

**Weiterführende Optik
mit
Feynmans Zeigerformalismus**

**Ein didaktisches Konzept zur Einführung der Photonenoptik
in der 13. Jahrgangsstufe eines Berliner Gymnasiums**

**unter besonderer Berücksichtigung
von Reflexions- und Spaltphänomenen**

Schriftliche Prüfungsarbeit zur zweiten Staatsprüfung
für das Amt des Studienrats

vorgelegt von
Dr. Christoph Grandt
Studienreferendar im
1. Schulpraktischen Seminar
des Bezirks Steglitz (S)
Berlin, den 1. Oktober 1995

на Зори

*„Licht verhält sich wie Teilchen...
Das müssen sich diejenigen einprägen,
die in der Schule
vermutlich vom Wellencharakter des Lichts
erzählt bekamen“*

– Richard Feynman

Inhalt

1. Einleitung	1
1.1. Ziel und Inhalt dieser Arbeit	1
1.2. Wozu eine neue Optik?	2
2. Erläuterung des Themas	3
2.1. Was ist „Weiterführende Optik“?	3
2.2. Abriß der Photonenoptik nach Feynman	4
3. Die Planung der Unterrichtsreihe	7
3.1. Lerngruppe, Lernvoraussetzungen, Zeitrahmen	7
3.2. Motivation, Methoden, Medien	9
3.3. Die Abfolge der Sachinhalte und didaktische Entscheidungen	11
4. Die einzelnen Unterrichtsabschnitte: Durchführung und Analyse	14
4.1. <i>Abschnitt 1:</i> Welche Vorstellungen haben wir vom Licht?	14
4.2. <i>Abschnitt 2:</i> Wir stellen fest: Licht verhält sich wie Teilchen („Photonen“)	17
4.3. <i>Abschnitt 3:</i> Wir verstehen das Verhalten von Photonen bei Reflexionen an dünnen Schichten nicht	18
4.4. <i>Abschnitt 4:</i> Wir erfinden den Zeigerformalismus und verstehen damit qualitativ die Photonenreflexion	21
4.5. <i>Abschnitt 5:</i> Wir stellen Rechenregeln für die Wahrscheinlichkeitsamplituden auf und verstehen quantitativ die Photonenreflexion	26
4.6. <i>Abschnitt 6:</i> Mit Hilfe des Zeigerformalismus verstehen wir die Reflexion am Spiegel und am Gitter	30
4.7. <i>Abschnitt 7:</i> Mit dem Zeigerformalismus berechnen wir die Beugung am Spalt und sagen einen bisher unbeachteten optischen Effekt voraus	31
4.8. <i>Abschnitt 8:</i> Die Voraussage aus Abschnitt 7 wird durch ein Experiment exakt bestätigt	35
4.9. <i>Abschnitt 9:</i> Wir verstehen die Funktion einer Linse und die Tatsache, daß sich Licht geradlinig ausbreitet	37
5. Wie könnte die Unterrichtssequenz fortgeführt werden?	38
6. Zusammenfassende Analyse	39
6.1. Was haben die Schüler vom Unterricht gehabt?	39
6.2. Sollte der Unterricht in dieser Form wiederholt werden?	45
6.3. Was kann verbessert werden?	45
7. Schlußwort	48
8. Literatur	49

1. Einleitung

1.1. Ziel und Inhalt dieser Arbeit

Kernpunkt der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines *didaktischen Konzepts*. Es ist der Versuch, Feynmans* Photonenoptik, die er in seinem populärwissenschaftlich-anspruchsvollen Buch „*QED - die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*“ [FEYNMAN 1988] beschreibt, für die Schule aufzubereiten. Damit wird didaktisches Neuland betreten, wenn man von einigen wenigen Ansätzen absieht [ERB 1992][BADER 1994].

Die Aufgabe besteht also darin, einen bisher eher universitären Stoff an die normale Lerngruppe eines Gymnasiums anzupassen und den besonderen Anforderungen des Schulbetriebs Rechnung zu tragen. Aufgrund der Neuartigkeit des Themas erschien es nicht sinnvoll, das Unterrichtskonzept in allen Einzelheiten, insbesondere was den Umfang der Sachinhalte angeht, im voraus starr festzulegen, um sich schließlich dem Vergleich von „Planung“ und „Durchführung“ hinzugeben. Die Unterrichtsstruktur sowie die Gewichtung der Inhalte haben sich vielmehr in einer fortwährenden *Rückkopplung* mit dem aktuellen Unterrichtsverlauf herauskristallisiert. Das Konzept erweist sich im nachhinein als schlüssig, erhebt jedoch keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit. Nur Erfolg oder Mißerfolg bei unterschiedlichen Lerngruppen entscheiden schließlich über seinen Wert.

Ich wünsche mir, daß die vorliegende Arbeit hilfreich für diejenigen Lehrer und Lehrerinnen ist, die Feynmans Photonenoptik selbst einmal „ausprobieren“ wollen. Sie soll einen Beitrag dazu leisten, daß in absehbarer Zeit möglichst viele SchülerInnen von diesem faszinierenden Thema erfahren.

Der vorliegende Text ist wie folgt strukturiert: In Kapitel 2 werden zunächst die fachlichen Grundlagen kurz umrissen. Danach gibt Kapitel 3 eine Übersicht über die Unterrichtssequenz und liefert Gründe für die gewählten Inhalte und Methoden. Eine genauere Beschreibung des Unterrichtsgeschehens folgt mit Kapitel 4, in dem ausgewählte Aspekte diskutiert werden. In den Kapiteln 5 und 6 werden schließlich stundenübergreifende Sachverhalte analysiert. Es wird besprochen, was die Schüler am Ende von diesem Unterricht gehabt haben und was verbesserungswürdig erscheint.

* Richard Feynman (1918 - 1988): Laut Encyclopaedia Britannica der brillianteste und einflußreichste Physiker der Nachkriegszeit. Entwicklung der Quantenelektrodynamik (QED), für die er 1965 den Nobelpreis bekam.

1.2. **Wozu eine neue Optik?**

Bald schreiben wir das Jahr 2000. Die sogenannte moderne Physik wird dann die Physik eines vergangenen Jahrhunderts sein. Dies sollten wir bedenken, wenn wir unsere Schüler und Schülerinnen heute zum Abitur führen. Es ist an der Zeit, daß die moderne Physik, oder besser: die *Gegenwartsphysik*, in angemessener Form Einzug an unseren Schulen hält. Damit ist nicht nur die unfertige Quantentheorie aus der Zeit kurz nach der Jahrhundertwende gemeint, wie sie bisher ausschließlich an unseren Schulen unterrichtet wird, sondern auch deren Vollendung nach dem 2. Weltkrieg. Wie hier aufgezeigt werden wird, ist diese neue Physik inzwischen so tiefgehend verstanden und tägliches Brot der Naturwissenschaftler, daß eine an die Schule angepaßte Reduktion nunmehr möglich ist.

Wann kann man behaupten, daß man eine scheinbar unanschauliche Theorie „verstanden“ hat? Der große Physiker Max Born gibt darauf die Antwort: „Wenn man sich an sie gewöhnt hat!“ Wie sollen sich aber die folgenden Generationen an etwas gewöhnen, von dem sie nie etwas gehört haben? Als Einstein zur Jahrhundertwende studierte, gab es an nicht einmal der Hälfte der deutschen Universitäten Vorlesungen über die Maxwellsche Elektrodynamik, die bereits 1864 niedergeschrieben wurde. Alles erschien viel zu kompliziert und zu neu. Heute jedoch sind die Maxwellschen Vorstellungen über das elektromagnetische Feld selbstverständlich Schulstoff der 12. Jahrgangsstufe.

Nun sind es schon wieder fast 50 Jahre her, seit der sogenannte Teilchen-Welle-Dualismus einer dritten, viel umfassenderen Vorstellung Platz gemacht hat. Nur ist diese Einsicht bisher kaum in das Bewußtsein der Öffentlichkeit gedrungen; denn woher sollte sie es auch wissen. Die Schule ist hier gefordert, damit nicht wieder nur den Medien das Feld der Gegenwartsphysik überlassen wird. Medien, die oft nur Halbverstandenes kolportieren.

Daneben kann die Schule durch die Behandlung der Gegenwartsphysik einen Beitrag dazu leisten, die Schere, die sich in unserer Gesellschaft zwischen professionellen Naturwissenschaftlern und Laien auftut, etwas zu schließen. In diesem Sinne soll der hier vorgestellte neue Stoff auch zur Verständigung zwischen diesen beiden gesellschaftlichen Gruppen beitragen. Eine Verständigung, die angesichts der Probleme, die auf unsere Schüler im nächsten Jahrhundert zukommen werden, lebenswichtig sein wird.

2. Erläuterung des Themas

2.1. Was ist „Weiterführende Optik“?

Der Begriff *Weiterführende Optik* wurde von Roger Erb und Lutz Schön für die Oberstufenoptik eines von ihnen an der Gesamthochschule Kassel entwickelten Optik-Curriculums vorgeschlagen [ERB 1994a][ERB 1994b]. Nach diesem Curriculum ist für SchülerInnen der Mittelstufe das *Fermatprinzip* Ausgangspunkt für die geometrische Optik. Sie benutzen dabei den Begriff des *Lichtwegs*, der ihnen den nahtlosen Übergang zu einer Oberstufenoptik ermöglicht, die ohne die Wellenvorstellung (!) auskommt:

Licht, nach dessen innerer Natur nicht gefragt wird, hat die Möglichkeit, sich auf verschiedenen Wegen von A nach B zu „bewegen“. Allein aus der Betrachtung der möglichen Lichtwege und weniger Rechenregeln können sich die SchülerInnen sämtliche Interferenz- bzw. Beugungserscheinungen erklären. Wie im folgenden genauer beschrieben wird, kommen sie auf diesem Wege automatisch zu einer statistischen Deutung der entsprechenden physikalischen Effekte, die in ihrem Wesen bereits quantenmechanisch ist. In diesem Sinne verstehen wir diese Optik als eine *weiterführende*. Ohne den üblichen (historisch begründeten) logischen Bruch führt sie die Schüler und Schülerinnen hin zur Gegenwartsphysik.

Im Unterschied zum Kasseler Ansatz werde ich nicht darauf bestehen, daß die SchülerInnen *keine* Vorstellung von der inneren Natur des Lichtes haben. Ich werde dagegen mit Feynman die Teilchenvorstellung pflegen, wobei nur darauf zu achten ist, daß es eben quantenmechanische Teilchen sind und keine klassischen. Entsprechend verhalten sie sich nicht unbedingt nach dem sogenannten gesunden Menschenverstand. Ich bin der Überzeugung, und der hier beschriebene Unterrichtsverlauf hat diese Überzeugung bestätigt, daß junge Menschen außergewöhnlich unvoreingenommen und tolerant die seltsamen Spielregeln der Natur akzeptieren und sich zu eigen machen.

Es sei noch erwähnt, daß das Prinzip der Weiterführenden Optik nicht einfach didaktischer Trick ist, der nur in Schulen seine Lebensberechtigung hätte, sondern vielmehr eine direkte Umsetzung der akkuratesten Theorie, die die Physiker heute kennen. Feynman sagt dazu: „Was hier gelehrt wird, muß nicht wieder verlernt werden“.

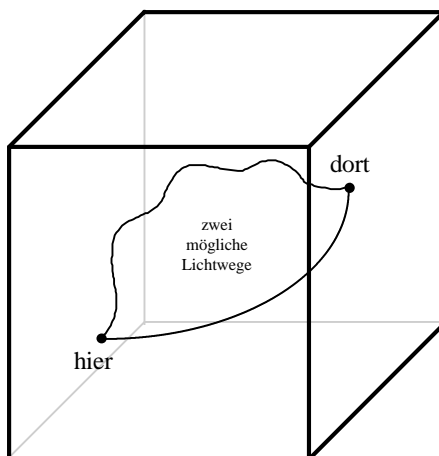
2.2. Abriß der Photonoptik nach Feynman

Es soll hier nicht darum gehen, die didaktische Reduktion Feynmans nun doch wieder ein Stück auf Universitätsniveau anzuheben, um Physikern entprechende Aha-Erlebnisse zu verschaffen. Sicher ist es für Eingeweihte spannend, in der Wahrscheinlichkeitsamplitude $\dot{\Delta}$ die Wellenfunktion ψ zu erkennen oder im Feynman'schen „Pfeil“ die komplexe Zahl e^{ikr} , jedoch ist dies für das Verständnis des hier beschriebenen Unterrichts nicht notwendig. Interessierte Leser finden eine knappe aber verständliche Übersicht über dieses Thema in [BADER 1994]. Es soll im folgenden besonders denjenigen ein Einblick in die Photonoptik gegeben werden, die sie noch *nicht* kennen.

Worum geht es in der Photonoptik? Wie der Name schon sagt, geht es um Photonen, also um die Teilchen des Lichts. Ist die Theorie aber erst einmal an diesem Beispiel entwickelt, kann sie auch auf alle anderen Teilchen und Gebilde der physikalischen Welt angewendet werden. Soweit wird es aber im hier zu besprechenden Unterricht nicht kommen.

Die Photonoptik ist eine Theorie im Kanon der Quantenphysik, die vom Denkansatz ausgeht, daß sich physikalische Systeme (seien sie einfach oder kompliziert) in ganz bestimmten *Zuständen* befinden, die sprunghaft ineinander übergehen können. Die ganze Quantenphysik beschäftigt sich mit nur einer einzigen Frage: *Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein physikalisches System von einem Zustand in einen ganz bestimmten anderen Zustand übergeht?*

Dieser Ansatz sei durch folgendes Beispiel verdeutlicht: In einem Kasten befinde sich nichts, außer einem einzigen Photon. Das ist unser, zugegeben



einfaches, physikalisches System. Der Zustand dieses Systems wird dadurch festgelegt, daß wir sagen können, „das Photon ist *hier*“ (wir könnten z.B. aus anderen Überlegungen wissen, daß hier gerade ein Photon entstanden sein muß). Wir fragen uns jetzt, ganz nach quantenmechanischer Manier, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, daß unser Teilchen plötzlich nicht mehr *hier*, sondern *dort* anzutreffen ist, sich der Zustand des Systems also entsprechend geändert hat.

Dazu zeichnen wir, da wir einer gewissen Anschauung bedürfen (und nur deshalb), verschiedene Wege ein, die das Photon nehmen könnte.

Wie rechnen wir jetzt die Wahrscheinlichkeit des Übergangs zwischen den beiden Zuständen aus? Genau das beantwortet die Feynman'sche Theorie, die im Grunde nichts anderes ist, als eine *Rechenvorschrift*. Die Frage, *warum* die Natur so rechnet, ist wahrscheinlich sinnlos; *daß* sie aber so rechnet wird durch alle Beobachtungen mit atemberaubender Genauigkeit bestätigt.

