentheorie trotz ihrer Komplexität den Schülern vermittelt werden. Ein standardisiertes Konzept zur Umsetzung der Quantentheorie auf den für die Schule zumutbaren Abstraktionsgrad existiert allerdings nicht.

Das Berliner Konzept [Fischler 1992] plädiert beispielsweise für die Vermeidung klassischer Bezüge. Im Gegensatz zu anderen Unterrichtskonzepten, die in der Unterrichtseinheit mit der Betrachtung des Photoeffektes beginnen, erfolgt der Einstieg bei der Berliner Konzeption durch die Auseinandersetzung mit Elektronen, und zwar mit einem Experiment zur Elektronenbeugung.

Diese Entscheidung wird damit begründet, daß die Neigung der Schüler, Photonen mit Teilchen-Vorstellungen zu verbinden, ein Modell der klassischen Physik also in die Mikrowelt mit hinüberzuretten, größer ist als die Bereitschaft, Elektronen mit der Wellen-Vorstellung zu verknüpfen. [Berg et al. 1993], S. 247

Die statistische Deutung der Quantenphysik wird bevorzugt, die dualistische Sprechweise vermieden und insbesondere die Unbestimmtheitsrelation statistisch interpretiert.

Im Bremer Vorschlag zum Quantenphysik-Unterricht [Niedderer 1992] werden anschauliche Hilfen zum Verständnis des quantenphysikalischen Zustandes hinzugezogen, dabei werden sowohl Analogie-Experimente aus der Mechanik als auch der Computereinsatz als Hilfsmittel benutzt. Die Schrödinger-Gleichung wird in diesem Zusammenhang über eine Analogie zur stehenden Welle betrachtet. Eine Vertiefung der Interpretationsdiskussion und ihrer philosophischen Probleme wird in dieser Konzeption nicht beabsichtigt, diese Konzeption ist mehr auf die "Erschließung von Anwendung eines Quantenmodells auf Phänomene der Atomphysik, der Chemie und der Festkörperphysik" gerichtet [Niedderer 1992], S. 89. Analogien zu Inhalten der klassischen Physik werden häufig und bewusst gebraucht, dagegen wird ein neuer Typ des Denkens in der Quantenphysik weniger betont.

Das Münchener Unterrichtskonzept [Müller et al. 2000a] besteht aus zwei großen Hauptteilen: einem qualitativen Basiskurs und einem quantitativen Aufbaukurs. Der erste Teil ist im Vergleich zu anderen Konzeptionen intensiv den Deutungsfragen der Quantenphysik gewidmet. Die Einführung in die Unterrichtsreihe erfolgt über die Photonen. Um das ungewöhnliche Verhalten dieser Quantenobjekte zu untersuchen, wurden Versuche analysiert, bei denen die Interferenz mit Quantenobjekten im Vordergrund steht, und zwar der Doppelspaltversuch und das Mach-Zehnder-Interferometer als Computersimulationen. Im zweiten Teil der Unterrichtskonzeption werden formale Strukturen der Quantenmechanik betrachtet. Wichtige Themen in diesem Zusammenhang sind Quantenzustände und quantenmechanische Messprozesse. In dieser Konzeption

[...] sollen die Aspekte der Quantenphysik herausgestellt werden, die gegenüber der klassischen Physik das ganz Neue darstellen [Müller et al. 2000a], S. 127

Ein Beispiel für Projekte zum Quantenphysik-Unterricht, in denen Medienalternativen angeboten werden, ist das Projekt Visual Quantum Mechanics der Kansas Universität [Rebello et al. 1999]. Dieses Projekt beabsichtigt, einige Grundideen der Quantenmechanik für Schüler der oberen Sekundarstufe und für Studienanfänger verständlich zu machen, ohne eine intensive Behandlung der Mathematik durchführen zu müssen. “Hands-on”-Aktivitäten und Computer-Simulationen werden integriert und entsprechend den Zielen des Projekts verwendet.

Die Berücksichtigung des historischen Weges im wissenschaftlichen Erkenntnisprozess unter Einbeziehung philosophischer Positionen in den Quantenphysik-Unterricht wird beispielsweise von einer Gruppe in der “Universidade de São Paulo” in Brasilien [Zanetic 1989] vorgeschlagen. Philosophische, kulturelle und soziale Aspekte des wissenschaftlichen Denken werden hervorgehoben und im Vordergrund des Unterrichtskonzepts steht die Hauptthese “Physik ist auch Kultur”.

Im Gegensatz zur Berliner Konzeption und zum Bremer Vorschlag, die beispielsweise auf die Orientierung an der historischen Entwicklung der Physik verzichten, damit die Schüler neue Phänomene bzw. Begriffe der Quantenphysik nicht mit klassischen Denkstrukturen identifizieren, vertritt die Konzeption aus São Paulo die Meinung, dass gerade ein historisch orientierter Quantenphysik-Unterricht, der den Bedeutungswandel von physikalischen Begriffen unter Einbeziehung der klassischen bzw. der Quantentheorie in Betracht zieht, den Zugang zu den neuen Denkstrukturen der Quantenphysik ermöglicht. Eine historische Orientierung bedeutet in der Auffassung der Gruppe in der Universität São Paulo dennoch weder die bloße chronologische Aneinanderreihung von Entwicklungsstufen noch eine Ansammlung von historischen Fakten und Daten, sondern eine epistemologische Charakterisierung der physikalischen Inhalte anhand unterschiedlicher philosophischer Weltanschauungen. [Zanetic 1989]

Die oben erwähnten Konzeptionen zum Quantenphysik-Unterricht werden an dieser Stelle vorgestellt, weil sie als Ausgangspunkt für unsere didaktischen Überlegungen zur Entwicklung eines Unterrichtskonzepts zur Einführung in die Quantenphysik in der Sekundarstufe II dienen. Im Rahmen dieser Arbeit ist jedoch nicht beabsichtigt, eine detaillierte Analyse von Unterrichtsvorschlägen durchzuführen; um aber einen allgemeinen Überblick über die Schwerpunkte einiger didaktischer Konzeptionen zur Quantenphysik zu gewinnen, werden wir im Folgenden einige Grundideen aus den von [Fischler 1992] und von [NARST 1999] entnommenen didaktischen Überlegungen zum Quantenphysik-Unterricht mit Hilfe einer begrenzten Anzahl von thematischen Kategorien zusammenfassen. Diese Kategorien lassen sich wie folgt beschreiben:

- **Klassische Physik:** Berücksichtigung von klassischen bzw. semi-klassischen Theorien der Physik als Ankerpunkt zur Vermittlung von Themen der Quantenphysik (Beispielsweise: Betrachtung des Bohr’schen Atommodells).

- Geschichte: Orientierung an der historischen Entwicklung der Physik.
- Modelle/Analogien: Betrachtung von Themen der Quantenphysik mit Hilfe von Modellen und/oder anschaulichen Analogien (Beispiel: Betrachtung mechanischer Wellen als Analogien zur Wellenfunktion).
- Computer: Betrachtung von Themen der Quantenphysik mit Hilfe von Computeranwendungen, Simulationen, Lern-, Demonstrationsprogrammen usw. (Beispiel: Betrachtung von Interferenzexperimenten mit Quantenobjekten mit Hilfe einer Computersimulation).
- Experimente: Betrachtung der Quantenphysik aus der Perspektive grundlegender Gedankenexperimente bzw. Experimente der Quantentheorie (Beispiel: Betrachtung des Doppelspaltexperiments mit einzelnen Photonen).
- Interpretationen: Thematisierung des Deutungsproblems der Quantentheorie unter Berücksichtigung wissenschaftstheoretischer Überlegungen (Beispiel: Thematisierung der Komplementarität Welle-Teilchen in der Quantenphysik).
- Motivation: Berücksichtigung von Themen der Quantenphysik im Spiegel gegenwärtiger neuer Technologien und praktischer Anwendungen der Quantentheorie (Beispielsweise: Neue Informationstechnologien, Quantencomputer, usw.).
- Mathematik: Intensive Behandlung mathematischer Ansätze der Quantentheorie (Beispiel: Betrachtung der Wellenfunktion).

In der Tabelle in der Abbildung 2.1 auf der Seite 17 sind einige der oben erwähnten Konzeptionen zum Quantenphysik-Unterricht im Hinblick auf die thematischen Kategorien vorgestellt.

Die Bezeichnungen “+” bzw. “-” in der Tabelle stehen für Argumente “für” bzw. “gegen” die Berücksichtigung der den thematischen Kategorien entsprechenden Themen.

Mit Hilfe der Darstellung in der Abbildung 2.1 lässt sich beispielsweise beobachten, dass im Rahmen der vorgestellten Unterrichtsvorschläge einige Themen mit Vorzug betrachtet werden: Das Thema “Modelle und/oder Analogien” und das Thema “Klassische Physik” werden zum Beispiel am häufigsten als lernfördernd in den didaktischen Konzeptionen angesehen. Das Thema “Klassische Physik” wird jedoch auch am häufigsten als wenig geeignet angesehen (vgl. dunkle und helle Balken im Diagramm in der Abb. 2.1).