Dem Anfangszustand wird ein *Vektor* zugeordnet, der irgendwo hin zeigt. Bewegt man sich jetzt längs eines beliebigen Weges zum nächsten Zustand, dreht sich der Vektor mit jeder zurückgelegten Weglänge ein Stück weiter (wie ein Kartometer), so daß er, am Ziel angekommen, im allgemeinen eine neue Orientierung besitzt. Bei sichtbarem Licht vollführen diese Vektoren etwa alle 0,0006 mm eine Umdrehung ($\lambda = 600 \text{ nm}$). Jedem Weg kann also ein „Endvektor“ zugeordnet werden. Ihn bezeichnet man als *Wahrscheinlichkeitsamplitude* \ddot{A} .*

Die Wahrscheinlichkeit des Übergangs zwischen den beiden Zuständen wird nun durch folgende Rechenvorschrift berechnet:

Man nehme *alle* möglichen Wege, addiere die zugehörigen Wahrscheinlichkeitsamplituden zu einem neuen Vektor und bilde das Quadrat seiner Länge ($\sum \ddot{A}_i$)²).

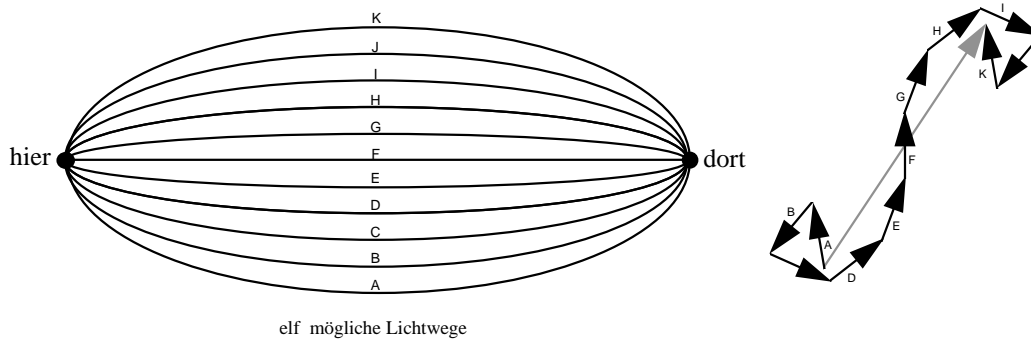
Dieses Quadrat ist die gesuchte Wahrscheinlichkeit der Zustandsänderung unseres Systems, also in unserem Fall die Wahrscheinlichkeit des Photonenübergangs. Haben wir es mit vielen Photonen zu tun, ist dies nichts anderes als die relative Lichtintensität.

Wie sehen nun die Drehungen der Wahrscheinlichkeitsamplituden im einzelnen aus (siehe dazu die Zeichnung auf Seite 6)?

Für Wege in der Nähe des direkten Weges unterscheiden sie sich kaum, da die Weglängen alle ähnlich sind. Hier entsteht ein langer Summenvektor und damit der Löwenanteil der Intensität. Ganz anders für Wege weitab vom direkten Weg: Dort unterscheiden sich die Weglängen von „benachbarten“ Wegen so stark**, daß sich die entsprechenden Vektoren sehr unterschiedlich gedreht haben („verknäult“ haben, wie ein Schüler sagte). Diese Vektoren, so viele es auch seien, tragen kaum zur Intensität bei.

* Der Betrag ändert sich eigentlich auch mit $1/r$, was im hier zu besprechenden Unterricht jedoch nicht beachtet wird.

**Daß dies tatsächlich so ist, läßt sich prinzipiell auch mit Mitteln der Schulmathematik zeigen (siehe Kap. 4.6).



Jedem möglichen Lichtweg wird ein Vektor zugeordnet, dessen Orientierung von der Weglänge abhängt. Die Aneinanderreihung dieser Vektoren ergibt die Cornu-Spirale. Das Quadrat des Summenvektors ist die Wahrscheinlichkeit für den Photonenübergang.

Trägt man die Vektoren graphisch auf, so ergibt sich das Bild der sogenannten Cornu-Spirale (*frz. cornu: gehört*), die im Unterricht ausgiebig benutzt wird. Man erkennt: Nur die Wege in der Nähe des direkten (geradlinigen) Weges tragen zum Photonenübergang bei, denn die Beiträge aller anderen Wege heben sich weg. Im Klartext: Licht breitet sich geradlinig aus!

Dieses Ergebnis ist zwar nicht besonders neu, jedoch haben wir es erhalten, ohne das oft teleologisch mißgedeutete Fermat'sche Prinzip („das Licht nimmt immer den Weg mit der kürzesten Zeit“) zu bemühen. Außerdem sagt die Photonenoptik bei genauerer Betrachtung noch viel mehr aus: Es ist eben nicht nur der direkte Weg, der zum Ergebnis beiträgt, sondern es spielen zumindest auch alle Wege in seiner Nähe eine Rolle: Blockiert man zum Beispiel den direkten Weg F mit einem kleinen Hindernis, so ergibt sich trotzdem genau dahinter immer noch eine gewisse Intensität über die benachbarten Wege D, E und G, H. Das Photon kann sich also sozusagen um diesen Gegenstand herumschummeln. Dies ist nichts anderes als das Phänomen der Beugung. Auf diese Art können auch alle anderen optischen Phänomene (mit Ausnahme der Polarisation) mit einem Handstreich erklärt werden.

Dieses einfache aber mächtige Erklärungsmuster muß durch die Tatsache erkauft werden, daß wir keine Aussage mehr über den „wirklichen“ Weg des Photons machen können. Es gibt nur diskrete Zustände; einen „Weg“ von einem zum anderen gibt es nicht! Und wenn man es trotzdem nicht lassen kann, von Photonenwegen zu sprechen, so muß man akzeptieren, daß das Photon *alle* Wege nimmt, oder wie Feynman es ausdrückt: „In a way, the photon smells the nearby paths, and checks them against each other“.

3. Die Planung der Unterrichtsreihe

3.1. Lerngruppe, Lernvoraussetzungen, Zeitrahmen

Die hier beschriebene Unterrichtsreihe wurde über 8 Unterrichtsstunden in einem Leistungskurs der 13. Jahrgangsstufe am Rückert-Gymnasium in Berlin-Schöneberg gehalten. Alle 8 Stunden sind Inhalt der vorliegenden Arbeit. Dabei ist zu beachten, daß die Reihe zeitlich, jedoch nicht inhaltlich, in den normalen fünfständigen Leistungskurs eingebettet wurde. Der normale Physikunterricht lief unter dem Thema *Röntgenstrahlung* weiter. Unter dem Stichwort *Dualismus Welle-Korpuskel* kann die Reihe in den gültigen Berliner Rahmenplan für PH-4 eingebettet werden [RAHMENPLAN 1984 p. 30].

Ein Blick auf den Kalender (siehe Seite 8) zeigt, daß für die Schüler die mündliche Abiturprüfung, und damit das Ende ihrer Schullaufbahn, kurz bevorstand. Das schriftliche Abitur lag bereits hinter ihnen, und die Noten der Kurse standen im wesentlichen fest. Außerdem war mit dem Fachlehrer verabredet worden, die Themen der mündlichen Abiturprüfung *nicht* aus der hier vorgestellten Reihe zu wählen.

Die Lerngruppe besteht aus 7 Schülern, die ich zuvor über mehrere Wochen im Unterricht beobachten konnte. Dabei mußte festgestellt werden, daß das Leistungsniveau sowie die Motivation nicht einem Leistungskurs, sondern eher einem Grundkurs entsprachen. Nur ein Schüler (Gregor) ist grundsätzlich an Physik interessiert und hat eine hohe naturwissenschaftliche Begabung. Als Indikator für das Leistungsvermögen seien die Physiknoten im Abitur genannt: Neben einer Eins(minus) gab es zwei Dreien, eine Vier und drei Fünfen. Zwei von den sieben Schülern haben das Abitur, unter anderem wegen der mündlichen Nachprüfung in Physik, nicht bestanden.

Die situationsabhängige Planungsbasis läßt sich wie folgt resumieren:

- **Die Reihe liegt ganz am Ende der Schullaufbahn.** ⇒ Das Unterrichtskonzept muß in sich abgeschlossen sein. Ein Nacharbeiten, auch von seiten eines anderen Lehrers, ist nicht möglich.
- **Für die Schüler sind diese Stunden relativ unverbindlich.** ⇒ Es besteht die Gefahr, daß die Schüler in eine reine Kosumhaltung verfallen. Der Motivation muß deshalb besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden.
- **Die Lerngruppe ist klein.** ⇒ Eine persönliche Ansprache der Schüler ist möglich.

Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag
Mär	Mär	Mär	Mär	Mär
3 Apr	4 Apr	Feynman 1	6 Apr	7 Apr
10 Apr	11 Apr	Feynman 2	13 Apr	14 Apr
17 Apr	18 Apr	19 Apr	20 Apr	21 Apr
Osterferien Berlin 95				
24 Apr	25 Apr	26 Apr	27 Apr	28 Apr
Osterferien Berlin 95				
1 Mai	2 Mai	Feynman 3	Feynman 4	5 Mai
Osterferien Berlin 95				
8 Mai	9 Mai	Feynman 6	Feynman 7	12 Mai
15 Mai	16 Mai	Feynman 8	18 Mai	19 Mai
22 Mai	23 Mai	24 Mai	25 Mai	26 Mai
kein Unterricht für Abiturienten				
29 Mai	30 Mai	31 Mai	1 Jun	2 Jun
mündliches Abitur				
kein Unterricht für Abiturienten				

Die Einordnung der Reihe in den Schulkalender

- **Die Lerngruppe hat das Niveau eines Grundkurses.** ⇒ Dies ist eigentlich kein Nachteil für die Unterrichtsreihe, sondern erhöht ihre Allgemeingültigkeit. Auf schwierige mathematische Phasen muß verzichtet werden.
- **Die theoretischen Aspekte der Quantenphysik wurden im bisherigen Unterricht nur angeschnitten.** ⇒ Die Überschrift kann *nicht* heißen: „Quantenphysik aus neuer Sicht“. Der Unterricht muß vielmehr ein in sich geschlossenes Denkmuster liefern, ohne Rückgriff auf oder Vergleiche mit der „klassischen“ Quantenphysik.

3.2. Motivation, Methoden, Medien

Die Ansiedlung der Reihe am äußersten Ende des Schuljahres bringt mit sich, daß externe „Motivationen“, z.B. der Wunsch nach guten Noten, kaum eine Rolle spielen. Eine gute Mitarbeit der Schüler dürfte deshalb im wesentlichen aus *Interesse am Stoff* und *Spaß am Unterrichtsgeschehen* erfolgen.

Die relative Unverbindlichkeit der Stunden bedingt außerdem, daß das Unterrichtskonzept auf Leistungskontrollen im Sinne einer Notenbildung verzichtet. Leistungskontrollen im Sinne eines Angebotes an die Schüler, sich über den eigenen Kenntnisstand klar zu werden, werden dagegen durchgeführt.

Wenn man zusätzlich berücksichtigt, daß das Thema keine spektakulären Versuche erlaubt, ergibt sich die schwierige Aufgabe, die Schüler fast ausschließlich durch die *Inhalte der theoretischen Physik* zu motivieren. Im Idealfall spüren die Schüler ein Unbehagen bei den üblichen Erklärungsversuchen und sind dementsprechend motiviert, von einer Physik zu hören, die bessere Erklärungen liefert. Es muß versucht werden, diese emotionale Bindung an den Stoff zu pflegen. Gerade hier kann die Rolle des Lehrers, seine eigene Begeisterungsfähigkeit sowie seine Fähigkeit, diese Begeisterung auf die Schüler zu übertragen, nicht hoch genug eingeschätzt werden.

Es hat sich herausgestellt, daß bei den meisten Schülern eine Motivation über ihr natürliches Ordnungsbedürfnis möglich ist. Plötzlich einen bisher verworrenen Sachverhalt übersichtlich und geordnet vor Augen zu haben (im Klartext: *verstanden* zu haben) erzeugt eine Befriedigung, für die sich ein bestimmtes Maß an Anstrengung lohnt. Zech bezeichnet diese Motivation als *strukturell-ästhetisch* [ZECH 1977], geht jedoch, genau wie andere Autoren, nicht weiter auf sie ein. Für den hier vorgestellten Unterricht ist diese Triebfeder jedoch genauso wichtig, wie die in der Literatur viel ausführlicher beschriebene

Motivation durch einen sogenannten *kognitiven Konflikt*, der meist am Anfang einzelner Physikstunden steht [z.B. BLEICHROTH 1991].

Eine affektive Bindung an das Thema wird im Unterricht noch auf eine andere Weise hergestellt, nämlich durch die Person Richard Feynmans. Es fehlt hier leider der Platz, um auf seinen schillernden Charakter einzugehen und auf sein Prinzip, sich auf niemanden zu verlassen, sondern alles *selbst* zu durchdenken. Es sei deshalb auf folgende Bücher verwiesen, die auch auf die Schulzeit Feynmans eingehen: [FEYNMAN 1985], [GLEICK 1992], [MEHRA 1994]. Durch das Einstreuen von Geschichten über Feynman wird den Schülern die Möglichkeit geboten, sich mit ihm zu identifizieren und seine Theorie als Ergebnis mutiger und unkonventioneller Gedanken zu verstehen. Dieser Ansatz hat sich als wirkungsvoll erwiesen. Zwei Schüler haben sich noch während der Unterrichtsreihe Bücher von Feynman gekauft.

Der Computer wird in diesen acht Stunden sparsam eingesetzt. Er dient im wesentlichen der dynamischen Veranschaulichung von Sachverhalten, denen mit statischen Medien weniger gut beizukommen ist. Die Schüler haben dabei keine Möglichkeit, die Programme selbst zu bedienen, so daß eine zusätzliche Motivation durch den Computereinsatz kaum erzeugt wird. (Im Sinne vermehrter Schüleraktivität kann der Computereinsatz ausgedehnt werden, sofern mehr Stunden zur Verfügung stehen, siehe Kapitel 3.3 und 6.3).

Da Feynmans Buch *QED \emptyset die seltsame Theorie des Lichtes und der Materie* aus einer theoretischen Vorlesung ohne aktive Zuhörerbeitilgung hervorgegangen ist, muß sein einphasiger methodischer Ansatz für die Schule geändert werden. Praktisch bedeutet dies, daß Experimente und Übungen entwickelt werden, die im Wechsel mit den theoretischen Phasen für die entsprechenden Spannungsbögen sorgen. Aber auch die theoretischen Teile werden so aufbereitet, daß der Lernprozess sich im *Gepräch* entwickeln kann. Oberstes Gebot ist dabei, den Schülern so viel eigene Handlung und selbständiges Entdecken wie möglich zu erlauben. Wie dies im einzelnen versucht wurde, steht im 4. Kapitel. Auskunft darüber, wie die Schüler diesen Versuch empfunden haben, gibt Abschnitt 6.1.

Es sei zum Schluß noch das Gebot erwähnt, die *Grundlagen* der Photonenoptik immer wieder geduldig zu wiederholen. Die Schüler müssen in jedem Moment wissen, was sie tun. Zum Beispiel darf das graphische Kalkül nicht zum mechanischen Automatismus verkommen und die zugrundeliegende Theorie verdecken, denn sonst würden wir die Schüler nur ein bedeutungs-

leeres Schema lehren. Es muß der Versuchung widerstanden werden, eine Rechenvorschrift als neue „physikalische Wahrheit“ zu betrachten.

3.3. Die Abfolge der Sachinhalte und didaktische Entscheidungen

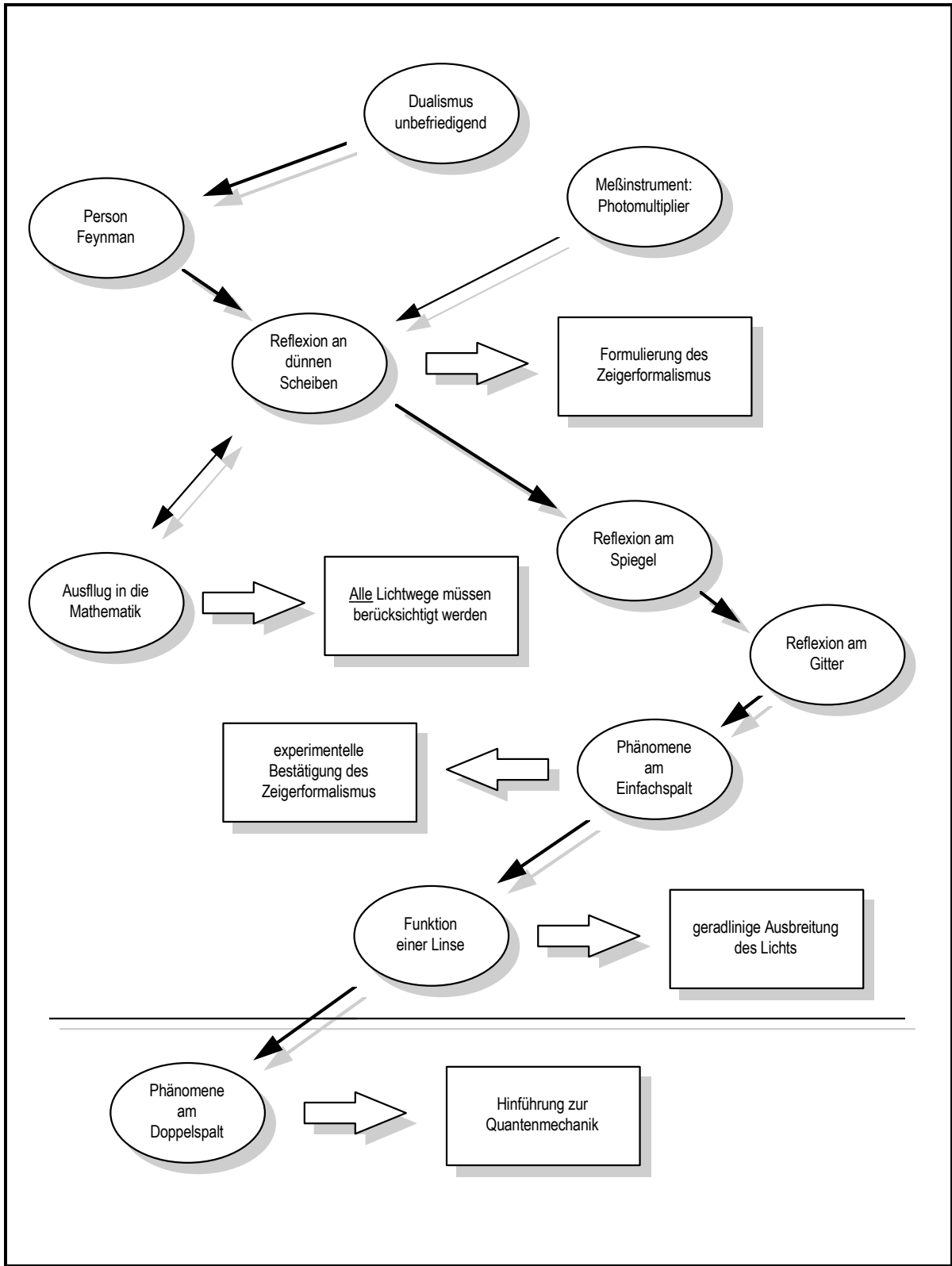
Oberstufenschüler haben schon häufig vom sogenannten *Welle-Teilchen-Dualismus* gehört. Untersuchungen aus Berlin zeigen, daß etwa 60% der Schüler den Dualismus in ihren Erklärungen anführen, und 40% ihn sogar als die wirkliche Natur des Lichtes betrachten [LICHTFELD 1991]. Auch den Schülern unserer Lerngruppe ist die Problematik bekannt, daß Lichtphänomene je nach Experiment entweder im Wellen- oder im Teilchenmodell behandelt werden (siehe Kapitel 4.1). Wie im Verlaufsdiagramm auf Seite 12 zu erkennen ist, bildet deshalb die *Problematisierung der Dualismuskonzeptionen* den Ausgangspunkt für die Unterrichtsreihe. Dabei werden Beispiele aus der Erfahrungswelt der Schüler helfen. Die Schüler sollen die „Doppelzüngigkeit“ dieses Modells schließlich als unbefriedigend empfinden.

Nun taucht die Person Richard Feynman auf, der dieses Unbehagen auch spürte und es schließlich schaffte, beide Vorstellungen zu vereinen.

Um Feynmans Gedankengänge zu verstehen, müssen die Schüler zunächst mit der Tatsache vertraut gemacht werden, daß Licht *eher aus Teilchen* besteht, damit sich diese Vorstellung als Ausgangspunkt für den weiteren Unterricht verwenden läßt. Schlüssel für diese Erkenntnis ist der „Photomultiplier“, ein Gerät, mit dem man einzelne Photonen messen kann. Es ist an Schulen zwar nicht vorhanden, kann aber, nachdem seine Funktion erarbeitet wurde, für Gedankenexperimente eingesetzt werden.

Ist die Vorstellung von einzelnen Photonen erst einmal akzeptiert, wird die Reflexion dieses Photons an Glasscheiben und dünnen Schichten untersucht. Dieser Ansatz, hat den Vorteil, daß bereits hier das gesamte notwendige Handwerkszeug zum Verständnis der Theorie erarbeitet werden kann. Das entspricht dem Grundsatz, den Schülern möglichst viel an *einem* Beispiel zu erklären und sie nicht durch viele Beispiele zu verwirren. Solch ein Beispiel bildet später den Kristallisationspunkt für die Erinnerung.

Nun zeigen mathematische Überlegungen, daß wirklich *alle* Lichtwege berücksichtigt werden müssen, um zu einem richtigen Ergebnis zu kommen.



Die Unterrichtsreihe im Verlaufdiagramm

Ich halte es für wichtig, zumindest einige dieser mathematischen Zusammenhänge von den Schülern erarbeiten zu lassen; denn die mathematische Formulierung ist um so wichtiger, je seltsamer die Theorie anmutet. Die Schüler waren allerdings anderer Meinung (siehe Kapitel 6.1).

Nun können die Schüler den erarbeiteten Formalismus auf verschiedene ihnen bekannte optische Erscheinungen anwenden (Spiegel, Gitter, Spalt). Sie sollen erfahren, wie einfach sich nun viele zuvor schwer verständliche Phänomene erklären lassen. Dabei wird es vorgezogen, die Theorie an den *Anfang* zu stellen, so daß die Schüler Voraussagen entwickeln und überprüfen können. Die Wahl dieser Vorgehensweise hat zwei Gründe:

Einmal ist dies die vorherrschende Methode der Gegenwartsphysik und unterscheidet sich von dem sonst in der Schule bevorzugten Paradigma „wir beobachten die Natur und schauen, ob wir Erklärungen finden“. Zum anderen hat diese Methode für die Schüler den unschätzbaren Reiz, sich „prophetisch“ betätigen zu können. Außerdem war es für sie immer wieder überraschend, plötzlich auf einem ganz anderen, nämlich theoretischen Wege auf Erscheinungen zu stoßen, die sie alle eigentlich schon längst kennen. Fast war es amüsant zu sehen, in welchem spätem Stadium bei manchen Schülern der entsprechende Groschen fiel (dann aber mit lautem Knall).

Nun ist es aber trotzdem auf die Dauer langweilig, immer nur bekannte Phänomene vorherzusagen. Die Schüler werden deshalb in eine Richtung geführt, die sie aus der Theorie heraus einen optischen Effekt vorhersagen läßt, der erstens sehr ungewöhnlich ist und zweitens weder in der Schule noch auf der Universität Beachtung findet (die Idee dazu stammt ursprünglich von Roger Erb [Erb 1994a p. 95-96]). Dieser Unterrichtsabschnitt wird in den Kapiteln 4.7 und 4.8 genauer beschrieben. Er ist übrigens ein Beispiel für die Rückkopplung durch den Unterricht: Eigentlich war es geplant, zur Abwechslung das Experiment an den Anfang zu stellen, aber ein Schüler hat von selbst aus der Theorie heraus eine Voraussage gewagt, die dann bestätigt wurde.

Zum Ausklang der Unterrichtsreihe haben die Schüler noch einmal die Gelegenheit, sich zurückzulehnen und einige wichtige physikalische Phänomene (z.B. Linse) rein anschaulich zu verstehen. Es werden ja diese anschaulichen Erklärungsmuster sein, die die Schüler in erster Linie behalten werden.

Ein Vorschlag für die Weiterführung des Unterrichts (im Verlaufsdiagramm unter dem waagerechten Strich) findet sich in Kapitel 5.

4. Die einzelnen Unterrichtsabschnitte: Durchführung und Analyse

Die im folgenden besprochenen Unterrichts*abschnitte* entsprechen nicht unbedingt einzelnen Unterrichts*stunden*. Es wird hier einer thematischen, gleichwohl aber chronologisch richtigen Ordnung der Vorzug gegeben.

Bestimmte Unterrichtsabschnitte mit exemplarischem Charakter werden sehr ausführlich beschrieben, einschließlich wörtlicher Bemerkungen von Schülern, Lehrerimpulsen und Tafelanschriften. Damit wird auch etwas von der Unterrichts*atmosphäre* vermittelt. Andere Unterrichtsabschnitte müssen dagegen zurücktreten und werden zusammengefaßt.

4.1. **Abschnitt 1: Welche Vorstellungen haben wir vom Licht?**

Ziel: *Die Schüler sollen sich über ihre Vorstellungen vom Licht im Klaren sein, und der Lehrer soll die Vorstellungen der Schüler kennen.*

Die Schüler einer 13. Jahrgangsstufe besitzen vielfältiges physikalisches Vorwissen. Dabei mischt sich gerade auf dem Gebiet der modernen Physik, oder was dafür gehalten wird, die Schulbildung mit mehr oder weniger zutreffenden Informationen aus den Medien. Dagegen wird die *eigene Erfahrung* kaum mit der modernen Physik in Zusammenhang gebracht. Gerade an die eigene Erfahrung soll aber die hier besprochene Reihe anknüpfen, um die Schüler emotional so eng wie möglich an den Stoff zu binden. Erst später wird die Theorie behutsam in den Vordergrund gerückt.

Nicht nur zum Zwecke der Anknüpfung an die Erfahrungswelt dient der folgende Fragebogen, der den Schülern zu Beginn der ersten Stunde vorgelegt wurde. Die Fragen sollen die Schüler zwingen, sich über das hier zu behandelnde Thema, nämlich das Licht, Gedanken zu machen. Die Fragen sind entsprechend offen gestellt. Nicht zuletzt dienen sie dem Lehrer für die Einschätzung der Vorkenntnisse und der Gedankenwelt der Schüler. Der nachfolgende Unterricht kann entsprechend gestaltet werden. Die Schüler hatten etwa 20 Minuten Zeit, die Fragen zu beantworten. Ihnen wurde gesagt, daß es nicht auf mathematische Formeln oder ausschweifende Überlegungen ankommt, sondern auf kurze Erklärungen, die den Kern des Problems treffen.

Einführende Fragen

Welche Vorstellung haben wir vom Licht?

- 1) Licht wird an der Grenzschicht von Luft und Wasser „gebrochen“, d.h. ein Lichtstrahl bekommt dort einen Knick.
Warum verhält sich Licht so?
- 2) Eine Linse kann Licht in einem Punkt bündeln.
Wie macht die Linse das?
- 3) Bei Seifenblasen oder bei einem Ölfilm sieht man oft bunte Muster.
Wie kann man sich diese Muster erklären?
- 4) Läßt man paralleles Licht durch einen sehr engen Spalt auf eine Leinwand fallen, so entsteht kein scharfes Bild des Spaltes, sondern ein „verwaschener“ Leuchtfleck.
Warum ist dies so?
- 5) *Was ist Licht?*

Fünf Aufgaben für den Einstieg ins Thema

Der Charakter fast aller Antworten war gleich und läßt sich wie folgt zusammenfassen:

Die Probleme wurden nicht gelöst, sondern nur auf ein scheinbar höheres Niveau gehoben. Dieses höhere Niveau ist gekennzeichnet durch die Verwendung mehr oder weniger passender physikalischer Fachbegriffe, die jedoch selbst nicht weiter hinterfragt werden.

Beispielsweise haben fast alle Schüler den bunten Ölfilm damit erklärt, daß er „wie ein *Prisma* wirke und deshalb die Farbeffekte zu sehen seien“. Daß hinter einem Spalt kein scharfer Lichtpunkt entsteht, wird lapidar mit „das Licht wird *gebeugt*“ begründet, während bei der Linse eben die *Brechung* verantwortlich ist.

Nun sind diese Begründungen zwar nicht falsch, aber es ist zumindest zweifelhaft, ob sie untrüglich von einem echten Verständnis der physikalischen Sachverhalte zeugen. Es fehlt hier der Raum, um der Frage nachzugehen, wann ein Sachverhalt als *verstanden* gelten kann. Schließlich ist das Verstehen doch eng an Sprache und Begriffsbildung geknüpft. Unstrittig ist jedoch, daß die

Begriffe nicht einfach als Symbol für die eigentlich zu erklärenden Sachverhalte stehen dürfen.

Daß dies auch die Schüler intuitiv fühlen, zeigt die Antwort eines Schülers auf Frage 1, die ich hier buchstabengetreu wiedergebe:

Das Licht wechselt von einem optisch dünneren Medium in ein optisch dichteres und wird dabei zum Lot hingebrochen. Die Winkel lassen sich rechnerisch bestimmen.