Bei der Entwicklung des Unterrichtskonzepts, das in diesem Kapitel ausführlich vorgestellt wird, haben vor allem die Themen Klassische Physik, Geschichte, Model-

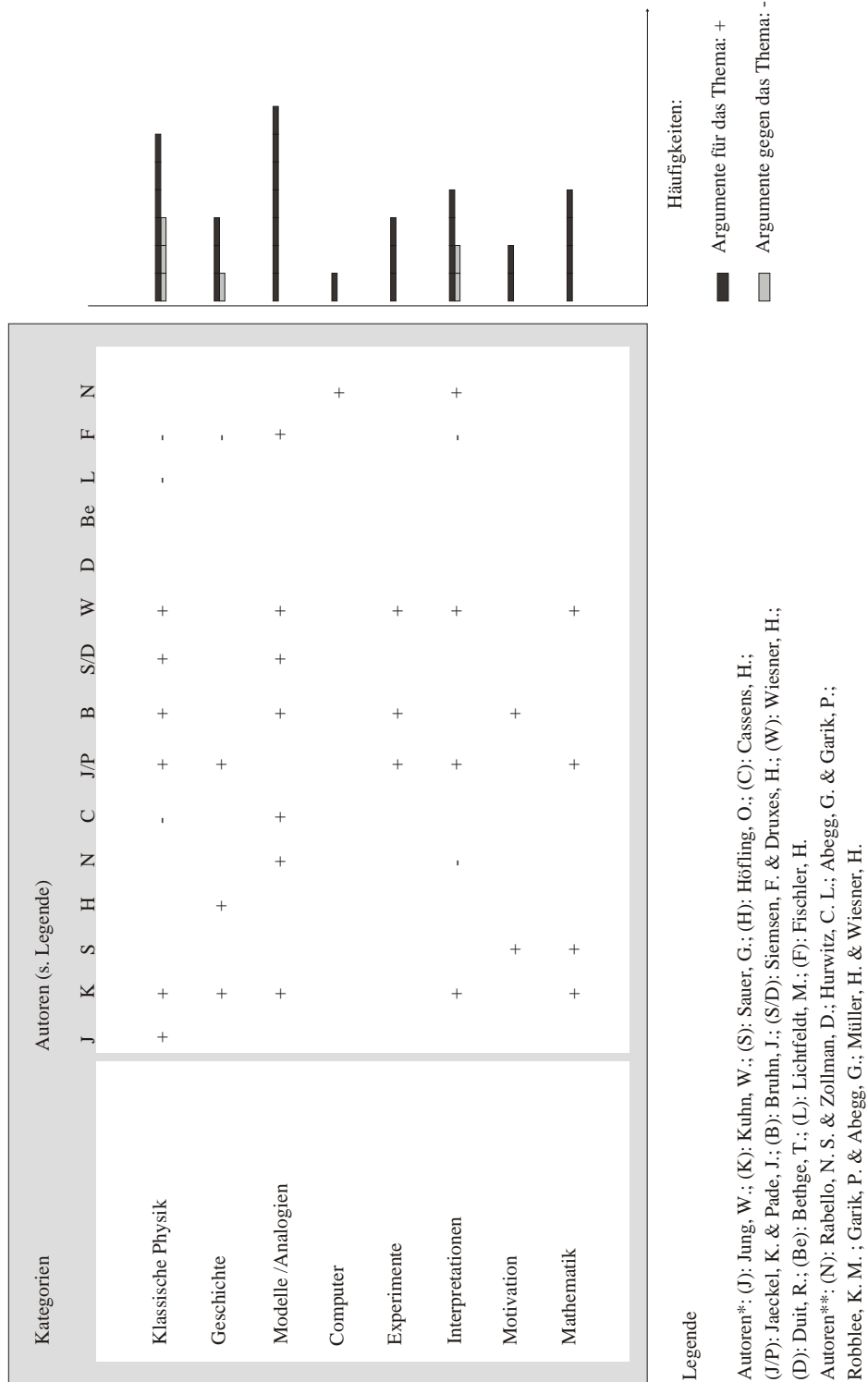


Abbildung 2.1: Teilthemen der Quantenphysik in der Sekundarstufe II

\* in Fischler, H. (Hrsg.): Quantenphysik in der Schule, IPN, Kiel, 1992.  
 \*\* in NARST: Research on Teaching and Learning Quantum Mechanics -  
 Papers presented at the annual meeting of the National Association for Research in Science Teaching, 1999.

le/Analogien, Experimente und Interpretationen eine wichtige Rolle gespielt. Quantenphysik-Unterricht in der Sekundarstufe II in Verbindung mit klassischen bzw. historischen Bezügen und die Einbeziehung des Deutungsproblems der Quantentheorie in den Unterricht ist allerdings aus der Sicht einiger Unterrichtskonzeptionen kritisiert worden. Wie bereits am Anfang dieses Abschnittes erwähnt wurde, sind einige Autoren der Ansicht (s. beispielsweise Fischler in: [Fischler 1992]), dass bei einer Orientierung an der historischen Entwicklung der Physik oder bei der Integration klassischer Analogien die Gefahr entsteht,

die neuen Phänomene der Quantenphysik mit den in der klassischen Physik entstandenen Denkstrukturen zu erklären. [Fischler 1992], S. 245

Und damit wird

unnötigerweise ein zusätzliches Hindernis für das angemessene Verständnis der Quantenphysik [durch die Schüler] aufgebaut. [Berg et al. 1993], S. 10

Im Gegensatz dazu sind wir davon ausgegangen, dass einige dieser Hindernisse – wenn sie aus einer epistemologischen Perspektive im Lernprozess berücksichtigt sind – nicht nur überwunden werden können, sondern die Entwicklung eines epistemologischen Bewusstseins zum Erkenntnisprozess der Quantenphysik unterstützen können.

Die “epistemologischen Hindernisse” spielen eine wichtige Rolle beispielsweise in der Bachelard’schen Auffassung über den Entwicklungsprozess des wissenschaftlichen Denkens. Wie bereits am Anfang dieses Kapitels erwähnt wurde, ist die Epistemologie Bachelards von erster Bedeutung für unsere Überlegungen zur Entwicklung eines Unterrichtsvorschlags zur Einführung in die Quantenphysik aus einer epistemologischen Perspektive.

In den folgenden Abschnitten werden wir uns daher näher mit den epistemologischen Ansätzen Bachelards befassen, bevor wir das Unterrichtskonzept präsentieren.

## 2.2 Epistemologische Überlegungen

In den 80er und 90er Jahren erschienen in der fachdidaktischen Literatur viele Beiträge, die didaktische Überlegungen zum Unterricht in den Naturwissenschaften und wissenschaftstheoretische Auffassungen in Verbindung gebracht haben [Rupérez 1990]. Diese Konstellation – Wissenschaftstheorie und didaktische Überlegungen über Lehr-Lernprozesse in den Naturwissenschaften – hat insbesondere innerhalb der konstruktivistischen Bewegung zu vielen positiven Ergebnissen geführt und wurde fast als Paradigma im Bereich Didaktik der Naturwissenschaften angenommen. Für die Berücksichtigung wissenschaftstheoretischer Auffassungen in didaktischen Vorschlägen zum

Unterricht in den Naturwissenschaften plädieren vor allem diejenigen Didaktiker, die empirisch-positivistisch basierte Unterrichtsvorschläge stark kritisieren.

Trotz eines breiten Konsenses darüber, dass die Einbeziehung wissenschaftstheoretischer Überlegungen in didaktische Konzeptionen sehr sinnvoll ist, gibt es bei einigen Didaktikern dennoch Skepsis. Sie behaupten beispielsweise, dass in konstruktivistisch geprägten Konzeptionen, die sich an wissenschaftstheoretischen Auffassungen orientieren, die Rolle individueller Entwicklungen – anstatt ontologischer bzw. epistemologischer Dimensionen der wissenschaftlichen Erkenntnis – viel zu hoch eingeschätzt wird. Auf diese Weise wird zugunsten eines “Nicht-Empirismus” ein pragmatischer Relativismus propagiert [Laburú 1996]. So entstehe beispielsweise die Gefahr, dass die Schüler die wissenschaftliche Erkenntnis nicht mit einer ontologischen Realität, sondern mit einer inneren und subjektiven Welt verknüpfen [Osborne 1996], und daher kann die “Wissenschaftlichkeit” der wissenschaftlichen Erkenntnis aus der Sicht der Schüler in Zweifel geraten [Pietrocola 2004]. In dieser Sichtweise sind alternative bzw. nicht-wissenschaftliche Vorstellungen von wissenschaftlichen Aussagen von den Schülern kaum zu unterscheiden, und oft dominieren die Fehlvorstellungen – anstatt der erwünschten Vorstellungen – die schulischen Lernprozesse.

Im pädagogischen Bereich haben sich deshalb viele konstruktivistische Autoren gegen die ontologisch-idealistischen Aussagen des radikalen Konstruktivismus ausgesprochen und sich daher für eine sozialkonstruktivistische [Driver et al. 1994] Sichtweise eingesetzt.

Die sozialkonstruktivistischen Positionen werden vor allem durch die Berücksichtigung sozialer Wechselwirkungen in Lernprozessen im Unterrichtskontext charakterisiert. In dieser Sichtweise wird oft über den “Enkulturationsprozess” in der wissenschaftlichen Kultur in Lernprozessen gesprochen. Dennoch – so wie die radikale individualkonstruktivistische Sichtweise, die von den Ideen Piagets inspiriert wurde – werden auch die sozialkonstruktivistischen Positionen in ihrer epistemologischen Basis kritisiert. Manche Autoren sprechen in diesem Zusammenhang über einen “kollektiven Subjektivismus” in der sozialkonstruktivistischen Position, der dem kritisierten individuellen Subjektivismus des radikalen Konstruktivismus spricht.

Indem man davon ausgeht, dass die sozialen Komponenten im Unterricht eine zentrale Rolle in den Lehr- und Lernprozessen des Unterrichts spielen, nimmt man an, dass bestimmte Mechanismen in Lernprozessen vorhanden sind, die den Schülern einer Gruppe bei der Entwicklung kollektiver wissenschaftlicher Vorstellungen verhelfen. Diese Mechanismen haben sich jedoch in empirischen Untersuchungen noch nicht als wirksam erwiesen.

Um die erwähnte Problematik zu veranschaulichen, führt beispielsweise Pietrocola eine kritische Analyse der Aufnahme Kuhn’scher Ideen in den Bereich der Didaktik der Naturwissenschaften durch. Unter anderem erwähnt er die Konzeption von Posner

[Posner et al. 1982], in der der Übergang von der klassischen Mechanik zur Speziellen Relativitätstheorie Einsteins – die als eine typische “Wissenschaftliche Revolution” charakterisiert wird – als Beispiel eines Konzeptwechsels im Lernprozess herausgearbeitet wird.