...Aber wieso?

An diesem Geständnis der Unkenntnis trotz offenkundig guten Schulwissens zeigt sich also auch auf Schülerseite das Bedürfnis nach einer tieferen Erklärung physikalischer Phänomene.

Zur Frage 5 nach der Natur des Lichts sei nur soviel gesagt, daß dem Licht von den Schülern erwartungsgemäß sowohl Wellen- als auch Teilchencharakter zugeschrieben wurde. Ein gewissen Unbehagen bei dieser Aufteilung kam bei zwei Schülern dadurch zum Ausdruck, daß sie nachschoßen, die genaue Natur des Lichts sei „bis heute noch nicht geklärt“. Dieses Unbehagen soll im nächsten Unterrichtsabschnitt noch geschürt werden, um es dann durch die Feynman'sche Theorie aufzulösen.

Aufgrund des Fragebogens und einer nachfolgenden Diskussion mit den Schülern ergeben sich folgende allgemeine Konsequenzen für den Unterricht:

- Es muß darauf geachtet werden, der Schulphysik nicht nur wieder ein neues Begriffsmuster aufzusetzen, sondern, ganz im Sinne Feynmans, exakte Erklärungen in offener Sprache in den Vordergrund zu stellen.
- Das Bedürfnis der Schüler, zu erfahren, *wieso* sich das Licht so verhält, wie es sich verhält, muß konsequent ausgenutzt werden. Zwischenzeitliche Erfolgserlebnisse im Sinne von „jetzt habe ich es endlich verstanden“ sind unabdingbar.
- Das Unbehagen über das willkürliche Nebeneinander der beiden Erklärungsmuster *Welle* und *Teilchen* muß ausgenutzt werden, um den Wunsch nach einer besseren Lösung zu wecken.

4.2. **Abschnitt 2: Wir stellen fest: Licht verhält sich wie Teilchen („Photonen“)**

Ziel: *Die Schüler sind motiviert, den unbefriedigenden Welle-Teilchen-Dualismus durch eine bessere Theorie zu ersetzen. Sie sehen ein, daß es naheliegt, zunächst vom Teilchenbild auszugehen.*

Richard Feynman pflegte seinen Zuhörern den Dualismus der Quantenphysik folgendermaßen zu verdeutlichen: „Montags, Mittwochs und Freitags benutzen wir das Wellenbild, Dienstags, Donnerstags und Samstags das Teilchenbild und am Sonntag, wenn wir daran denken, auch.“

Einige Schüler konnten mir daraufhin sofort genauere Auskunft geben: „Bei wenigen Photonen brauchen wir das Teilchenbild, bei vielen das Wellenbild.“ Das hatten sie also bisher gelernt. Auf mein gezieltes Nachfragen bemerkte schließlich ein Schüler, daß es doch „irgendwie eine übergeordnete Theorie geben müßte“. Alle waren von der Mitteilung überrascht, daß es solch eine Theorie tatsächlich gibt, und zwar schon seit 50 Jahren. Damit war das Thema der nächsten Stunden klar.

Aus didaktischer Sicht stoßen wir nun auf einen schwierigen Punkt: Die Schüler müssen davon überzeugt werden, daß wir zunächst nicht daran vorbeikommen, Licht als *Teilchen* zu betrachten. Leider gibt in der Schule kein Experiment, das dies eindeutig zeigen könnte. Das ideale Instrument dafür wäre der *Photomultiplier* (genauer: *Photoelektronenvervielfacher*), der einzelne Photonen messen und als Knackgeräusch hörbar machen kann. Er gehört jedoch nicht zur Ausstattung einer Schule. Gelegentlich werden auch andere Effekte zum Beweis der Teilchenstruktur des Lichts herangezogen, wie die quantenhafte Belichtung eines Films [ERB, pers. Komm.]. Ich bin jedoch noch von keinem dieser Phänomene als echtem Beweis überzeugt.

Es gibt zwei Möglichkeiten, die Teilchenstruktur des Lichts einzuführen: entweder wird einfach *postuliert*, daß Licht aus Teilchen besteht („Wir nehmen es einmal an und werden sehen, wie weit wir damit kommen“ ist ja auch eine den Schülern bekannte Formulierung aus der Mathematik) oder es wird Überzeugungsarbeit geleistet, indem über entsprechende Experimente berichtet wird.

Ich habe mich für letztere Möglichkeit entschieden und, wie Feynman, den Photomultiplier in den Mittelpunkt gestellt, denn er ist unverzichtbar für spätere Gedankenexperimente. Da den Schülern der Photoeffekt bereits aus

dem Unterricht bekannt war, konnten sie das Prinzip des Gerätes im Unterrichtsgespräch entwickeln. Es ergaben sich interessante Diskussionen, ob im Lautsprecher bei einer entsprechenden Elektronenlawine nun ein Knacken oder ein Rauschen zu hören sei. Auch der Hinweis, daß der Name *Photomultiplier* ja eigentlich falsch sei (es werden ja Elektronen vervielfacht und nicht Photonen) kam von den Schülern. Durch diese Diskussionen und dem einhergehenden Zwang, sich im Teilchenbild verbal auszudrücken, konnte sich diese Vorstellung bei den Schülern festigen.

In diesem Moment hätte verdeutlicht werden können, daß es sich dabei nicht einfach um das Votum für ein mechanisches Teilchenmodell handelt, sondern daß in einem späteren Schritt unsere Vorstellungen über die Lichtteilchen erst *gebildet* werden müssen. Dies wäre für die meisten Schüler, die das Ergebnis ja nicht kennen, jedoch noch unverständlich geblieben.

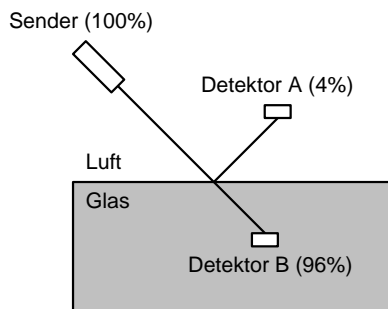
Als beruhigende Erkenntnis für den nachfolgenden Unterricht bleibt festzuhalten, daß die meisten Schüler dieser Lerngruppe zwar das Bedürfnis haben, im Unterricht selbst zu handeln, dieses Handeln jedoch nicht unbedingt als Basteln zu verstehen sein muß, sondern sich genauso gut auf Aktivitäten innerhalb ihrer Vorstellungswelt beziehen kann. Trotzdem muß besonders für diejenigen Schüler, die mit ikonischem Denken Schwierigkeiten haben, der Bezug zur realen Welt, z.B. durch kleine Experimente, gepflegt werden.

4.3. Abschnitt 3: Wir verstehen das Verhalten von Photonen bei Reflexionen an dünnen Schichten nicht

Ziel: *Die Schüler vergegenwärtigen sich das Phänomen der Lichtreflexion an dünnen Schichten und stellen fest, daß sie dies nicht mit mechanistischen Vorstellungen erklären können.*

Die didaktische Aufbereitung dieses Themas entspricht im wesentlichen dem Vorschlag Feynmans [FEYNMAN 1988 p. 27ff.]. Trotzdem soll hier der Unterrichtsverlauf exemplarisch skizziert werden, mit besonderem Akzent auf den Schülerreaktionen.

Versuch: Glasscheiben werden ausgeteilt: „Welches Phänomen fällt Euch auf?“ Natürlich verstehen sie sofort, was gemeint ist: „Man kann sowohl durch die Glasscheibe hindurchsehen, als auch Gespiegeltes erkennen.“ Auch die physikalische Beschreibung gelingt schnell: „Der Großteil des Lichts dringt in die Glasscheibe ein, während ein kleinerer Teil reflektiert wird.“



Nun wird den Schülern mit Hilfe einer Skizze mitgeteilt (s.n.), was genaue Messungen mit Hilfe eines Photomultipliers ergeben: Im Schnitt werden 4% der Photonen reflektiert während 96% durch die erste Grenzschicht hindurchfliegen. (Es muß konsequent die Vokabel *Licht* durch die Vokabel *Photon* ersetzt werden).

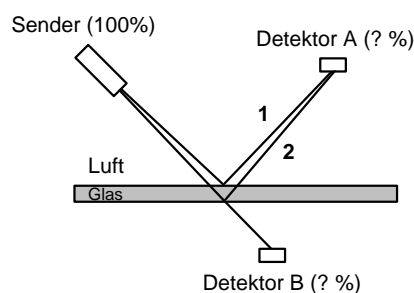
Dies ist natürlich eine Setzung, die die Schüler hinnehmen müssen. Auch ist es eigentlich nur ein didaktischer Trick, denn wie soll der Detektor denn in das Glas kommen? Die Schüler akzeptieren jedoch diese Mitteilung erwartungsgemäß ohne weitere Nachfragen. Die Zahlen stimmen ja mit ihren qualitativen Beobachtungen an der Scheibe überein.

Bevor nun die Physik weiter entwickelt wird, ist es sinnvoll, an dieser Stelle, wo die Physik noch übersichtlich ist, Vereinbarungen über mathematische Schreibweisen zu treffen, die für die späteren Rechnungen unabdingbar sind. Da die Schüler mit den Grundbegriffen der Wahrscheinlichkeitsrechnung vertraut waren, konnten sie den Übergang zur Schreibweise mit Wahrscheinlichkeiten selbstständig durchführen:

- Die Wahrscheinlichkeit, daß der Detektor A klickt, ist 0,04 ($W_A \approx 0,04$).
- Die Wahrscheinlichkeit, daß der Detektor B klickt, ist 0,96 ($W_B \approx 0,96$).

Es erwies sich als günstig, schon an dieser Stelle zu erwähnen, daß die Wahrscheinlichkeiten nichts anderes sind als die Lichtintensitäten, welche die Schüler aus der Optik kennen. Dadurch wird der Bezug zum Vorwissen bzw. zur Realität aufrechterhalten.

Nachdem diese Erkenntnisse gesichert wurden, geht es weiter mit einem vermeintlich einfachen Gedankenexperiment: Wir betrachten die Reflexion an einer dünnen Schicht und fragen uns, auf welchen Wegen die Photonen vom Sender zum Detektor A gelangen können (siehe nebenstehend).



Ich begehe die Unvorsichtigkeit, Gregor (den besten Schüler) an die Tafel zu nehmen. Er zeichnet sofort *alle* möglichen Wege ein, nämlich auch Doppelt- und Dreifachreflexionen innerhalb des Glases, wobei ihn

andere Schüler zunächst nicht verstehen. Ich muß ihn mit seiner Idee auf später vertrösten, denn sonst kämen die anderen Schüler nicht mehr mit. Wir begnügen uns deshalb zunächst nur mit zwei Lichtwegen.

An dieser Stelle zeigt sich deutlich das Problem dieser Lerngruppe: Der Leistungsunterschied zwischen Gregor und den drei schwächsten Schülern ist unerhört groß. Es müssen Wege gesucht werden, beide Gruppen zu bedienen.

„Wie viele Photonen von Hundert kommen denn nun beim Detektor A an?“ Die Schüler nennen nur zögernd die naheliegendste Antwort: Da es zweimal zu einer Reflexion von etwa 4 Photonen kommt, müßten also im Schnitt doppelt so viele, also 8 Photonen bei A ankommen. Ein Schüler schreibt an die Tafel: $W_A = W_1 + W_2 = 0,04 + 0,04 = \underline{0,08}$, und er sagt auch, warum er die Antwort nicht nennen wollte: „Wenn es so einfach wäre, säßen wir ja nicht hier...“. Und tatsächlich verhält sich die Natur anders, wovon sich die Schüler im folgenden Handversuch überzeugen können.

Versuch: Ein Kleiderbügel aus Metall wird zu einem Ring gebogen und in Seifenlauge getaucht. Die entstehende Seifenhaut wird von einem Schüler mit einem Laserpointer fast senkrecht beleuchtet, und der rote Reflexionspunkt an der Wand wird beobachtet. Die Schüler erkennen sofort, daß der Punkt, je nachdem wo die Seifenhaut getroffen wird, heller oder dunkler erscheint, ja sogar hin und wieder fast ganz verschwindet. „Wovon hängt die Lichtintensität ab?“ Etwas schleppend kommt die Einsicht, daß es etwas mit der *Dicke* der Seifenhaut zu tun haben muß (und daß die Seifenhaut unten dicker ist, weil das Wasser nach unten zu fließen versucht). Dieser kleine Versuch hat sich für Motivation und Bildung von Verständnis als sehr günstig erwiesen.

Nachdem die Schüler die Abhängigkeit der Reflexionsintensität von der Schichtdicke nun selbst gesehen haben, werden ihnen die exakten Zahlen wiederum nachgeliefert: „Genaue Messungen ergeben, daß von Hundert Photonen je nach Dicke der Schicht *keine* bis *maximal 16* Photonen am Detektor A ankommen“. Die Wahrscheinlichkeit schwankt also periodisch zwischen 0 und 0,16. Die vermutete Intensitätskurve wird von den Schülern an die Tafel gezeichnet (s.n.). Sie erkennen: Unsere Vermutung ($W_A = 0,8$) stimmt nur

„zweimal am Tag“!



Wir stehen aber noch vor einem weiteren fundamentalen Problem. Daß die Schüler alleine darauf kommen, wäre zu viel verlangt. Sie sehen die Schwierigkeit aber

sofort, nachdem sie auf die richtige Fährte gesetzt wurden: Wir stellen uns vor, daß ein Photon von oben auf das Glas auftrifft und sich nun „entscheiden“ muß, ob es in das Glas eindringt, oder zurückreflektiert wird. Nun sei die Glasdicke aber gerade so groß, daß *keine* Reflexion stattfindet ($W_A = 0$). Das Photon darf in diesem Fall also nicht reflektiert werden und tut es auch nicht. **Woher aber kennt das Photon die Dicke der Schicht, wenn es noch gar nicht in sie eingedrungen ist?**

Dies ist die vielleicht wichtigste Frage der gesamten Unterrichtsreihe. Die völlige Ratlosigkeit der Schüler und ihr fast verzweifertes Nachdenken in der darauf folgenden Diskussion zeugt von der Kraft dieser Problemstellung.

Den Schülern kann gesagt werden, daß sie sich mit ihrer Ratlosigkeit in guter Gesellschaft befinden. Newton, der schon immer an die Teilchenstruktur des Lichtes glaubte, wußte sehr wohl um diese Schwierigkeit, die er mehr schlecht als recht zu lösen vermochte. Bei öffentlichen Veranstaltungen pflegte er diese Frage lieber unter den Teppich zu kehren [Feynman 1988 p. 33ff.].