[Kuhns Bild] von der Entwicklung wissenschaftlicher Theorien [...] ist ein Phasen-Bild: Phasen sogenannter normaler Wissenschaft, in denen der Wissenszuwachs kontinuierlich ist, werden von wissenschaftlichen Revolutionen, die jeweils durch einen radikalen Sprung von einer normalwissenschaftlichen Phase zu einer von ihr grundlegend verschiedenen führen, unterbrochen. Die ganze Entwicklung ist einem evolutionären Prozeß vergleichbar, der seine Richtung nicht aus einem vorgegebenen, äußeren Ziel (z. B. “Wirklichkeit” oder “Wahrheit”) gewinnt, sondern aus Mechanismen, die ihn von innen steuern. [Mühlhölzer 1999], S. 384

Bereits in der Terminologie der Auffassung Kuhns – wie am Beispiel des Begriffs “wissenschaftliche Revolution” – lässt sich erkennen, dass die Wissenschaft in seiner Sicht eine Gruppenaktivität ist.

[Mit seiner Wissenschaftsauffassung wurde Kuhn] zu einem der prominentesten Vertreter der sogenannten neuen wissenschaftsinternen Historiographie, die sich darum bemüht, die einzelnen Phasen wissenschaftlicher Entwicklung nicht nur im Hinblick auf unser heutiges Wissen, sondern in ihrer historischen Eigenart zu verstehen. [Mühlhölzer 1999], S. 383

In gewisser Weise hat Kuhn also eine sozialhistorische Dimension der Naturwissenschaften eingeführt und möglicherweise ist dies der Grund für die große Anziehungskraft der Ansätze Kuhns auf didaktische Überlegungen und Untersuchungen der Lernprozesse in den Naturwissenschaften.

Kuhn hat allerdings immer betont, dass die Wissenschaft im wesentlichen Gruppenaktivität ist. Strategien zum Konzeptwechsel haben hingegen nicht mit einer kollektiven Erkenntnisaktivität, sondern mit individuellen bzw. subjektiven Mechanismen zu tun. Daher zeigt Pietrocola am Beispiel seiner Analyse, dass die didaktische Übertragung der Kuhn’schen Auffassung in einigen konstruktivistischen Konzeptionen zu undeutlichen Schülervorstellungen über die ontologische Dimension der Realität im wissenschaftlichen Erkenntnisprozess führen kann.

Insofern entsprechen einige kritische Aspekte der sozialkonstruktivistischen Positionen denen, die schon in der individualkonstruktivistischen Sichtweise vorhanden waren. In extremen Fällen sind in beiden Positionen eine pragmatische Epistemologie festzustellen. Um diese Ideen in konstruktivistischen Konzeptionen zu vermeiden und den Bezug zur ontologischen Realität in Lernprozessen der Naturwissenschaften nicht zu



vernachlässigen, schlagen einige Autoren eine epistemologische Ergänzung zu den konstruktivistischen Ansätzen [Pietrocola 2004] vor, indem beispielsweise die Rolle wissenschaftlicher Modelle und ihre Verbindung mit der Wirklichkeit in didaktischen Unterrichtsvorschlägen hervorgehoben wird.

Die grundlegenden Ideen seiner didaktischen Überlegungen findet Pietrocola beispielsweise in der Auffassung M. Bunges<sup>1</sup> über den Theoretisierungsprozess in der Entwicklung des wissenschaftlichen Denkens. Die Entwicklung wissenschaftlicher Erkenntnis ist aus der Sicht Bunges wesentlich ein Modellierungsprozess, in dem die unmittelbare Realität schrittweise in eine theoretisch-idealisierte Wirklichkeit übersetzt wird. In einem solchen Prozess dienen die Modelle als Schnittstelle zwischen empirischen Daten (d.h. der Erfahrungswelt) und theoretischen Konstruktionen (d.h. der Gedankenwelt). Die Betrachtung des Modellierungsprozesses in didaktischen Überlegungen zum Unterricht in den Naturwissenschaften soll eine Brücke zur Realität schaffen.

Der Schwerpunkt unserer Unterrichtskonzeption, die in diesem Kapitel präsentiert wird, liegt darin, ein Phänomen schrittweise mit zunehmender Abstraktion aufzubauen.

Speziell vom Standpunkt der modernen Physik – insbesondere der Bereiche Quantenphysik und Relativitätstheorie – aus gesehen, spricht Bachelard von einer fundamentalen Veränderung des klassischen Realitätsbegriffs im Entwicklungsprozess der Naturwissenschaften, der unseres Erachtens im Kontext didaktischer Überlegungen zum Quantenphysik-Unterricht nicht übersehen werden soll.

Im Entwicklungsprozess des wissenschaftlichen Denkens geht Bachelard nicht von einer zunehmenden Annäherung an eine “substantialistisch verstandene Realität”, sondern von einer zunehmenden Ablösung der substantialistischen Realität durch den erzeugenden Charakter der modernen Technik aus [Rötzer 1999], S. 64. In anderen Worten:

Moderne Chemie und Physik, für Bachelard vor allem die Relativitätstheorie und die Quantenphysik, sind Wissenschaften, die ohne den Einsatz von Instrumenten und Technik nicht arbeiten können. Was von Apparaten gemessen und entdeckt wird, ist technisch hergestellt. Da wissenschaftliche Theorien sich auf diese Weise objektivieren und Realität produzieren, wobei Erfahrung nur noch nachträglich als Moment der Bestätigung auftritt, spricht Bachelard in diesem Zusammenhang auch von “reifizierte Theoremen”. Für Bachelard handelt es sich dabei um eine fundamentale Veränderung des klassischen Realitätsbegriffes. [Rötzer 1999], S. 64

---

<sup>1</sup>Bunge hat eine Reihe von Werken über Wissenschaftstheorie verfaßt, und zwar über die Grundlage der Physik sowie über die allgemeine Wissenschaftstheorie. Er behauptet, daß die verschiedenen Wissenschaften eine Reihe von ontologischen Voraussetzungen teilen. Zu diesen gehören, daß die Wirklichkeit unabhängig vom menschlichen Bewußtsein existiert und daß die Natur objektiven Gesetzmäßigkeiten unterliegt. [Hügli et al. 2003], S. 108

Einerseits wird die Realität durch Einsatz von Instrumenten vorläufig und abstrakt modelliert. Andererseits werden Instrumente verbessert und präziser durch den Fortschritt wissenschaftlicher Ansätze. So ist eine dynamische Dimension zur ontologischen Dimension der Realität hinzugefügt.

Die Dialektisierung des Realitätsbegriffes durch die modernen Wissenschaften erfordert, so Bachelard, auch eine Dialektisierung der Philosophie, und zwar “ein offenes philosophisches Denken” [Bachelard 1980], S. 17, denn “der Empirismus braucht das Verstehen” und “der Rationalismus braucht die Anwendung” [Bachelard 1980], S. 20.

Ein Empirismus ohne klare, koordinierte, deduktive Gesetze kann weder gedacht noch gelehrt werden [...]. (M. Tietz & G. Schmidt in: [Bachelard 1988], S.)

[... und] der Rationalismus [hat] nur dann einen Sinn, wenn er auf die empirische Wirklichkeit angewendet wird; es handelt sich somit um komplementäre Positionen, und das wissenschaftliche Denken befindet sich in einem mittleren “epistemologischen Feld”. [Volpi 1999]

In der Auseinandersetzung zwischen Anwendung und Verstehen – d.h. in der Dialektik zwischen der Eignungsprüfung an der unmittelbaren Welt und der Erzeugung von Gedankengebäuden – bildet sich eine metaphysische Ebene, die durch eine realistische und eine rationalistische Achse aufgespannt ist.

In diesem Zusammenhang spricht Bachelard in seinem Buch “Der neue wissenschaftliche Geist” (*Le nouvel esprit scientifique*) von “realisierten Phänomenen” statt von Phänomenen, denn die geordneten Phänomene der “emanzipierten” Wissenschaften finden nur in der oben erwähnten metaphysischen Ebene statt. Sie entstehen in einem dynamischen Vorgehen, in einem “komplexen Geflecht” von Beziehungen zwischen Theorien und Praxis. Die Phänomene der “emanzipierten” Wissenschaften werden zu einer “Phänomenotechnik” [Bachelard 1988], S. 147.

Von einem didaktischen Standpunkt aus sehen wir in den Überlegungen Bachelards, insbesondere in seiner Vorstellung eines epistemologischen Feldes, das aus einer “friedlichen Verbindung zwischen Rationalismus und Realismus” entsteht [Bachelard 1988], S. 7, ein fruchtbares “Aktionsfeld” insbesondere für die Entwicklung didaktischer Vorschläge zum Quantenphysik-Unterricht aus einer epistemologischen Perspektive.

Im Rahmen der Unterrichtskonzeption, die in der vorliegenden Arbeit vorgestellt wird, wurden in Anlehnung an die Bachelard’sche Idee des “epistemologischen Feldes” vier “epistemologische Unterrichtsfelder” entwickelt, durch die ein (konstruiertes) Phänomen – die Interferenzerscheinung im Mach-Zehnder-Interferometer für einzelne Photonen – mit zunehmender Abstraktion modelliert wird.

Da wir uns in erster Linie auf die Bachelard’sche Epistemologie stützen, um das Unterrichtskonzept zu entwickeln, werden wir uns im kommenden Abschnitt weiterhin

mit Ansätzen der Epistemologie Bachelards – insbesondere mit den Begriffen “epistemologisches Hindernis”, “epistemologisches Profil” und “epistemologischer Vektor” – beschäftigen.

### 2.2.1 Epistemologische Ansätze Gaston Bachelards

Gaston Bachelard – geboren am 27. Juni 1884 in Bar-sur-Aube in der Champagne – hat sein Berufsleben als Postbeamter bei einer Arbeitszeit von 60 Stunden in der Woche begonnen. Aufgrund seiner intellektuellen Fähigkeit ist es ihm während seiner Freizeit gelungen, ein Staatsexamen in Mathematik abzuschließen. Nach dem Krieg wurde er als Physik- und Chemielehrer in Bar-sur-Aube tätig.

Die Schultätigkeit hat im Werk Bachelards, nicht zuletzt in der Bildung des wissenschaftlichen Geistes, tiefe Spuren hinterlassen: Bachelard verlor nie das Interesse an Problemen der Didaktik und wurde nicht müde, die Verzerrungen zu kritisieren, in denen die Ergebnisse der Wissenschaften in den Schulbüchern auftauchen, wo sie die Schüler eher verwirren als belehren. [Lepénies 1984], S. 11

1920 machte Bachelard sein Staatsexamen in Philosophie und 1927 promovierte er mit der wissenschaftstheoretischen Arbeit *Essai sur la connaissance approchée* bei Abel Rey und Léon Brunschvicg. 1930 wurde er Dozent für Philosophie in Dijon.

Während seiner Tätigkeit als Philosophieprofessor in Dijon (1930 bis 1940) wandte er sich verstärkt der geisteswissenschaftlichen Seite seines Denkens zu. Als neues Gebiet seiner Reflexion traten in dieser Zeit Fragen der Literatur, ihrer Schöpfung und der Möglichkeit ihres Verständnisses in sein Blickfeld. (M. Tietz & G. Schmidt in: [Bachelard 1988], S. 8)

1940 wurde Bachelard in Sorbone auf den Lehrstuhl für Wissenschaftstheorie und Wissenschaftsgeschichte berufen, zudem wurde er Direktor des Instituts für Wissenschafts- und Technikgeschichte. Diesen Lehrstuhl hatte er bis 1954 inne, und zwar bis zu seiner Emeritierung im 70. Lebensjahr.

[Bachelard ist] nicht nur der Philosoph der wissenschaftlichen Entdeckung, er ist auch der Philosoph der künstlerischen Schöpfung, Tag- und Nachtmensch zugleich, der die Bedeutung von Begriff *und* Bild, von Vernunft *und* Traum zu erkennen vermag. [Lepénies 1984], S. 21

Die komplementäre Verschränkung von Bild und Begriff wird in seinen beiden wichtigsten Büchern – *La formation de l'esprit scientifique*<sup>2</sup> (1938) und *La philosophie du Non*<sup>3</sup> (1940) – begründet. [Rötzer 1999], S. 64

<sup>2</sup>dt.: Die Bildung des wissenschaftlichen Geistes

<sup>3</sup>dt.: Die Philosophie des Nein

Die Wirkung des Werkes Bachelards ist deshalb in beiden Bereichen: Wissenschaftstheorie und Literaturkritik zu spüren [Debrulle 1983]. Auch auf die in den sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts populär gewordene Denkhaltung: “Strukturalismus” hat Bachelard Einfluss ausgeübt. Vor allem M. Foucault und L. Althusser wurden von ihm angeregt.

[Zusammen mit] Brunschvicg, Koyré und Cavaillé war Bachelard, [...] der Begründer einer neuen Orientierung in der französischen Epistemologie, die sich vom traditionellen Bild des linearevolutionären Wissenschaftsfortschrittes löst, das etwa dem Positivismus August Comtes und der neukantianischen Wissenschaftsphilosophie zugrundlegenden hatte. [Rötzer 1999], S. 63

### Epistemologischer Bruch und Epistemologisches Hindernis

[...] Bachelards Einstellung zum Induktionsproblem [ist] vorgezeichnet: ebenso wie sich die Wissenschaft durch die Distanzierung von der ursprünglichen Erfahrung formt, schreitet sie durch Negationen und Falsifikationen, nicht durch Bestätigungen fort. Hier ist, sechs Jahre vor dem Erscheinen von Karl Poppers Logik der Forschung, die Kritik des Induktivismus bereits voll ausgebildet, und wer an der Entdeckung von “Vorläufern” sein Vergnügen hat, mag darüberhinaus in der Bachelardschen Maxime des “Porquoi pas?” eine Antizipation jenes “Anything goes” sehen, mit dem Paul Feyerabend den Anarchismus in der Wissenschaftstheorie auf die Formel bringen wollte. [Lepenies 1984], S. 14

In seinem antievolutionären Ansatz wendet sich Bachelard stark gegen “jene positivistischen Auffassungen” (M. Tietz & G. Schmidt in: [Bachelard 1988], S. 9), die die Entwicklung der Erkenntnis als Ergebnis eines kontinuierlichen Prozesses annehmen. Erkennen ist nach der Bachelard’schen Auffassung nicht ohne Veränderungen des Vor-Wissens möglich. Es ist nicht nur die “Ausschaltung des Nicht-wissens”, sondern auch vielmehr die “Korrektur des bereits Gewußten”. (M. Tietz & G. Schmidt in: [Bachelard 1988], S. 10)

[...] Damit ist eine der Grundkategorien des Bachelardschen Denkens benannt, die des “Bruchs”, der sowohl die natürliche von der wissenschaftlichen Erfahrung trennt als auch den Fortgang der Wissenschaftsentwicklung bestimmt. [Lepenies 1984], S. 14

Eine *wissenschaftliche Erfahrung* ist also eine Erfahrung, die der *gewohnten Erfahrung widerspricht*. [Bachelard 1984], S. 44

Aber auch der wissenschaftliche Erkenntnisfortschritt geht nicht vom Vorgegebenen aus. Es ist kein kontinuierlicher Prozess, es verlangt Diskontinuitäten und Brüche, denn das

jeweils Neue ist nur dann adäquat zu verstehen, wenn die vorausgehenden Erkenntnisstrukturen fundamental geändert werden. [Bachelard 1980], S. 9

Bachelard hebt in diesem Zusammenhang die Begriffe “epistemologischer Bruch” (*rupture épistémologique*) und ”epistemologisches Hindernis” (*obstacle épistémologique*) hervor.

[Bachelards] Theorie der Brüche, deren erster von epochaler Bedeutung in der neuzeitlichen Mathematisierung der Erkenntnis bestand, läßt die Konturen einer Wissenschaftsgeschichte ausbilden, welche die vielfältige Vergangenheit der Wissenschaften in einem “Museum der Irrtümer” sammelt. Jede neue Erkenntnis erfordert die Umschreibung der Vergangenheit, was allererst voraussetzt, die Irrtümer, Abwegigkeiten, Erkenntnishindernisse und Verführbarkeit des Denkens zu erfassen. [Rötzer 1999], S. 66

Die “Ursachen für Stagnation und sogar Regression”, die die Entwicklung des wissenschaftlichen Denkens entgegengesetzt, kennzeichnet Bachelard mit Hilfe des Begriffes “epistemologisches Hindernis”. Dabei handelt es sich im Bachelard’schen Werke

nicht um eine Betrachtung äußerer Hindernisse wie die Komplexität und Flüchtigkeit der Erscheinungen, auch nicht um eine Klage über die Schwäche der Sinne und des menschlichen Geistes. [Bachelard 1984], S. 46

sondern um objektive Faktoren – wie beispielsweise experimentelle Beschränkungen oder Mangel an geeigneten Instrumenten. Objektive Faktoren sind dennoch am häufigsten nicht streng objektiv, denn sie sind in der Regel der wissenschaftlichen Gemeinschaft nicht bewusst. Erst nach der Überwindung lassen sich die epistemologischen Hindernisse bewusst machen.

An diesem Punkt spürt man in der Bachelard’schen Auffassung, in der die Diskontinuität im Fortgang der Wissenschaftsentwicklung als entscheidendes Merkmal herausgearbeitet wird, auch Ansätze der Auffassung von T. Kuhn, die erst zwei Jahrzehnte später in seinem Buch “Struktur der wissenschaftlicher Revolutionen” erschienen.

In “Die Bildung des wissenschaftlichen Geistes” (*La formation de l’esprit scientifique*) geht Bachelard von unterschiedlichen Beispielen aus der vorwissenschaftlichen und der wissenschaftlichen Literatur im Bereich der Physik und der Chemie aus, um zu zeigen, dass die wissenschaftliche Entwicklungslinie sich in “drei große Perioden” unterscheiden lässt:

- Die erste Periode umfasst die klassische Antike, die Renaissance bis zum Anfang der klassischen Wissenschaft des 16. und 17. Jahrhunderts und auch das 18. Jahrhundert, wobei der “vorwissenschaftliche Zustand” dominiert.

- Die zweite Periode, vom Anfang des 18. Jahrhunderts bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts, kennzeichnet den “wissenschaftlichen Zustand”.
- Die dritte Periode, die 1905 mit der Entstehung der Einsteinsche Relativitätstheorie beginnt, entspricht dem “neuen wissenschaftlichen Geist”.