4.4. Abschnitt 4: Wir erfinden den Zeigerformalismus und verstehen damit qualitativ die Photonenreflexion

Ziel: *Die Schüler verstehen mit Hilfe des Zeigerformalismus die Reflexion von Photonen an dünnen Schichten*

Die Schüler, die das Problem des letzten Unterrichtsabschnittes (*wie entscheidet sich das Photon?*) gelöst wissen wollen, werden nun bewußt zunächst enttäuscht, womit ihnen ein erster Vorgeschmack auf die besondere Logik der Quantenphysik geliefert wird: Wir werden nämlich unser Problem dadurch lösen, daß wir es *konsequent umgehen* (dieser Vorschlag löst Heiterkeit aus). Den Schülern wird statt dessen empfohlen, sich doch zunächst um das zu kümmern, was wir tatsächlich messen und überprüfen können.

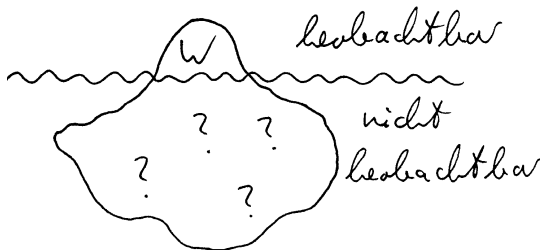
Das folgende Fragespiel erscheint banal, erweist sich aber für die Klärung der Zielrichtung als günstig: „Was wird denn in unserem Reflexionsversuch gemessen?“ „Die Wahrscheinlichkeit W , daß der Detektor klickt“. „Und was können wir dabei *nicht* entscheiden?“ Bei dieser Suggestivfrage ist es klar: „wir können nicht entscheiden, ob das Photon nun den einen oder den anderen Lichtweg genommen hat“. „Wenn wir also nur vom Beobachtbaren ausgehen, welche physikalische Größe muß unsere Theorie liefern, damit wir zufrieden sind?“ Die Schüler werden langsam

ungeduldig: „Die Klickwahrscheinlichkeit W ! Wir müssen also folgende Frage beantworten: **Wie rechnet die Natur die W 's aus?** Dies müssen die Schüler notieren, dick einrahmen und als Leitfrage für den gesamten Unterricht verstehen. Tatsächlich ist die gesamte Quantenphysik nichts anderes als der Versuch, diese Frage zu beantworten.

Feynman würde nun die Lösung mit den Worten vorgeben: „wir lösen das Problem, indem wir einfach ein paar kleine Pfeile aufs Papier zeichnen“ [Feynman 1988 p. 35]. Vor dem Hintergrund aber, daß die Schüler den Begriff des *Vektors* sehr wohl kennen, konnte hier ausprobiert werden, ob sie mit entsprechender Hilfe selbst auf die Grundidee kommen.

Ansatzpunkt ist die Erkenntnis aus dem vorigen Unterrichtsabschnitt, daß wir mit den beiden zur Verfügung stehenden Wahrscheinlichkeiten, nämlich $W_1 = 0,04$ und $W_2 = 0,04$, unser gewünschtes Reflexionsergebnis $W = 0,00\dots 0,16$ offenbar nicht so einfach zusammenbasteln können. Folgender Gedanke wird nun den Schülern vorgestellt:

Das einzige, was wir von der Welt sehen und messen können, sind die W 's. Das sind einfach Zahlen. Die Natur rechnet aber intern mit ganz anderen Größen, die für uns Menschen nicht beobachtbar sind. Die W 's sind bloß das sichtbare Ergebnis einer solchen Rechnung.



Diese kleine Philosophie wird durch ein Schaubild veranschaulicht. Die Schüler erkennen, daß es sich dabei um einen Eisberg handelt. Nur die Spitze des Eisberges, die W 's, können wir sehen. Uns interessiert nun, was unterhalb der „Wasseroberfläche“

passiert und wie die W 's schließlich herauskommen. Es gilt, den Fragezeichen auf die Spur zu kommen.

„Mit welchen *Objekten* mag die Natur intern rechnen?“ ist nun die zentrale Frage. Unser Experiment hat gezeigt: Diese Objekte müssen sich auf dem Wege zum Ergebnis gegenseitig aufheben können (W ist Null, obwohl W_1 und W_2 nicht Null sind). Weiterhin muß man aus diesen Objekten eine Zahl machen können. Auf Anfrage wird die richtige Antwort auch von den schwächeren Schülern intuitiv geliefert: „Es könnte sich um *Vektoren* handeln“. Wie man aus Vektoren Zahlen machen kann, ist den Schülern natürlich auch bekannt, allerdings gehen sie zunächst vom Betrag aus und nicht von der

einfachen Quadrierung $\dot{A}^2 = W$. Mit diesem einfachen Ansatz werden wir das Reflexionsproblem lösen.

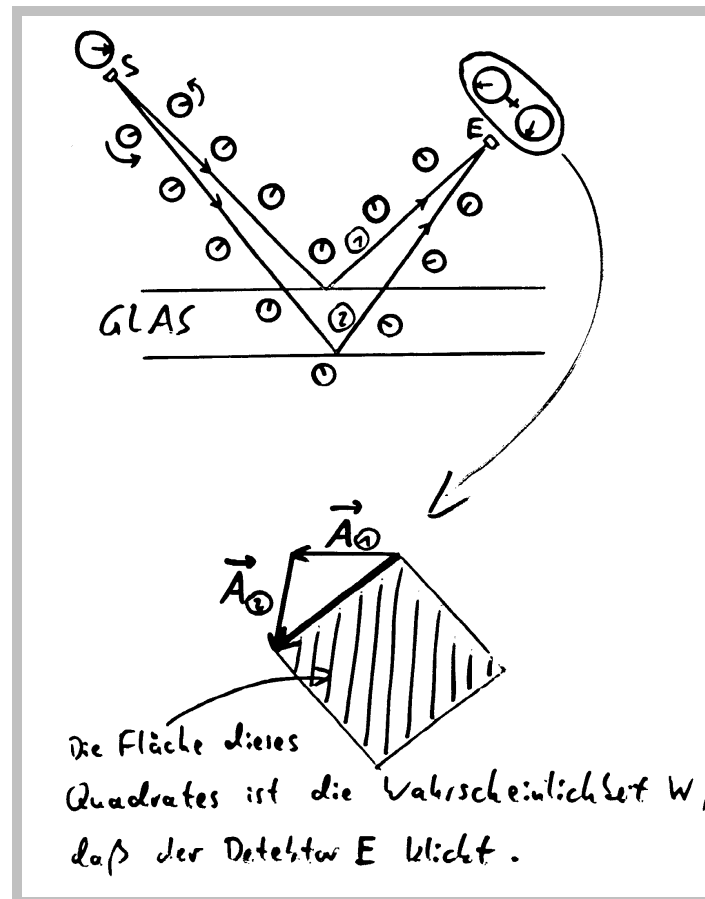
Der hier vorgestellte didaktische Weg zur Einführung der Wahrscheinlichkeitsamplitude \dot{A} mag langatmig anmuten, wird aber ihrem Stellenwert in den nächsten Unterrichtsabschnitten gerecht. Außerdem entspricht die *Suche nach geeigneten mathematischen Objekten* genau einer typischen Vorgehensweise der heutigen theoretischen Physik. Eine Vorgehensweise, die die Schüler hier sicher zum ersten Mal kennengelernt haben. Sie haben dieses kleine Ratespiel, das mit einem Hauch von Geheimnis belegt wurde, jedenfalls positiv aufgenommen.

Ich sehe nun prinzipiell keine redliche Methode, die Schüler den Zeigerformalismus selbst entwickeln zu lassen. Wir sind an einem Punkt angelangt, an dem einfach akzeptiert werden muß, daß die Natur so und nicht anders rechnet. Das Prinzip des Zeigerformalismus wird deshalb ikonisch auf einer Folie dargestellt, und den Schülern wird viel Zeit gelassen, diese Folie zu verstehen. Die untere Hälfte wird zunächst abgedeckt (siehe nächste Seite).

Nach und nach kommen die Erklärungsversuche: „Da sind Vektoren, und wenn sich das Photon weiterbewegt, dreht sich der Vektor mit. Und je nach der Länge des Weges sind sie anders gedreht.“ Diese Antwort birgt das erwartete Mißverständnis, dem sofort entgegengewirkt werden muß. Ich sage deshalb sofort, daß mir etwas an dieser Aussage nicht gefällt, und tatsächlich versteht ein Schüler, was gemeint ist: „Na ja, es geht ja nicht um die einzelnen Photonen, sondern nur um eine *Berechnungsmethode*. Was zwischen S und E passiert können wir sowieso nicht beobachten!“ Genau das ist es.

Jetzt sind wir an einem Scheideweg angelangt, der die Schüler bis zum Ende der Reihe in zwei Lager spaltet. Einige Schüler werden sich nicht mit dem Gedanken anfreunden können, daß sich einzelne Photonen eben *nicht* für bestimmte Lichtwege entscheiden müssen, sondern sozusagen alle möglichen Wege gleichzeitig nehmen.

Trotz regelmäßiger Klarstellungen und bewußter Vermeidung aller mißverständlichen Bemerkungen, Zeichnungen usw. werden die sich drehenden Vektoren von einigen Schülern von nun ab immer wieder mit den *Photonen selbst* identifiziert. Dies ist eine falsche Vorstellung.



OH-Folie (Original farbig): Das Prinzip des Zeigerformalismus. S ist die Photonenquelle (Sender), E der Detektor (Empfänger).*

In diesem Zusammenhang war es sicherlich ungünstig, im vorherigen Unterrichtsabschnitt die Frage gestellt zu haben, wie sich denn das Photon *für einen bestimmten Weg* (Reflexion oder keine Reflexion) *entscheidet*. Auf der anderen Seite war diese Frage äußerst motivierend. Ich vermute, daß man diese Schwierigkeiten erst durch die Einführung eines neuen Optikcurriculums überwinden würde, bei dem das Lichtwegkonzept ab der Mittelstufe im Mittelpunkt steht [ERB 1994a]. Es sei erwähnt, daß auch Feynman seine Leser diesem Mißverständnis an vielen Stellen seines Buches aussetzt, z.B. [FEYNMAN 1988 p. 39]. Er spricht hier unzutreffend von einer „Stoppuhr, die die Bewegung *eines Photons* beschreibt“, wo sie doch nur einen möglichen Lichtweg charakterisiert.

* Die Folie birgt einen Fehler, der der Übersichtlichkeit halber eingebaut und im Unterricht nicht besprochen wurde: Es tritt bei Reflexion an der unteren Grenzschicht eigentlich noch ein Phasensprung von 180° auf.

Aber auch wenn die Einführung des Lichtwegekonzepts didaktisch gelingen sollte, werden viele Menschen, und nicht nur Schüler, prinzipielle Probleme mit den quantenphysikalischen Denkgewohnheiten haben. In der Quantenphysik interessiert uns, wie die Natur *rechnet* und zu Ergebnissen kommt. Nichts weiter. Diese Rechnungen können wir nachvollziehen und erhalten außerordentlich genaue Vorhersagen. Dabei müssen wir akzeptieren, daß wir einen Fehler begehen, wenn wir uns diese Rechnungen zusätzlich mit anschaulichen mechanistischen Vorstellungen ausmalen, nur damit wir sie mit dem sogenannten gesunden Menschenverstand verstehen können. (Warum sollte sich die Natur nach dem menschlichen Vorstellungsvermögen richten?) In dieser Forderung nach Selbstbeschränkung, ja Bescheidenheit, liegt wahrscheinlich die größte Schwierigkeit.

Zurück zum Unterricht. Der Zeigerformalismus ist ja technisch gesehen einfach, so daß alle Schüler (auch die schwächeren) ihn schließlich verstehen. Die Schwierigkeiten ergeben sich später bei der Interpretation. Gregor macht sogar einen weitergehenden Vorschlag: „*Addieren* sich die einzelnen Vektoren der verschiedenen Lichtwege oder wird nicht vielleicht jeweils der *Mittelwert* gebildet?“ Tatsächlich wäre letzteres ja auch eine mathematische Möglichkeit, aber die Natur addiert eben einfach. (Dies zeigt übrigens, wieviel Potential in diesem Thema enthalten ist. Man könnte die Schüler untersuchen lassen, wie die Welt um uns aussähe, wenn die Natur anders rechnete).

Um den Zeigerformalismus als dynamischen Vorgang darzustellen, hat sich der Einsatz einer Computeranimation bewährt, die das periodische Schließen und Öffnen des Quadrates in Abhängigkeit von der Schichtdicke zeigt. Für die Schüler bekam damit die Theorie den gewünschten Bezug zum Seifenhaut-Experiment.

Übung: Um zu überprüfen, ob die theoretischen Überlegungen wirklich als Ganzes angekommen sind, wurden die Schüler gebeten, das Phänomen der variablen Reflexion an einer Seifenhaut in 5 Minuten schriftlich zu erklären. Dabei zeigte sich, daß das Vektorenkalkül zwar technisch verstanden wurde; auf *was* dieses Kalkül aber nun eigentlich angewendet wird (ein Photon? mehrere Photonen? Licht? Lichtwege?) war unter den Schülern jedoch umstritten.

Daraus ergibt sich, daß das Lichtwegekonzept und die Wahrscheinlichkeitsinterpretation in den nachfolgenden Unterrichtsabschnitten

weiter geklärt werden muß. Insbesondere muß geduldig der Identifikation von *Wahrscheinlichkeitsamplitude* und *Photon* entgegengewirkt werden.

4.5. **Abschnitt 5: Wir stellen Rechenregeln für die Wahrscheinlichkeitsamplituden auf und verstehen quantitativ die Photonenreflexion**

Ziel: *Die Schüler können die Beträge der Wahrscheinlichkeitsamplituden berechnen und wissen, daß alle Lichtwege berücksichtigt werden müssen.*

Dieser Unterrichtsabschnitt weicht deutlich vom Feynman'schen Konzept ab. Während Feynman im wesentlichen auf qualitatives Verständnis wertlegt, sollen hier auch quantitative Zusammenhänge erarbeitet werden, die den Schülern die Möglichkeit zum selbständigen Arbeiten bieten.

Die Schüler sollen jedoch immer wissen, was sie tun. Deshalb resumieren sie zunächst den Zeigerformalismus, so wie sie ihn verstanden haben. Gleichzeitig zeigt dies Erfolg oder Mißerfolg des bisherigen Unterrichts:

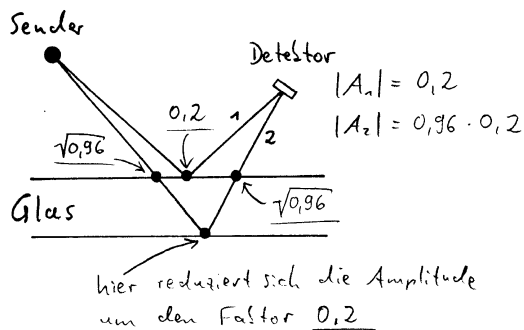
„Wie berechnet man die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses in der Quantenphysik?“ ist die bewußt hoch angesetzte Frage, an deren Antwort sich die Schüler nach und nach herantasten: „Aus dem Quadrat der (wie hieß das noch?) *Wahrscheinlichkeitsamplitude*“ / „Aus der *Summe* einzelner WA“ / „Aus dem *Quadrat* der Summe der einzelnen WA“. „Wofür stehen denn die einzelnen Wahrscheinlichkeitsamplituden?“ „Für die einzelnen Photonen“ / „Nein! Für die einzelnen Wege!“.