Die “Bildung des wissenschaftlichen Geistes” entwickelt sich durch die Überwindung epistemologischer Hindernisse, die Bachelard an zahlreichen Beispielen aus Episoden der Physik– und der Chemieggeschichte erläutert. Die “grundlegenden Hindernisse” sind beispielsweise die ersten Erfahrungen und die Verallgemeinerung,

oder genauer gesagt, die erste Beobachtung ist immer ein erstes Hindernis für die wissenschaftliche Bildung. In der Tat bietet sich diese erste Beobachtung mit einer Fülle von Bildern dar; sie ist malerisch, konkret, natürlich, einfach. Man braucht sie nur zu beschreiben und zu staunen. Schon glaubt man sie zu verstehen. [Bachelard 1984], S. 54

Und nachdem “der Zauber der einzelnen und farbigen Beobachtung” sich beschreiben lässt, besteht die Gefahr, den

Verallgemeinerungen des ersten Blicks zu folgen, denn [...] wir verallgemeinern, was wir zuerst bemerken. [Bachelard 1984], S. 54

Andere Hindernisse entstehen durch die “sprachlichen Hindernisse”, insbesondere durch die Anwendung von “Metaphern”. Bachelard zeigt beispielsweise, wie Reamur (1731 in den *Mémoires de l'Académie royale des Sciences*) sich auf die Metapher des Schwammes bezieht, um zu erklären, “warum die Luft sich durch Gewicht beträchtlich komprimieren lässt, und warum sie sich in einem so extremen Maße ausdehnen und mit einem Volumen erscheinen kann, welches das erwartete beträchtlich übersteigt”; und wie die Abkühlung eines heißen Körpers, der in Luft oder Wasser getaucht wird, auch in Verbindung mit der Metapher des Schwammes betrachtet wird:

Hier wirken Luft und Wasser nicht anders als Schwämme; denn ein Körper kühlt einen anderen nur ab, indem er die feurige Flüssigkeit, die daraus entweicht, absorbiert. (Marat in: [Bachelard 1984], S. 131)

[...] Man bringt eine Erscheinung zum Ausdruck und glaubt, sie damit zu erklären. Man erkennt sie wieder und glaubt, sie damit zu erkennen. In den mit dem Wort *Schwamm* bezeichneten Phänomenen läßt sich der Geist indessen nicht von der Kraft einer Substanz blenden. Die Funktion des *Schwammes* ist von einer so klaren und deutlichen Evidenz, dass man kein Bedürfnis verspürt, es zu erklären. Wenn man Erscheinungen mit dem Ausdruck Schwamm erklärt, wird man nicht

den Eindruck haben, einem obskuren Substantialismus anzuhängen; und man wird ebensowenig den Eindruck haben, *Theorien* aufzustellen, denn diese Funktion ist völlig erfahrungsorientiert. Dem Schwamm entspricht als ein Denkmittel des naiven Empirismus. [Bachelard 1984], S. 127

Andere Kategorien von Hindernissen: Die “einheitlichen Erkenntnishindernisse” entstehen durch die Tendenz, generelle Prinzipien oder Gesetze der Natur – eine einzige Weltordnung – anzunehmen. Bachelard zeigt in diesem Zusammenhang, wie zum Beispiel die im 18. Jahrhundert herrschende Idee einer homogenen und harmonischen Natur ein Erkenntnishindernis darstellt und wie der Glaube an die harmonische Einheit der Welt zu einer *Überdeterminierung* führt. [Bachelard 1984], S. 147

Bachelard sammelt an vielen Beispielen wissenschaftlicher Episoden unterschiedliche Hindernisse, die sich gegen die Entwicklung des wissenschaftlichen Denkens herausbilden und die vor allem aus der unmittelbaren Anschaulichkeit der sinnlichen Erfahrungen, aus der Suche nach Allgemeinheit und Einfachheit und aus der Verwendung bestimmter Begriffe und Bilder entstehen. Auf diese Weise verknüpft er

[...] derart wissenschaftstheoretische mit wissenschaftshistorischen Analysen: darin liegt vor allem die Originalität seiner Epistemologie, [...]. Wenn heute von “Wissenschaftsforschung” die Rede ist, um einen Forschungsbereich zu kennzeichnen, in dem Wissenschaftstheorie, Wissenschaftsgeschichte und Wissenschaftssoziologie miteinander verbunden werden, so sollte man nicht vergessen, daß Bachelard eine solche Kombination der Fragestellung bereits vor fünfzig Jahren praktiziert hat. [Lepenes 1984], S. 18

### Epistemologisches Profil

Im Buch “Die Philosophie des Nein” (*La Philosophie du Non*), das einen Höhepunkt seines epistemologischen Werkes darstellt, setzt Bachelard seine Überlegungen zur “Bildung des wissenschaftlichen Geistes” fort, wobei er die dort dargestellten drei Stadien im wissenschaftlichen Entwicklungsprozess weiter in anderen philosophischen Orientierungen differenziert. In diesem Buch deutet Bachelard an,

[...] daß der von ihm so genannte epistemologische Bruch kein totaler ist [...]. In der jeweils fortgeschrittenen Erkenntnisform sind vielmehr Reste der früheren Stufen, d.h. der überwundenen epistemologischen Hindernisse, erhalten, die – bei jedem Individuum anders ausgeprägt – ein “epistemologisches Profil” ergeben. [Bachelard 1980], S. 11

Bachelard vertritt also einen Pluralismus in der Philosophie, in dem die Erkenntnis eines partikulären Begriffes auf mehrere philosophische Orientierungen aufgefächert

werden muss. Für den Begriff Masse stellt Bachelard als Beispiel seiner Überlegungen sein eigenes epistemologisches Profil dar. Bachelard berichtet:

Wenn wir uns selbst befragen, stellen wir fest, daß die fünf von uns in Betracht gezogenen Philosophien (naiver Realismus – klarer und positivistischer Empirismus – Newtonscher oder Kantscher Rationalismus – vollständiger Rationalismus – dialektischer Rationalismus) unsere verschiedenen persönlichen Verwendungen des Massebegriffes nach verschiedenen Richtungen orientieren. Wir wollen versuchen, ihre relative Bedeutung dadurch grob herauszustellen, daß wir aufeinander folgenden Philosophien auf der Abszisse eintragen und als Ordinaten einen Wert, der – falls er exakt sein könnte – die effektive Häufigkeit unseres Gebrauchs des betreffenden Begriffs, die relative Bedeutung unserer Überzeugungen messen würde. [Bachelard 1980], S. 56 – 57

In dem Zitat, das im Folgenden wiedergegeben wird, lassen sich die philosophischen Positionen, so wie sie im epistemologischen Profil von Bachelard angeordnet sind, am Beispiel des Massebegriffs nacheinander erkennen.

Der Begriff der Masse etwa, der zunächst animistisch oder psychologisch verstanden wird,	<b>Naiver Realismus</b>
entwickelt sich mit Hilfe von rudimentären quantitativen Begriffen zum Realismus mit einer instrumentellen und empiristischen Konzeption (Gebrauch der Waage)	<b>Klarer und positivistischer Empirismus</b>
und erreicht mit der Erfindung der Newtonschen Mechanik (wo er korrektiv zu den Begriffen der Kraft und der Beschleunigung definiert wird) die Ebene des Rationalismus.	<b>Klassischer Rationalismus der rationalen Mechanik</b>
Dieser ist jedoch wiederum in sich vielgestaltig, denn auf den klassischen Rationalismus folgen mit der Einsteinschen Relativitätstheorie ein “kompletter Rationalismus”, der die Unangemessenheit des einfachen Begriffs der Masse erkennt (es gibt keine absolute, von Zeit und Raum unabhängige Masse, denn Masse ist eine Funktion der Geschwindigkeit)	<b>Vollständiger Rationalismus (Relativität)</b>
und schließlich ein “diskursiver Rationalismus” (oder “Sur-rationalismus”), der mit der Quantenmechanik Diracs – im Gegensatz zu jeder Theorie der Anschauung –, eine “negative Masse” postuliert. [Volpi 1999], S. 126	<b>Diskursiver Rationalismus</b>



### Epistemologischer Vektor

Durch die Darstellung eines epistemologischen Profils stellt Bachelard dann ein eindeutiges Prinzip zur Abstufung philosophischer Orientierungen auf:

Es käme keinem Philosophen in den Sinn zu sagen, Leibniz sei “fortschrittlicher” als Descartes, oder Kant als Plato. Aber die Richtung der philosophischen Entwicklung der wissenschaftlichen Begriffe ist so eindeutig, daß man nur schließen kann, daß die wissenschaftliche Erkenntnis das Denken bestimmt, daß die Wissenschaft die Philosophie selbst bestimmt. Das wissenschaftliche Denken liefert also ein Prinzip zur Klassifizierung der Philosophien und zum Studium des Fortschritts der Vernunft. [Bachelard 1980], S. 34

Bachelard weist allerdings darauf hin, dass nicht alle wissenschaftlichen Begriffe “die gleiche Kraft zur Streuung” [Bachelard 1980], S. 64, wie beispielsweise die Begriffe Masse und Energie, haben. Trotzdem geht er davon aus, dass die Achse: Realismus – Empirismus – Rationalismus, auf der

[...] die bei der Analyse epistemologischer Profile grundlegenden Philosophien angeordnet [sind], [...] einer regelmäßigen Entwicklung der Erkenntnisse entspricht. [...] Es handelt sich um eine genetische Ordnung. [Bachelard 1980], S. 62

### Seine Schlussfolgerung

[...] ist eindeutig: eine Philosophie der Wissenschaften ist selbst dann, wenn man sie auf die Prüfung einer partikulären Wissenschaft beschränkt, notwendigerweise eine gestreute Philosophie. Dennoch besitzt sie einen Zusammenhalt: den ihrer Dialektik, ihres Fortschritts. Jeder Fortschritt in der Philosophie der Wissenschaften erfolgt in Richtung auf den zunehmenden Rationalismus; dabei wird im Zusammenhang mit allen Begriffen der anfängliche Realismus ausgeräumt. [Bachelard 1980], S. 65

Den Leitfaden seiner Analyse fasst Bachelard in überzeugender Weise – unserer Meinung nach – mit Hilfe des Begriffes Vektor zusammen.

Zumindest die Richtung des metaphysischen *Vektors* ist [...] klar erkennbar. Er weist ohne Zweifel vom Rationalen zum Realen und keineswegs in die entgegengesetzte Richtung, wie es alle Philosophen von Aristoteles bis Bacon behauptet haben. [Bachelard 1988], S. 10

Im Folgenden werden wir die epistemologischen Überlegungen Bachelards durch eine didaktische Adaptation in eine Unterrichtskonzeption zum Quantenphysik-Unterricht umsetzen. Dazu finden wir insbesondere in der Bachelard'schen Idee des epistemologischen Vektors das Maß für die Entwicklung eines Unterrichtsvorschlags zum Quantenphysik-Unterricht mit Einbeziehung epistemologischer Überlegungen.

### 2.2.2 Didaktische Adaptation der Epistemologie Bachelards

Wie in den vorigen Abschnitten bereits erwähnt, wird im Werk Bachelards die Richtung des wissenschaftlichen Fortgangs vom Realismus zum Rationalismus besonders herausgestellt.

Dieses Merkmal der Epistemologie Bachelards wird vor allem durch seine Idee des epistemologischen Vektors verdeutlicht. Der epistemologische Vektor Bachelards bestimmt nicht nur eine Linie im wissenschaftlichen Erkenntnisprozess, sondern dient auch als Prinzip zur Abstufung der philosophischen Orientierungen vom Naiven Realismus bis zum Diskursiven Rationalismus (s. beispielsweise das konzeptuelle Profil Bachelards für den Massebegriff im Abschnitt 2.2.1).

In Anlehnung an die dargestellten philosophischen Positionen haben wir durch eine didaktische Bearbeitung vier Unterrichtsfelder gebildet, in denen die Lichtausbreitung in einem Mach-Zehnder-Interferometer im Unterricht mit zunehmender Abstraktion betrachtet wird.

In der Abbildung 2.2 auf Seite 31 (oben) erkennt man die philosophischen Positionen Bachelards wieder. Sie sind im einzelnen: Naiver Realismus, Positivistischer Empirismus, Klassischer Rationalismus und Vollständiger & Diskursiver Rationalismus. Mit Hilfe der Darstellung lässt sich beobachten, dass die philosophischen Positionen nacheinander entsprechend der Entwicklung des epistemologischen Vektors in Richtung Rationalismus angeordnet werden.

Im Rahmen der vorliegenden Unterrichtskonzeption wird der epistemologische Vektor – in Anlehnung an das Bachelard'sche epistemologische Profil – in einem metaphysischen Raum, der durch eine theoretische Basis und eine empirische Basis aufgespannt ist, dargestellt.

So wie die philosophischen Positionen werden auch die Unterrichtsfelder nacheinander entsprechend der Drehung des epistemologischen Vektors in Richtung der theoretischen Basis angeordnet (s. Abbildung 2.2, unten): Konkreter Umgang, Zielgerichtete Beobachtung, Idealisierung und Rationale Rekonstruktion. Die Unterrichtsfelder sind deshalb als epistemologische Unterrichtsfelder gekennzeichnet.

Mit Hilfe der Darstellung der epistemologischen Unterrichtsfelder in der Abbildung 2.2 erkennt man beispielsweise, dass der epistemologische Vektor im ersten Unterrichts-

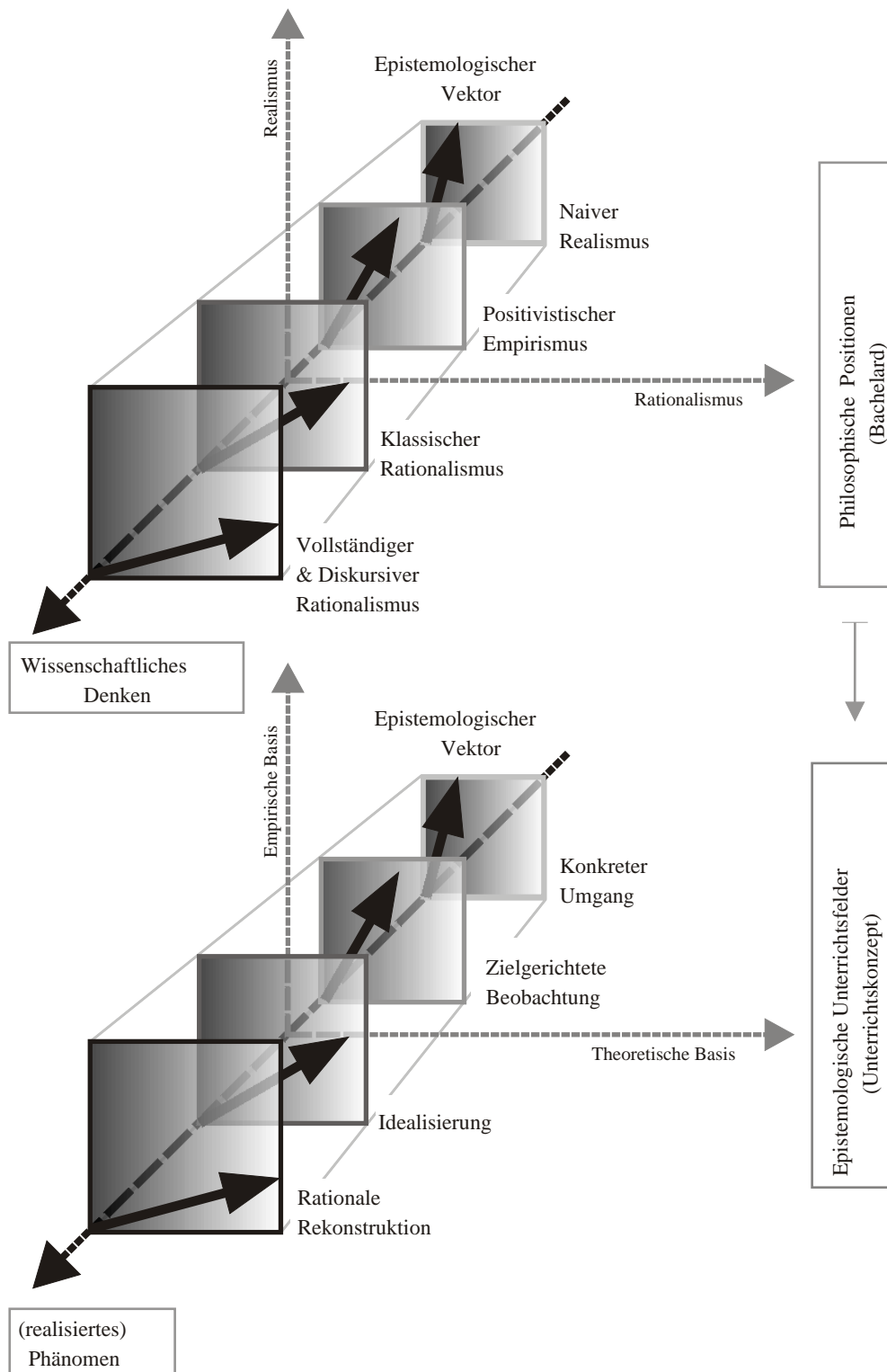


Abbildung 2.2: Die didaktische Adaptation des Epistemologischen Vektors

feld “Konkreter Umgang” eine große Komponente in Richtung der empirischen Basis und nur eine kleine Komponente in Richtung der theoretischen Basis besitzt. Im Gegensatz dazu besitzt der epistemologische Vektor im vierten Unterrichtsfeld “Rationale Rekonstruktion” eine große Komponente in Richtung der theoretischen Basis und eine kleine Komponente in Richtung der empirischen Basis. Die längere Komponente des Vektors in Richtung der empirischen Basis bedeutet, dass die Erkenntnis ihren Ursprung in der Anwendung hat. Dagegen geht die Erkenntnis im Unterrichtsfeld “Rationale Rekonstruktion” von der Theorie aus, woraus dann Anwendungen abgeleitet werden.

Im folgenden Abschnitt werden die epistemologischen Unterrichtsfelder am konkreten Beispiel der Unterrichtseinheit: Die Lichtausbreitung im Mach-Zehnder-Interferometer näher erläutert.

### 2.3 Lichtausbreitung im Mach-Zehnder-Interferometer: Ein Unterrichtsvorschlag

Als Zielsetzung des Unterrichtskonzepts *Lichtausbreitung im Mach-Zehnder-Interferometer* setzen wir fest, das Verhalten von Photonen im Hinblick auf die Teilchen- und Wellenbeschreibungen zum Gegenstand von Erörterungen zu machen. Dazu wird die Lichtausbreitung im Mach-Zehnder-Interferometer (MZ-Interferometer) in der durch die vier oben erwähnten epistemologischen Unterrichtsfelder mit vorgezeichneter Abstraktionszunahme berücksichtigt. Konkret bedeutet dies folgendes:

1. Die Schüler sollen die experimentelle Anordnung eines Mach-Zehnder-Interferometers kennenlernen und mit den optischen Komponenten des Interferometers (d.h. mit Laserquellen, Linsen, Spiegeln und halbdurchlässigen Spiegeln) experimentieren;
2. Sie sollen das Mach-Zehnder-Interferometer justieren, sodass Interferenzmuster auf den Schirmen des Interferometers beobachtet werden;
3. Sie sollen das reale Mach-Zehnder-Interferometer in ein idealisiertes Interferometer (z.B. ohne Berücksichtigung experimenteller Störungen) umwandeln und das Verhalten des Lichts im Interferometer im Wellenbild modellieren;
4. Sie sollen das Mach-Zehnder-Interferometer für “normale” Lichtintensität in ein Mach-Zehnder-Interferometer für stark reduzierte Lichtintensität (d.h. Interferometer für einzelne Photonen) umwandeln und das seltsame Verhalten von Photonen im Interferometer mit Bezug auf die Begriffe Teilchen bzw. Wellen (entsprechend der Weginformation bzw. Interferenzerscheinung) betrachten.

Auf diese Weise wird die Lichtausbreitung im Interferometer aus einer epistemologischen Perspektive bzw. aus der Perspektive unterschiedlicher philosophischer Orientierungen (Realismus, Empirismus, Rationalismus, etc.) im Unterricht untersucht.