Es ist also alles noch etwas unordentlich. Aber jedenfalls wissen sie, daß der Schlüssel zum Verständnis offenbar bei den Wahrscheinlichkeitsamplituden \tilde{A} liegt. Daran anknüpfend wird den Schülern nun bewußt gemacht, daß sie zwar schon über die *Orientierung* von \tilde{A} Bescheid wissen (Drehung längs der Lichtwege), aber noch nicht über die *Beträge* $|\tilde{A}|$.

„Was passiert mit den Beträgen bei der Reflexion und wo passiert es?“ sind nun die Leitfragen. Die letzte Teilfrage ist für die Schüler keineswegs banal; denn daß sich physikalische Parameter an bestimmten Orten sprunghaft ändern, zum Beispiel an Grenzschichten, ist eine Tatsache, die in der Schule selten zu Tage tritt.

Erwartungsgemäß wird diese mathematische Phase fast nur von den besseren Schülern getragen. Sie finden schnell den gesuchten mathematischen Zusammenhang ($|\ddot{A}| = \sqrt{W}$) sowie die „Regeln“ für Glasgrenzschichten:

1. Bei *Reflexion* erfährt die Amplitude eine Verkürzung um den Faktor 0,2.
2. Bei *Durchgang* erfährt die Amplitude eine Verkürzung um den Faktor $\sqrt{0,96}$.



Aber auch die schwächeren Schüler können die Ergebnisse nun als Werkzeug benutzen. Gemeinsam wird nebenstehende Skizze mit den Werten für die $|\ddot{A}_i|$ an der Tafel entwickelt.

Von einem Schüler kommt nun der geniale Hinweis, daß etwas nicht stimmt, daß sich nämlich unsere

Beträge $|\ddot{A}_1| = 0,2$ und $|\ddot{A}_2| = 0,2 \cdot 0,96$ gar nicht aufheben können, und dies widerspräche doch unserem „Reflexionsexperiment“! Diese erhoffte Bemerkung zeugt von tiefem Verständnis des Stoffes und ist entsprechend ermutigend. Außerdem wird deutlich, wie ein *Gedankenexperiment* von den Schülern für bare Münze genommen wird; denn beim echten Seifenblasenversuch kam es ja nie ganz zu totaler Auslöschung.

Bei der nachfolgenden angeregten Diskussion zwischen Schülern ergeben sich zwei mögliche Lösungen des Problems: Entweder ist die *Rechnung* richtig und wir haben einen Meßfehler begangen, oder unsere *Messung* ist richtig und etwas stimmt an unserer Theorie nicht. Diese Argumentation hat einen hohen Stellenwert, *ist sie doch ein genaues Abbild der üblichen Diskussionen in der Gegenwartsphysik*

Auf die Lösung kommen die Schüler erst, nachdem ich bemerke: „Vielleicht ist ja beides richtig, vielleicht haben wir nur etwas vergessen?“. Der Groschen fällt zunächst bei Gregor, der schon im vorigen Unterrichtsabschnitt mehr als zwei Lichtwege einzeichnen wollte: „Wir haben ja gar nicht *alle* Wege berücksichtigt!“ Den schwächeren Schülern ist diese Idee zunächst wieder unklar, da sie Mehrfachreflexionen innerhalb von Glas nicht kennen. Der Hinweis auf Glasfaser hilft. Gregor rechnet dagegen schon im Kopf und gibt als Ergebnis kund, daß es jetzt „hinkommt“.

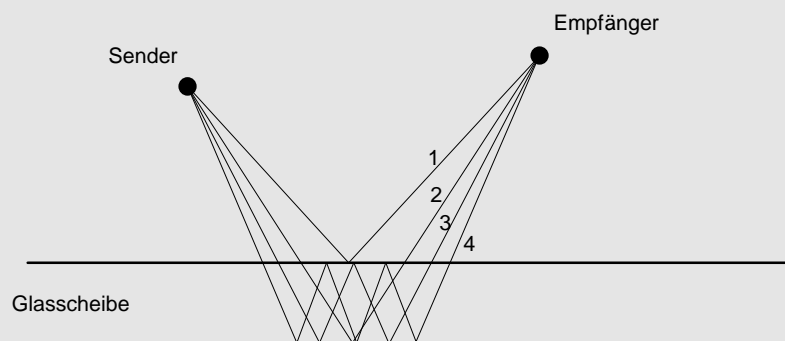
Das kleine Wunder, daß es tatsächlich genau hinkommt, können die Schüler nun mittels eines Übungsblattes erleben.

ÜBUNG

Die Reflexion von Licht an einer Glasscheibe als Summe von Lichtwegen

Versuche zeigen, daß die Reflexion von Licht an einer Glasscheibe von der Dicke der Glasscheibe abhängt. Es werden zwischen 0% und 16% der Photonen reflektiert.

- 1) Es gibt mehrere Wege, auf denen Licht vom Sender über die Glasscheibe zum Empfänger gelangen kann.
Zeichnen Sie die vier einfachsten Möglichkeiten ein (Lichtwege 1 bis 4)!



- 2) Die Beträge der Wahrscheinlichkeitsamplituden $|\ddot{A}|$ verringern sich bei Reflexion an einer Grenzschicht jeweils um den Faktor $\sqrt{0,04} = 0,2$ und beim Übergang Luft-Glas bzw. Glas-Luft jeweils um den Faktor $\sqrt{0,96}$. Berechnen Sie mit diesen Werten die Beiträge $|\ddot{A}_i|$ der einzelnen Lichtwege!
- 3) Gegen welchen Wert tendiert die *Summe* der Beträge der Amplituden $|\ddot{A}_1| + |\ddot{A}_2| + |\ddot{A}_3| + \dots$?
Welcher Wahrscheinlichkeit W für das Auftreffen von Photonen (d.h. welcher relativen Lichtintensität) entspricht dies?
- 4) Berechnen Sie den maximalen Betrag der Gesamtamplitude und die entsprechende Intensität für einen Empfänger *unterhalb* der Glasscheibe!

**Arbeitsblatt zur Berechnung der Beträge der Wahrscheinlichkeitsamplituden
(mit Lösung der Aufgabe 1)**

Die Lösungen der Aufgaben 2 bis 4:

- 2) Lichtweg 1: $|\dot{A}_1| = 0,2 = 0,20000$
 Lichtweg 2: $|\dot{A}_2| = 0,96 \cdot 0,2 = 0,19200$
 Lichtweg 3: $|\dot{A}_3| = 0,96 \cdot 0,2^3 = 0,00768$
 Lichtweg 4: $|\dot{A}_4| = 0,96 \cdot 0,2^5 = 0,00031$
 ...
- 3) $|\dot{A}_1| + |\dot{A}_2| + |\dot{A}_3| + \dots = 0,4 \Rightarrow \underline{W=0,16}$
- 4) Es ergibt sich: $|\dot{A}| = 1 \Rightarrow \underline{W=1}$

Die Unterschiede in der Bearbeitung waren erwartungsgemäß groß. Während vier Schüler die Aufgaben in knapp 15 Minuten lösten, hatten die anderen drei schon Schwierigkeiten, die Fragen zu verstehen. Der Kontrast zwischen unverbindlichem Unterrichtsgespräch und mathematisch-trockenem Arbeitsblatt war ihnen offenbar zu stark. Erst mit Einhilfe konnten sie die Rechnungen angehen. Diese drei Schüler erbrachten übrigens später viel bessere Ergebnisse bei graphisch-anschaulichen Aufgaben (siehe Kapitel 4.7).

Besonders wichtig ist es nun, daß sich die Schüler über die *Bedeutung* der Ergebnisse klar werden. Die Ergebnisse zeigen, daß unsere Theorie die gemessenen Werte exakt reproduziert*. Aber wir haben noch mehr erreicht: Im Unterrichtsgespräch wir den Schülern bewußt gemacht, daß wir soeben mit unserer Theorie eine Voraussage gemacht haben! Wenn sie stimmen soll, *müssen* nämlich im Glas Mehrfachreflexionen stattfinden, daß also alle Lichtwege zu berücksichtigen sind. Was liegt näher, als mit dem neu gewonnenen Vertrauen zur Theorie ein Postulat aufzustellen: **Licht nimmt grundsätzlich alle möglichen Lichtwege**. Den Schülern ist die Tragweite dieses Satzes natürlich noch nicht bewußt, zunächst reicht es aber, wenn sie sich ihn einfach merken.

Zum Abschluß sei noch erwähnt, daß kein Schüler folgenden kleinen Fehler bemerkt hat: Wir hatten ja immer nur die *Beträge* der Amplituden für unsere Rechnungen benutzt. Wenn wir also von der maximal möglichen Amplitude sprechen, so gehen wir davon aus, daß *alle Vektoren die gleiche Orientierung* besitzen. Offensichtlich ist dies bei unendlich vielen Lichtwegen unmöglich. Damit ergibt sich eine Korrektur: *Komplette* Auslöschung ist eben doch nicht möglich! Ich hatte diesen Fehler zu spät entdeckt, so daß er nicht Unterrichtsthema wurde. Bei Wiederholung der Unterrichtsreihe erscheint seine Diskussion jedoch als sehr fruchtbar, ist doch eine solche Kehrtwendung ein typisches Beispiel für die Überraschungen der theoretischen Physik.

* Auch der mathematische Beweis wäre für Schüler der Oberstufe möglich, handelt es sich doch um geometrische Reihen, die Stoff der Klasse 11 sind. Z.B. gilt für die Summe der Lichtwege, die durch das Glas gehen:

$$|\dot{A}_2| + |\dot{A}_3| + \dots + |\dot{A}_\infty| = 0,96 \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^n (0,2)^{2k+1} = 0,96 \cdot 0,2 / (1-0,2^2) = 0,96 \cdot 0,2 / 0,96 = \underline{0,2}.$$

Im Unterricht wurde aus Zeitmangel auf diese mathematischen Zusammenhänge verzichtet.

4.6. **Abschnitt 6: Mit Hilfe des Zeigerformalismus verstehen wir die Reflexion am Spiegel und am Gitter**

Ziel: Die Schüler können den Zeigerformalismus auf Reflexionsphänomene beim Spiegel und beim Gitter anwenden und sind in der Lage, die entsprechenden Cornu-Spiralen zu zeichnen.

Dieser Unterrichtsabschnitt soll hier nur kurz skizziert werden. Sie lehnt sich eng an den didaktischen Weg Feynmans an, der dort nachgelesen werden kann [Feynman 1988 p. 49-62]. Methodisch wird dieser Weg hier zusätzlich durch kleinere Handversuche begleitet, so zum Beispiel die Reflexion eines Laserstrahls (Laserpointer) an einer Gitterfolie, bei der bekanntlich der Einfallswinkel *nicht* unbedingt dem Ausfallswinkel entspricht.

Wichtigstes Handwerkszeug dieser und aller nachfolgenden Unterrichtsabschnitte sind dabei die *Cornu-Spiralen*, also die Aneinanderreihung der Wahrscheinlichkeitsamplituden zu einem S-förmigen Gebilde, an dem man schließlich die resultierende Lichtintensität ablesen kann (siehe Kapitel 2.2). Es konnte festgestellt werden, daß alle Schüler, insbesondere auch die schwächeren, Spaß an dieser geometrischen Konstruktion hatten und sie schließlich richtig einsetzten. Für die Schüler hob sich dieser geometrische Ansatz positiv von der vorherigen mathematischen Behandlung ab und erzeugte einen Motivationsschub.

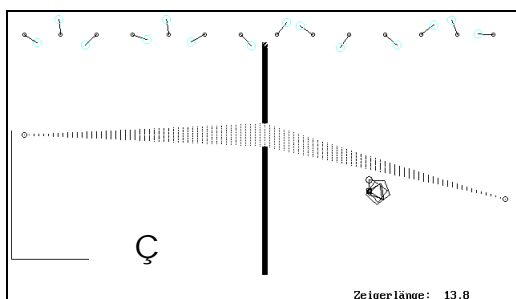
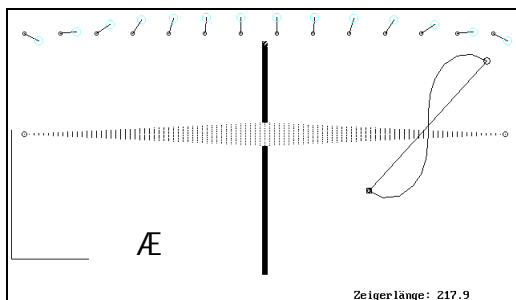
Die mathematikfreie Darstellung bedingte allerdings, daß ein wichtiger Punkt nur sehr oberflächlich behandelt wurde, nämlich der Beweis, daß der Wegunterschied zwischen zwei „benachbarten“ Lichtwegen um so größer ist, je weiter sie vom direkten (geradlinigen) Weg entfernt sind. Es war nicht einfach, die Schüler auf anschauliche Weise von dieser wichtigen Eigenschaft von Lichtwegen zu überzeugen. Im Grunde mußten sie es schließlich glauben. Dabei wäre es, genügend Zeit vorausgesetzt, für Schüler einer Oberstufe durchaus möglich, den exakten Beweis zu führen: Es genügt, eine Schar von (im einfachsten Falle geraden) Lichtwegen geeignet zu parametrisieren und die Ableitung zu bestimmen. Der Graph der Ableitung wird sein Minimum bei demjenigen Lichtweg haben, der dem strahlenoptischen entspricht. Selten genug ist es möglich, die Oberstufenmathematik so direkt auf die Physik anzuwenden. Allerdings zeigte eine Befragung am Ende der Reihe, daß Schüler die Begeisterung darüber nicht teilen, sondern die Mathematik als wenig hilfreich empfinden (siehe Kap. 6.1).

Zusätzlich zum Feynman'schen Programm konnte noch, angeregt durch einen Schüler, eine andere Eigenschaft des Lichts erkannt werden: Der Schüler bemerkte, daß, wenn wir unser Kalkül mit der Cornu-Spirale ernst nehmen, es eigentlich keinen Reflexionspunkt gibt, sondern vielmehr einen ganzen Reflexionsbereich. Dies ist natürlich vollkommen richtig und führt direkt auf die Frage, was denn passiert, wenn wir unseren Spiegel sehr klein machen. Ersetzen wir nun den kleinen Spiegel durch einen kleinen Spalt, befinden wir uns sofort im nächsten Unterrichtsabschnitt.