In der Abbildung 2.3 werden die epistemologischen Unterrichtsfelder vorgestellt. Sie entsprechen den in der Abbildung zur Seite gestellten philosophischen Positionen, die das Beispiel "Masse" aus der Beschreibung des konzeptuellen Profils Bachelards (s. Seite 28) übernehmen.

Die epistemologischen Unterrichtsfelder umfassen jeweils die in den folgenden Abschnitten beschriebenen Unterrichtsstoffe:

### **1. Epistemologisches Unterrichtsfeld: Konkreter Umgang**

Im Unterrichtsfeld "Konkreter Umgang" werden sowohl die optischen Komponenten eines Mach-Zehnder-Interferometers (Laserquelle, Spiegel, Linsen und halbdurchlässige Spiegel) im einzelnen als auch die experimentelle Anordnung des Interferometers im ganzen vorgestellt. Die wichtigen zu berücksichtigenden Punkte des Unterrichts innerhalb dieses Unterrichtsfelds sind: Das Verhalten des Lichts (Lichtbündels) in Wechselwirkung mit den optischen Komponenten des Interferometers zu beobachten, einige Schlussfolgerungen über das Verhalten des Lichts zu ziehen (z. B. geradlinige Ausbreitung, Reflexions- bzw. Brechungsgesetz) und das Interferometer aufzubauen.

Der Substanzstatus des Lichts steht an dieser Stelle nicht zur Diskussion. Licht ist etwas, das beispielsweise vom Spiegel reflektiert wird. In anderer Sichtweise ist der Spiegel etwas, was Licht reflektiert. Auf diese Weise besitzen sowohl das Licht als auch der Spiegel einen Substanzstatus und als Substanzen besitzen sie gewisse Eigenschaften. Eine objektive Wirklichkeit der Substanzen wird nicht in Frage gestellt und existiert unabhängig von empirischen Bestimmbarkeiten.

Man erkennt, dass die größte Komponente des epistemologischen Vektors in diesem Unterrichtsfeld in Richtung der empirischen Basis zeigt (s. Abbildung 2.2). Diese längere Komponente des Vektors deutet an, dass die Erkenntnis ihren Ursprung in der Anwendung hat.

### **2. Epistemologisches Unterrichtsfeld: Zielgerichtete Beobachtung**

Der Schwerpunkt des Unterrichts im Unterrichtsfeld "Zielgerichtete Beobachtung" liegt darin, das Mach-Zehnder-Interferometer zu justieren.

Die Justierung des Interferometers ist allerdings keine elementare Aufgabe. Die Schwierigkeiten liegen in der Geometrie des Mach-Zehnder-Interferometers (s. die Darstellung des Mach-Zehnder-Interferometers in der Abb. 2.5 auf Seite 40). Beim Ver-

Philosophische Positionen: Massenbegriff	Epistemologische Unterrichtsfelder: Lichtausbreitung im Mach-Zehnder-Interferometer
<p>■ <b>Naiver Realismus</b></p> <p>In ihrer ersten Form entspricht die Vorstellung von Masse einer groben quantitativen Einschätzung der Wirklichkeit.</p>	<p>■ <b>Konkreter Umgang: Aufbau des Interferometers</b></p> <p>In ihrer ersten Form entspricht die Vorstellung von Licht einer groben Substanz: Licht (Lichtbündel) ist z.B. etwas, das durch den Spiegel reflektiert wird, und der Spiegel ist etwas, das das Licht reflektiert. Sowohl das Licht als auch der Spiegel besitzen also einen Substanzstatus.</p>
<p>■ <b>Positivistischer Empirismus</b></p> <p>Die unmittelbare Wirklichkeit wird durch die Benutzung eines Messinstrumentes (Gebrauch der Waage) erweitert.</p>	<p>■ <b>Zielgerichtete Beobachtung: Justierung des Interferometers</b></p> <p>Die unmittelbare Wirklichkeit wird durch die Benutzung eines Messinstrumentes (eines justierten Interferometers) übersritten: Licht plus Licht führt dann zur Dunkelheit (Interferenzerscheinung). Die Interferenzerscheinung wird durch ein propädeutisches Wellenmodell betrachtet.</p>
<p>■ <b>Klassischer Rationalismus</b></p> <p>Der Begriff Masse bildet sich in einem Geflecht von rationalen Beziehungen: Die Masse eines Körpers wird mit weiteren Größen wie Kraft und Beschleunigung verknüpft.</p>	<p>■ <b>Idealisierung: Ideales Interferometer</b></p> <p>Der Begriff Licht wird in einem Geflecht von Beziehungen betrachtet. Im idealisierten Interferometer ist das Verhalten des Lichts durch bestimmte physikalische Gesetze beschrieben: Die konstruktive bzw. destruktive Überlagerungen der Teilstrahlen werden beispielsweise nur auf der optischen Achse des Interferometers betrachtet.</p>
<p>■ <b>Vollständiger / Diskursiver Rationalismus</b></p> <p>Der Begriff Masse bildet sich in einem Geflecht von rationalen komplexen Beziehungen, die die klassischen Beziehungen überschreiten: Die Relativitätstheorie Einsteins, in der die Masse eines Körpers von der Geschwindigkeit dieses Körpers abhängt, ist dafür ein Beispiel. An dieser Stelle löst sich der Massenbegriff völlig von der Vorstellung einer gewissen Stoffmenge.</p>	<p>■ <b>Rationale Rekonstruktion: Interferometer für Photonen</b></p> <p>Der Begriff Photon bildet sich in einem Geflecht von Modellen (Teilchen- bzw. Wellenmodell) aus. Das überschreitet das klassische Weltbild. Die Komplementarität zwischen Weginformation (Teilchenbeschreibung) und Interferenzerscheinung (Wellenbeschreibung) ist dafür ein Beispiel. An dieser Stelle löst sich der Lichtbegriff völlig von der Vorstellung einer Substanz.</p>

Abbildung 2.3: Die didaktische Adaptation der Epistemologie Bachelards

gleich eines Mach-Zehnder-Interferometers mit beispielsweise einem Michelson-Interferometer, das nur einen halbdurchlässigen Spiegel enthält (mehr Details im Kap. 3, Abschnitt 3.2), erkennt man, dass die experimentelle Anordnung eines Mach-Zehnder-Interferometers statt eines halbdurchlässigen Spiegels zwei parallele halbdurchlässige Spiegel enthält, was einerseits die Justierung des Interferometers erschwert, andererseits die Verwendung des Interferometers aus didaktischer Perspektive bereichert, da der einfallende Strahl und die ausgehenden Teilstrahlen getrennte Wege durchlaufen.

Außerdem gelingt die Justierung des Interferometers erst, wenn man vorher das Wellenmodell akzeptiert hat. Dann kann man auch Interferenzmuster erwarten. Wenn sie erscheinen, ist das ein Zeichen dafür, dass das Interferometer richtig justiert ist. Das heißt: Der Gebrauch des Interferometers ist bereits theoriegeleitet. Im Vergleich zum Unterrichtsfeld “Konkreter Umgang” ist zu erkennen, dass im Unterrichtsfeld “Zielgerichtete Beobachtung” die Komponente des Vektors in Richtung der empirischen Basis kürzer geworden ist (s. die Darstellung des epistemologischen Vektors in der Abbildung 2.2).

### **3. Epistemologisches Unterrichtsfeld: Die Idealisierung**

Im Unterrichtsfeld Idealisierung wird das reale Interferometer in ein ideales Interferometer verwandelt (s. Darstellung des idealisierten Interferometers in der Abb. 2.5, S. 40). Idealisierung bedeutet hier, dass das Phänomen nach bestimmten Regeln beschrieben werden muss. Dies bedeutet beispielsweise folgendes:

- Das Interferometer ist genau justiert (d.h. beispielsweise, dass die beiden Spiegel bzw. die beiden halbdurchlässigen Spiegel jeweils zueinander parallel gestellt werden).
- Experimentelle Störungen wie zum Beispiel Fehler in den optischen Komponenten des Interferometers werden vernachlässigt.
- Die Lichtwellen werden nur auf den optischen Achsen des Interferometers betrachtet.

Das idealisierte Phänomen ist deshalb nicht auf die gleiche Weise real wie das beobachtete Phänomen. Das idealisierte Phänomen “verkörpert” bereits Theorien. Die Komponente des epistemologischen Vektors ist an dieser Stelle größer in Richtung der theoretischen Basis als in Richtung der empirischen Basis.

### **4. Epistemologisches Unterrichtsfeld: Rationale Rekonstruktion**

Im epistemologischen Unterrichtsfeld Rationale Rekonstruktion wird das Phänomen zu einem theoretischen Konstrukt.

Die Leitidee in diesem Unterrichtsfeld ist folgende: Die Lichtintensität wird so stark reduziert, dass sich zu jeder Zeit nur ein einzelnes Photon im Interferometer befindet. Das Interferometer mit einzelnen Photonen wird allerdings nur als Gedankenexperiment im Unterricht betrachtet und das zu beobachtende Phänomen – d.h. die Erscheinung eines Interferenzbilds aus einzelnen Photonen – wird nur durch Analogie zum “bereits bekannten Phänomen” (d.h. Interferometer mit “normaler” Lichtintensität) erschlossen.

Eine zentrale Frage, die im Unterricht gestellt wird, ist die, ob man Weginformation (Ortsmessung an einem Photon) und Interferenzbild gleichzeitig bekommen kann. Die Thematik Komplementarität zwischen Weginformation und Interferenzbild lässt sich mit Hilfe von Variationen in der experimentellen Anordnung eines (idealisierten) Mach-Zehnder-Interferometers gut darstellen und analysieren (s. beispielsweise einige Variationen im Mach-Zehnder-Interferometer in den Darstellungen in der Abb. 2.4).

Die Quantenstruktur des Lichts wird also in einem Geflecht von Modellen: Teilchen- und Wellenmodell gebildet. Dennoch wird nicht nur von Teilchen und Wellen gesprochen, sondern von Phänomenen, denn ohne Auswahl des Phänomens (Weginformation oder Interferenzerscheinung) lässt sich das Photon nicht definieren.

Man erkennt also, dass ein wohldefinierter Substanzstatus des Lichts an dieser Stelle zur Diskussion steht, denn das Photon ist auch von seiner empirischen Bestimmtheit, d.h. vom Beobachtungskontext abhängig. Dies bedeutet jedoch nicht, dass das Photon nur in unserem Bewusstsein existiert. Wir machen alle in derselben Situation dieselben Beobachtungen.

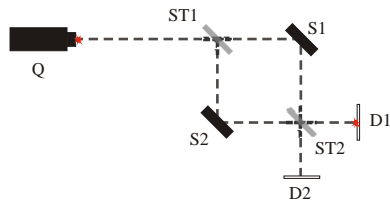
Das heißt, das Individuum, die individuelle Beobachtung, ist offenbar nicht wichtig. [Zeilinger 2003], S. 215

Im Unterricht werden die vier im Folgenden aufgelisteten Interpretationen für das Verhalten von Photonen im Mach-Zehnder-Interferometer erörtert. Diese Interpretationen wurden didaktisch bearbeitet, damit die Schüler einen Überblick über einige repräsentative Interpretationen der Quantentheorie gewinnen können (die detaillierte Vorstellung der Interpretationen findet man im Kap. 3 Abschnitt 3.4.1). Sie sind im einzelnen:

- Interpretation mit Wellencharakter
- Interpretation mit Korpuskularcharakter
- Dualistisch-Realistische Interpretation
- Dualistisch-Positivistische Interpretation



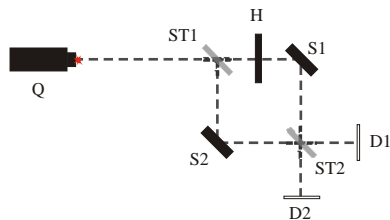
Das Mach-Zehnder-Interferometer



Q: Lichtquelle / Photonenquelle  
ST1; ST2: halbdurchlässige Spiegel  
S1; S2: Spiegel  
D1; D2: Detektoren

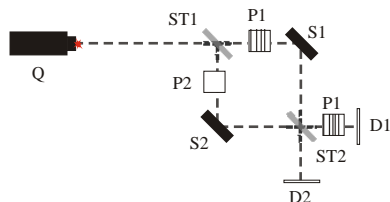
Der Weg des Photons im Interferometer ist unbekannt. Dafür weiß man, dass der Detektor D1 das Photon mit der Wahrscheinlichkeit von 100% nachweisen wird (Interferenzerscheinung).

Variationen im Mach-Zehnder-Interferometer



H: Hindernis

Der Weg des Photons im Interferometer ist bekannt. Dafür weiß man nicht, welcher Detektor das Photon nachweisen wird. Jeder Detektor (D1 und D2) wird das Photon mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% nachweisen (Weginformation).



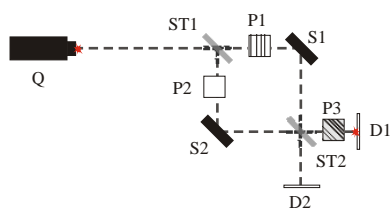
P1: Polarisator



P2: Polarisator



Jeder Detektor (D1 und D2) wird das Photon mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% nachweisen (Weginformation).



P1: Polarisator



P2: Polarisator



P3: Polarisator



Der Weg des Photons im Interferometer ist unbekannt. Dafür weiß man, dass der Detektor D1 das Photon mit der Wahrscheinlichkeit von 100% nachweisen wird (Interferenzerscheinung).

Abbildung 2.4: Variationen im Mach-Zehnder-Interferometer

## Bemerkungen

In der Abbildung 2.5 auf Seite 40 sind die vier epistemologischen Unterrichtsfelder im Hinblick auf den Modellierungsprozess des Mach-Zehnder-Interferometers noch einmal vorgestellt. In den Darstellungen sind sowohl die experimentelle Anordnung des Mach-Zehnder-Interferometers als auch die Schirnbilder zu erkennen.

*Konkreter Umgang:* Das Verhalten des Lichts wird erst beim Zusammentreffen mit Spiegeln und Strahlteilern beobachtet. Das Licht breitet sich geradlinig aus. Auf den Schirmen bildet das einfallende Licht einen hellen (fast homogenen) Fleck. Auf diese Weise kann man sich das Lichtbündel quasi als einen "Teilchenstrom" vorstellen.

*Zielgerichtete Beobachtung:* Das Interferometer wird aufgebaut und justiert und die Wellennatur des Lichts (Interferenzerscheinung) wird festgestellt: Licht plus Licht führt zur Dunkelheit! Einerseits geht man davon aus, dass das Licht einen Wellencharakter besitzt, um das Interferometer zu justieren; andererseits benutzt man das Interferometer, um die Wellennatur des Lichts festzustellen.

*Idealisierung:* Um das Verhalten des Lichts im Interferometer zu verstehen, wird das ganze Phänomen modelliert. D.h. das reale Phänomen wird "vereinfacht". Im Interferometer werden experimentelle Störungen unberücksichtigt gelassen und die Lichtstrahlen werden nur auf den optischen Wegen des Interferometers betrachtet. Das Abstraktionsniveau nimmt zu. In der idealisierten Situation kommen die Teilstrahlen zur konstruktiven Überlagerung auf einem Schirm (heller Punkt) und zur destruktiven Überlagerung auf einem anderen Schirm des Interferometers (kein heller Punkt).

*Rationale Rekonstruktion:* Im idealisierten Interferometer wird eine ganz winzige Lichtquelle genommen und die Lichtintensität lässt sich so stark reduzieren, dass in jeder Zeit nur ein einzelnes Photon das Interferometer durchläuft. In dieser Situation wird das Photon mit 100%iger Wahrscheinlichkeit auf dem mittleren Punkt eines Schirms des Interferometers registriert (Ausgang nach rechts). Auf dem anderen Schirm (Ausgang nach unten) wird wegen der destruktiven Interferenz dagegen kein Photon registriert. Dies bedeutet, dass es verbotene Regionen für die Photonen gibt, wie im Fall der Erscheinung von Interferenzmustern auf den Schirmen des Interferometers.

Woher weiß das Photon, dass es das Interferometer nur am Ausgang nach rechts verlassen darf und nicht nach unten?

Hierbei ergibt sich die Frage: Welchen Weg hat das Photon genommen? In dem Moment, wo wir das Photon an einem bestimmten Weg im Interferometer nachweisen, verschwindet die Interferenz, d.h. das Photon wird mit gleicher Wahrscheinlichkeit auf beiden Schirmen registriert.

Richard Feynman hat einmal geschrieben: "Da schlägt das Herz der Quantenmechanik", denn selbst wenn man erklären kann, wie das Interferometer funktioniert, ver-

schwindet das Mysterium des Photons nicht. Die Eigenschaften des Photons lassen sich nicht unabhängig von einer Beobachtungs- bzw. Messmöglichkeit beantworten. Beobachtungs- bzw. Messmöglichkeit bedeutet nichts anderes “als Information, die in Form von Antworten auf Fragen formuliert werden kann.” [Zeilinger 2003], S. 214

An dieser Stelle erinnern wir noch einmal an die Worte Bachelards, um die Prämisse der vorgestellten Unterrichtskonzeption zusammenzufassen, denn hier geht es vor allem darum, die Frage zu formulieren, d.h. das Problem zu verstehen.

Und im wissenschaftlichen Leben stellen sich die Fragen gewiß nicht von selbst. Gerade dieses *Problembewußtsein* kennzeichnet den wirklichen wissenschaftlichen Geist. Für einen wissenschaftlichen Geist ist jede Erkenntnis die Antwort auf eine Frage. Hat es keine Frage gegeben, kann es auch keine wissenschaftliche Erkenntnis geben. [Bachelard 1984], S. 47

Das Mach-Zehnder-Interferometer

**Aufbau des Interferometers**  
 Licht ist etwas, das vom Spiegel reflektiert wird. In anderer Sichtweise ist der Spiegel etwas, was das Licht reflektiert.  
 Auf diese Weise besitzen sowohl das Licht als auch der Spiegel einen Substanzstatus. Als Substanzen lassen sie sich manipulieren. Die Schüler sollen einerseits mit realen Objekten: Lichtquelle, Spiegel, usw. und andererseits mit modellierten Objekten: Lichtbündel "experimentieren".

**Justierung des Interferometers**  
 Das Licht wird in Verbindung mit einem Instrument, dem Interferometer, betrachtet. Licht plus Licht führt zur Dunkelheit!  
 Die Beobachtung des erwünschten Phänomens - der Interferenzerscheinung - wird jedoch nur im justierten Interferometer geschafft. Die Beschreibung des Phänomens wird konsistent erst durch die Annahme des Wellenmodells für das Licht.

**Idealisierung des Interferometers**  
 Das reale Phänomen wird in ein ideales Phänomen verwandelt.  
 Das Licht wird im "schematisierten und idealisierten" Interferometer (d. h. ohne Berücksichtigung der experimentellen Schwierigkeiten und nur auf der optischen Achse des Interferometers) betrachtet.

**Interferometer für Photonen**  
 Das Phänomen wird zu einem völligen Konstrukt. Es ist durch Regeln ersetzt worden. Die Herausbildung eines Interferenzmusters aus einzelnen Photonen wird nur durch Analogie zum bekannten Phänomen erschlossen. Die Quantenstruktur des Lichtes bildet sich in einem Geflecht von Modellen (Teilchen bzw. Wellen), das das klassische Weltbild überschreiten muss.

**Epistemologischer Vektor**

**Epistemologischer Vektor**

**Epistemologischer Vektor**

**Epistemologischer Vektor**

Abbildung 2.5: Die epistemologischen Unterrichtsfelder