4.7. **Abschnitt 7: Mit dem Zeigerformalismus berechnen wir die Beugung am Spalt und sagen einen bisher unbeachteten optischen Effekt voraus**

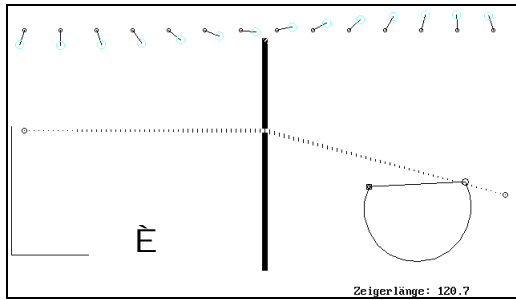
Ziel: Die Schüler können Cornu-Spiralen für verschiedene Spaltgrößen und Aufpunkte erstellen und können diejenige Spaltbreite berechnen, bei der die Intensität minimal sein müßte.

Nach dem bisherigen Erfolg, den die Cornu-Spirale bei den Schülern gehabt hat, können sie nun weiter mit ihr spielen. Diesmal wird häufig der Computer eingesetzt, der vor den Augen der Schüler die Cornu-Spiralen dynamisch entstehen läßt. Benutzt wurden leicht geänderte Programme von Franz Bader [BADER 1994P], die mir von ihm freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden. Obwohl die Schüler den Computer selbst nicht bedienen,



wurde sein Einsatz mit positiven Bemerkungen wie „warum nicht gleich mit dem Computer?“ bedacht. Trotzdem ist es für ein nachhaltiges Verständnis unverzichtbar, daß die Schüler die Cornu-Spiralen auch selbst zeichnen.

Die nebenstehenden Bildschirm-schnappschüsse zeigen die Verhältnisse bei (1) einem Spalt auf der Zentralachse, (2) dem gleichen Spalt mit verschobenem Aufpunkt und (3) einem engen Spalt bei gleichem Aufpunkt. (Es werden 14 Lichtwege berücksichtigt, deren Wahrscheinlichkeitsamplituden am oberen



Bildrand aufgetragen sind). Die Schüler erkennen, daß nach der Theorie für den verschobenen Aufpunkt die (relative) Intensität beim engen Spalt größer ist. Es wird der entsprechende Versuch durchgeführt, und obwohl die Schüler natürlich alle wissen, daß Licht von

einem engen Spalt „verschmiert“ wird, habe ich das Gefühl, als ob sie diesen Effekt zum ersten Mal wirklich *bewußt* sehen. Sie stellen fest, daß unsere Theorie wieder einmal das Richtige vorausgesagt hat.

Das Übungsblatt auf der nächsten Seite diene nun sowohl den Schülern als auch dem Lehrer als Lernzielkontrolle. Insbesondere sollten auf diese Weise auch die drei leistungsschwächeren Schüler die Möglichkeit haben, sich in Ruhe zu artikulieren; denn im Unterrichtsgespräch war die Dominanz der vier anderen Schüler groß. Die Schüler hatten 10 Minuten Zeit für diese Mischung aus Reproduktion und Transfer.

Von 6 anwesenden Schülern konnten 4 Schüler die Cornu-Spiralen fehlerfrei einzeichnen. Bei den zwei anderen Schülern waren sie zwar qualitativ richtig, die einzelnen Zeiger wurden aber verschieden groß gezeichnet. Bei fast allen Schülern fehlte zunächst die Resultierende, die nach Aufforderung aber nachgeliefert wurde. Schwierigkeiten gab es bei dem Wort „Intensität“. Daß die Intensität das *Quadrat* der Resultierenden ist, war offenbar schon wieder in Vergessenheit geraten. Die Frage 3 wurde von der Hälfte der Schüler richtig beantwortet. (Den anderen war nicht klar, ob sich die Frage nun auf die Theorie oder auf den Versuch bezog). Die wörtliche Antwort eines Schülers zu Aufgabe 3 lautet:

Verändert sich die Intensität?

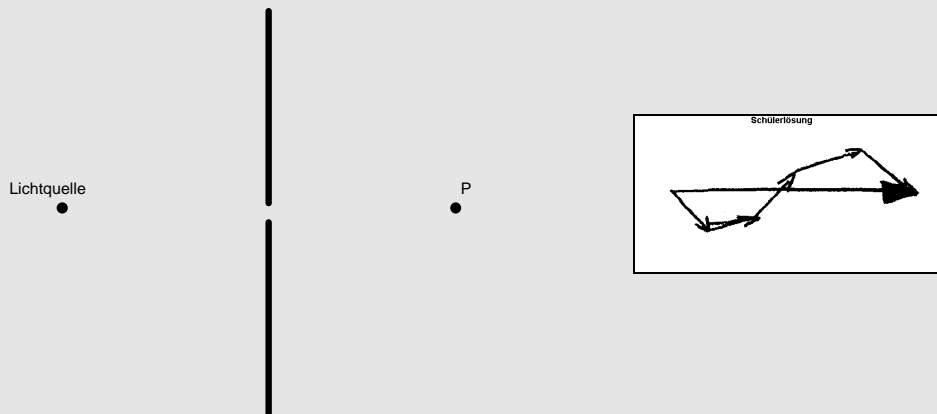
Nein, da sich bei größerem Spalt nur an den Enden der Spirale etwas ändert (chaotische Spirale).

Der resultierende Vektor wird prinzipiell nur durch die mittleren fünf Vektoren bestimmt.

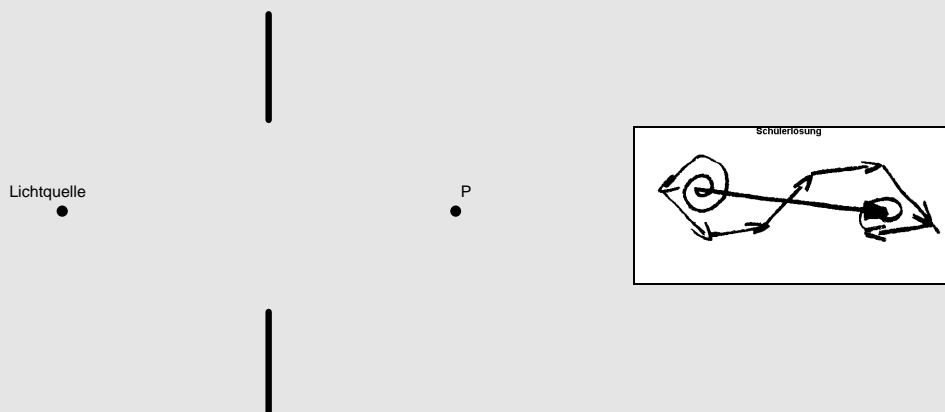
ÜBUNG*Die Lichtintensität hinter einem Spalt*

Skizzieren Sie jeweils die Cornu-Spirale und die resultierende Intensität am Punkt P.

- 1) für einen sehr kleinen Spalt (5 Lichtwege sind zu berücksichtigen).



- 2) für einen sehr großen Spalt (die einzelnen Wahrscheinlichkeitsamplituden müssen hier nicht eingezeichnet werden).



- 3) Verändert sich die Intensität, wenn ich den Spalt noch größer mache?
Entspricht das der täglichen Beobachtung?

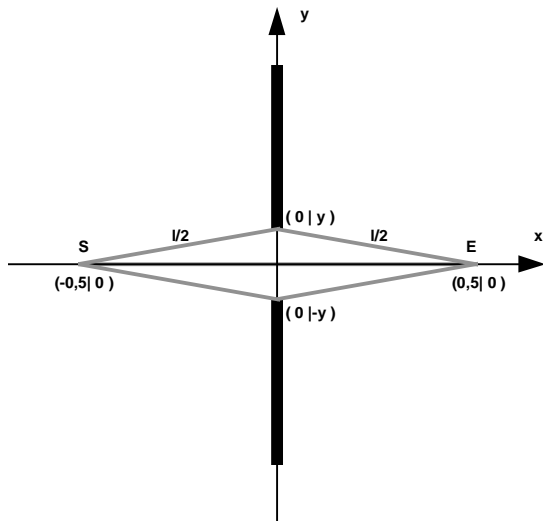
Interessant an der Antwort ist die dynamische Vorstellung von den Dingen. Wahrscheinlich ist das ein Ergebnis der Computeranimationen.

Insgesamt ist das Ergebnis erfreulich, besonders deshalb, weil auch die schwächeren Schüler halbwegs korrekte Antworten geliefert haben. Wenn auch die mathematischen Fähigkeiten dieser Schüler nicht ausreichend sind, können sie doch mit dem anschaulichen Kalkül der Cornu-Spirale umgehen.

Trotzdem soll nun zur Abwechslung und zur Vorbereitung auf das Abschlußexperiment erneut eine kurze mathematische Phase beginnen. Diese Entscheidung ist keinesfalls zwingend, besonders für diese kurze Unterrichtsreihe. Ich wollte jedoch ausprobieren, in wieweit Feynmans qualitatives Konzept für die Schule überhaupt mathematisierbar ist, auch im Hinblick auf eventuelle längere Unterrichtseinheiten.

Es soll dabei jedoch so spielerisch wie möglich vorgegangen werden. Es wird gefragt: „Wie oft haben sich die Spiralenden (die „Hörner“) gedreht?“ „Wie könnte man berechnen, wann sie sich gerade *zehn* mal gedreht haben?“

Natürlich erscheint die letzte Aufgabe den Schülern zunächst als unglaublich kompliziert. Sobald jedoch eine Skizze (s.u.) erstellt wurde, meldet sich ein Schüler bereits mit der richtigen Frage, wie schnell sich denn die



Vektoren drehen? Den Schülern wird mitgeteilt, daß bei rotem Licht der Vektor alle 650 nm eine ganze Drehung vollführt. Sie sehen natürlich sofort, daß es sich dabei um die *Wellenlänge* handelt. Zum ersten Mal kommt also hier ein Begriff aus der Wellenoptik zum Vorschein. Andere Autoren vermeiden auch ihn, indem sie die Wellenlänge in *Basislänge* umtaufen [ERB 1992].

Mit Hilfe der Skizze gelingt es Gregor, selbständig die gesuchte Formel in allgemeiner Form an der Tafel zu entwickeln und den anderen zu erklären. Mit $\lambda = 650 \text{ nm}$ und $n = 10$ ergibt sich damit für die Spaltbreite: $2y = \underline{3,6 \text{ mm}}$.

$$\text{I: } l - 1 = n \lambda$$

$$\text{II: } (l/2)^2 = 0,5^2 + y^2$$

$$\Rightarrow 2y = \sqrt{(n\lambda + 1)^2 - 1}$$

Zusätzlich macht Gregor eine großartige

Bemerkung: „Eigentlich müßte die Intensität bei Vergrößern des Spaltes doch *sinken*, wenn sich nämlich die Spirale gerade einzurollen beginnt!“ Darüber wird angeregt diskutiert, und allen wird diese Voraussage schnell klar. Andere Schüler bemerken weiter, daß sich die Intensität ja sogar periodisch ändern müßte, wenn der Spalt immer weiter geöffnet wird.

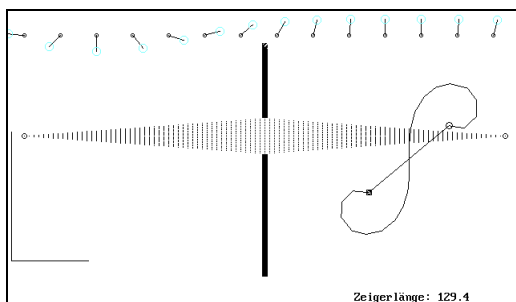
Es sei erwähnt, daß diese Szene für mich den größten Erfolg in dieser Unterrichtsreihe darstellte: Die Schüler entwickelten den Unterrichtsfortgang plötzlich selbständig weiter, indem sie untereinander engagiert über die Theorie und ihre Folgen diskutierten.

Wir verständigen uns darauf, Gregors Vorhersage zu überprüfen. „Bei welchem Drehwinkel erwarten wir das Minimum?“ Wir einigen uns auf etwa 270° , also $\frac{3}{4}$ einer Drehung; denn dann scheinen die beiden Spiralenden minimalen Abstand zu haben. (In welchem Maße dieser Unterricht einen sehr guten Schüler anregen kann, zeigt die Bemühungen Gregors, dieses Problem exakt zu lösen. Er liefert mir am Ende einer Stunde eine Lösung, indem er über die Projektion der Spirale integriert und dann das Minimum bestimmt).

Nach unserer Formel errechnen die Schüler für $n = \frac{3}{4}$ eine Spaltbreite von 0,99 mm. *Wenn unsere Theorie denn stimmt, müßte also bei einer Spaltbreite von ca. 1 mm auf der Zentralachse ein Intensitätsminimum vorliegen.* Diese Voraussage werden die Schüler im nächsten Abschnitt überprüfen.

4.8. **Abschnitt 8: Die Voraussage aus Abschnitt 7 wird durch ein Experiment exakt bestätigt**

Ziel: *Die Schüler haben mit eigenen Augen gesehen, daß bei einer Spaltbreite von ca. 1 mm die Intensität minimal ist.*

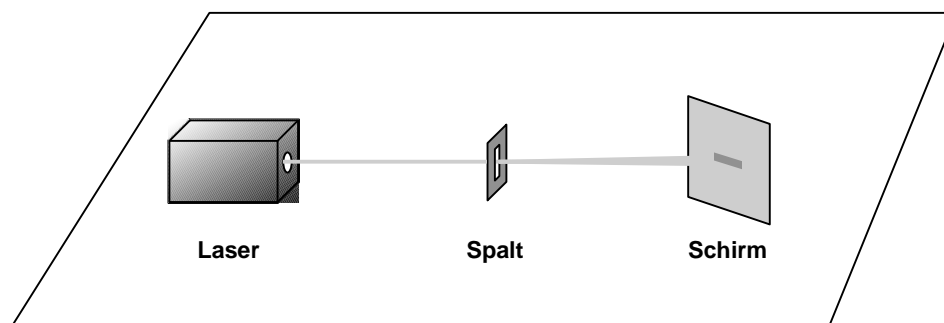


Da die Schüler von der Computeranimation der Cornu-Spiralen bisher sehr angetan waren, wird hier wieder ein entsprechendes Programm parallel zum Versuch gestartet. Damit haben die Schüler die seltene Möglichkeit, Theorie (Monitor, s.n.) und Wirklichkeit (Versuchsaufbau) gleichzeitig zu

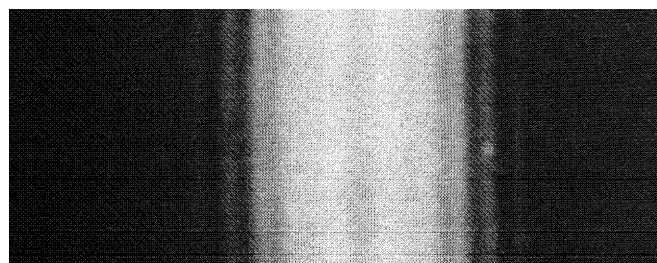
beobachten. Dies wurde von den Schülern bereitwillig aufgenommen und mit flapsigen Kommentaren wie: „Man sieht jetzt förmlich die Spiralen im Licht“ bedacht.

Der Versuchsaufbau ist bereits vorbereitet, könnte natürlich bei genügend Zeit von den Schülern auch selbst entwickelt werden: Ein aufgeweiteter Laserstrahl trifft durch einen veränderbaren Spalt auf einen Schirm. Die Abstände sind jeweils 50 cm groß. Man beachte, daß man nicht, wie in der Wellenoptik, zur Vereinfachung der Rechnungen gezwungen ist, „paralleles Licht“ zu benutzen. Das macht den Versuch für die Schüler sehr handlich und überschaubar.

Damit die Nebenmaxima abseits der Zentralachse nicht stören, werden sie zunächst mit Papier abgedeckt. Zusätzlich wird hinter dem Schirm ein handelsüblicher Belichtungsmesser angebracht, mit dem die relative Lichtintensität sehr genau gemessen werden kann.



hier!



**Bei einer bestimmten Spaltbreite entsteht ein Intensitätsminimum auf der Zentralachse
(Photo von R. Erb)**

Ein Schüler wird gebeten, den Spalt langsam zu öffnen. Der Belichtungsmesser zeigt die steigende Intensität an, bis die Nadel bei einer bestimmten Spaltbreite wieder zurückschwingt. Die Spaltvorrichtung wird nun unter ein Meßmikroskop gelegt, so daß die Schüler mit einem Blick die Spaltbreite

ablesen können: Es ergab sich ca. 1,2 mm. Die Differenz zum theoretischen Wert 1 mm ist, wie sich später herausstellt, darauf zurückzuführen, daß der Schüler das Minimum nicht gut getroffen hat. (Eine Genauigkeit von 0,05 mm ist prinzipiell möglich). Nachdem das Papier weggenommen wurde, betrachten die Schüler nun das gesamte Schirmbild, wo sich tatsächlich in der Mitte das vorausgesagte Minimum zeigt. Auch die nachfolgenden Maxima und Minima können durch weiteres Öffnen des Spaltes bestätigt werden.

Trotz der Diskrepanz zwischen Messung und Theorie wurde von den Schülern der Ausgang des Experiments als Beweis für die Richtigkeit unserer Theorie akzeptiert, denn schließlich wechselte die Intensität periodisch, genau wie vorhergesagt. Während ich es schade fand, daß sie durch den Ablesefehler nun nicht erfahren haben, mit welcher erstaunlicher Genauigkeit Theorie und Experiment übereinstimmen, war dies für sie von untergeordneter Bedeutung. Ihnen reichte die subjektive Beobachtung des Phänomens aus.

4.9. Abschnitt 9: Wir verstehen die Funktion einer Linse und die Tatsache, daß sich Licht geradlinig ausbreitet

Ziel: *Die Schüler können das Kalkül der Photonenoptik auf verschiedene optische Phänomene anwenden.*

Aus Zeitmangel konnte dieser letzte Abschnitt nur angeschnitten werden, z.B. konnte auf die Brechung nicht eingegangen werden. Für die Schüler sollten am Ende der Reihe noch einmal die besonders angenehmen anschaulich-qualitativen Überlegungen im Mittelpunkt stehen. Sie sollten erfahren, wie einfach es ist, mit ihrem neu erworbenen Wissen die verschiedensten optischen Phänomene zu erklären.

Insbesondere die geradlinige Ausbreitung des Lichts und die Funktion einer Linse wurden kurz behandelt, wobei dem didaktischen Weg Feynmans [FEYNMAN 1988 p.70-72] gefolgt wurde. Aus logischer Sicht ist dabei problematisch, daß sich Licht in Glas angeblich langsamer ausbreitet, als in Luft. Während Feynman auf dieses Thema am Ende seines Buches noch ausführlich eingehen kann, müssen es die Schüler einfach glauben. „Die Wahrscheinlichkeitsamplituden drehen sich in jedem Medium verschieden schnell“ wurde von den Schülern allerdings akzeptiert, ohne weitere Erklärungen einzufordern.

Schwieriger war es für die Schüler wiederum, zu verstehen, daß der Wegunterschied benachbarter Wege umso größer wird, je weiter sie vom schnellsten Weg entfernt sind (siehe auch Seite 30).

Ansonsten erwies sich der didaktische Ansatz „wir möchten erreichen, daß alle Zeiger in die gleiche Richtung zeigen“ als erfolgreich. Die Schüler machten das Spiel mit und schoben in Gedanken und an der Tafel verschieden starke Glasstücke in den Strahlengang. Die Überraschung war mit Händen zu greifen, als vor ihren Augen die Form einer Linse entstand.

Dies war das Ende der letzten Stunde, und die Schüler konnten mit dem Hinweis entlassen werden, daß sie nun endlich, wenn auch erst ganz am Ende ihrer Schulzeit, so richtig verstanden haben, wie eine Linse funktioniert.

5. Wie könnte die Unterrichtssequenz fortgeführt werden?

Ganz im Sinne der *Weiterführenden Optik* sollten nach der Behandlung der Brechungsphänomene nun die spezifisch quantenphysikalischen Fragestellungen noch stärker in den Mittelpunkt rücken.

Ein sinnvoller Übergang erscheint mir dafür die Physik des Doppelspaltes, mit dem Problem: *Teilt sich das Photon auf?* Dieser Weg führt sofort auf die Problematik der Veränderung der Versuchsbedingungen durch die Messung (Detektor in jedem Spalt) und schließlich auch zur Unschärferelation, also auf zutiefst quantenmechanische Sachverhalte (siehe [FEYNMAN 1988 p. 94ff.]). Dabei werden es die Schüler als angenehm empfinden, daß sie kein neues Kalkül oder neue Denkstrukturen dazulernen müssen. Der bisher erlernte Zeigerformalismus kann, mit einer kleinen Erweiterung, weiterhin angewendet werden. Die Erweiterung besteht darin, daß die Schüler nun zwischen *abhängigen* und *unabhängigen* Ereignissen unterscheiden müssen. Im letzteren Fall müssen die Wahrscheinlichkeiten *getrennt* ausgerechnet und danach addiert werden, wobei es dann keine Interferenzeffekte mehr gibt.

Wie immer man auch weitermacht, das Abstraktionsvermögen der Schüler wird auf eine harte Probe gestellt werden, aber immerhin werden sie die Quantenphysik, so ist die Hoffnung, nicht als etwas völlig Neues empfinden, sondern als die natürliche Fortsetzung des bisherigen Stoffes.

6. Zusammenfassende Analyse

6.1. Was haben die Schüler vom Unterricht gehabt?

Folgende Indikatoren werden für die Einschätzung der Wirkung des Unterrichtes auf die Schüler herangezogen, wobei nicht nur der fachliche Lernzuwachs Berücksichtigung finden soll:

- Beiträge der Schüler zum Unterricht
- Ergebnis der schriftlichen Übungen
- Schüleraufzeichnungen
- Gespräche mit den Schülern außerhalb der Schulstunden
- Fragebögen (einer zur Unterrichtsgestaltung und einer zum Sachinhalt)

Zwei Fragebögen wurden den Schülern nach der letzten Physikstunde ausgehändigt. Insbesondere wegen der fachlichen Fragen sollten die Schüler sie mit einigen Tagen Abstand zur letzten Stunde beantworten, damit der Blick auf die neuen Denkstrukturen frei wird und nicht von mechanischen Gedankengängen überlagert wird. Dies erwies sich jedoch aus praktischen Gründen als ungünstig. Die Schüler waren nach der letzten Stunde kaum noch in der Schule anwesend; ich selbst habe sie nicht mehr gesehen. Außerdem haben zwei Schüler, u.a. wegen Physik, das Abitur nicht bestanden, und für einen dritten wurde es sehr knapp. Diese drei hatten deshalb überhaupt keine Lust mehr, noch etwas freiwillig zu tun. Auch für die anderen Schüler hatte das mündliche Abitur Priorität. Entsprechend enttäuschend war der Rücklauf: Vier Schüler (von sieben) haben mir die Fragebögen ausgefüllt zurückgegeben, aber nur zwei von ihnen haben sich die Zeit genommen, auch die fachlichen Fragen komplett zu beantworten. Allerdings gehen die Antworten in gleiche Richtungen, so daß sie hier, mit aller Vorsicht, trotzdem genutzt werden.

Die Beantwortung des Fragebogens zur Unterrichtsgestaltung (siehe Seite 40) ergab ein recht einheitliches Bild. Es wird hier darauf verzichtet, die Aussagen dieses Fragebogens noch einmal separat aufzuführen. Die Ergebnisse sind auf dem Fragebogen selbst vermerkt. Sie entsprechen im übrigen dem Tenor der persönlichen Gespräche.

1	Der Unterricht hat mir gefallen	1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 3 4 5	Der Unterricht hat mir nicht gefallen
2	Gemessen an anderen Schulerfahrungen war der Unterricht besser als gewohnt	<input checked="" type="checkbox"/> 1 2 3 4 5	Gemessen an anderen Schulerfahrungen war der Unterricht schlechter als gewohnt
3	Der Stoff war interessant	<input checked="" type="checkbox"/> 1 2 3 4 5	Der Stoff war eigentlich nicht interessant
4	Im Unterricht ging es um die Quantentheorie	1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 3 4 5	Im Unterricht ging es um Optik
5	Ich habe das Gefühl gehabt, die Theorie einfach vorgesetzt zu bekommen, ohne selbst etwas dazu beitragen zu können	1 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3 4 5	Ich habe das Gefühl gehabt, die Theorie Schritt für Schritt selbst zu entdecken
6	Ich konnte dem Unterricht immer folgen	1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 3 4 5	Ich konnte dem Unterricht nie richtig folgen
7	Mich haben die Erklärungen der optischen Phänomene mehr interessiert als die „philosophischen“ Fragestellungen	1 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3 4 5	Mich haben die „philosophischen“ Fragestellungen mehr interessiert als die Erklärungen der optischen Phänomene
8	Ich habe beim Unterricht oft das Gefühl gehabt, plötzlich etwas Wichtiges verstanden zu haben	1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 3 4 5	Ich habe beim Unterricht nie das Gefühl gehabt, etwas Wichtiges verstanden zu haben
9	Ich kann mir die behandelten optischen Phänomene (z.B. Linse, Gitter, Spalt) jetzt besser erklären	1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 3 4 5 (große Streuung)	Ich kann mir die behandelten optischen Phänomene jetzt genauso gut oder schlecht erklären wie vorher
10	Die mathematischen Teile des Unterrichts haben viel für das Verständnis gebracht	1 2 3 <input checked="" type="checkbox"/> 4 5	Die mathematischen Teile des Unterrichts haben nichts für das Verständnis gebracht
11	Es gab genügend Möglichkeiten, sich am Unterricht aktiv zu beteiligen	1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 3 4 5	Es gab zu wenig Möglichkeiten, sich am Unterricht aktiv zu beteiligen
12	Es wurde zu viel mit dem Computer gearbeitet	1 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3 4 5	Es wurde zu wenig mit dem Computer gearbeitet
13	Es gab zu viele Arbeitsblätter und Übungen	1 <input checked="" type="checkbox"/> 2 3 4 5	Es gab zu wenig Arbeitsblätter und Übungen
14	Es gab zu viele Experimente	1 2 <input checked="" type="checkbox"/> 3 4 5	Es gab zu wenige Experimente
15	Ich finde die Feynman-Optik anschaulicher als die Wellenoptik	<input checked="" type="checkbox"/> 1 2 3 4 5	Ich finde die Wellenoptik anschaulicher als die Feynman-Optik
16	Mein Vorwissen in der Wellenoptik hat mich beim Verständnis der Feynman-Optik behindert	1 2 3 <input checked="" type="checkbox"/> 4 5	Mein Vorwissen in der Wellenoptik hat mir für das Verständnis der Feynman-Optik genutzt
17	Die Feynman-Theorie ist ziemlich kompliziert	1 2 3 4 <input checked="" type="checkbox"/> 5	Die Feynman-Theorie ist eigentlich einfach
18	Ich habe ein Gefühl dafür bekommen, wie die Natur funktioniert	<input checked="" type="checkbox"/> 1 2 3 4 5	Ich habe dieses Gefühl nicht bekommen (oder weiß nicht, was das sein soll)

**Der Fragebogen zum Unterricht
(die gemittelten Ergebnisse sind eingerahmt)**

Abschließende Fragen
Welche Vorstellung haben wir vom Licht?

- 1) Eine Linse kann Licht in einem Punkt bündeln.
Wie macht die Linse das?
- 2) Läßt man Licht durch einen sehr engen Spalt auf eine Leinwand fallen, so entsteht kein scharfes Bild des Spaltes, sondern ein „verwaschener“ ausgedehnter Leuchtfleck.
Warum ist dies so?
- 3) *Was sind Ihrer Meinung nach die zwei oder drei wichtigsten Grundaussagen der Feynman-Theorie?*
- 4) In der Feynman-Theorie wurde viel von den möglichen Lichtwegen zwischen zwei Punkten gesprochen, und jemand fragt Euch schließlich entnervt, wo denn nun die Photonen in *Wirklichkeit* entlangfliegen.
Wie würden Sie versuchen, den Sachverhalt möglichst genau zu erklären?

Vier abschließende Fragen zum Verständnis

Die Beantwortung der fachlichen Fragen 1 und 2 (siehe Seite 41) gelang beiden Schülern, indem sie die entsprechende Cornu-Spirale zeichneten. *Wie* die Cornu-Spirale zustandekommt, wurde von beiden Schüler stichwortartig, jedoch richtig, erklärt. Eine Vermischung mit früheren (z.B. wellenoptischen) Vorstellungen war nicht zu erkennen.

Zu Frage 3: Die drei wichtigsten Grundaussagen der Feynman-Theorie sind nach Ansicht der beiden Schüler:

1. *Die Natur rechnet mit Vektoren, die wir nicht sehen.*
2. *Die Lichtintensität ergibt sich durch die Resultierende der Cornu-Spirale/durch das Quadrat der Summe von Wahrscheinlichkeitsamplituden.*
3. *Man muß alle Lichtwege berücksichtigen/das Photon nimmt alle Wege.*

Frage 4 wurde von einem Schüler mit dem Hinweis beantwortet, daß dies die Physiker nicht interessiere, da es nicht beobachtbar sei, wobei er noch hinzufügte, daß es es sich ja nur um eine Rechenmethode handele. Der zweite

meinte, dies sei eine philosophische Frage und konterte mit der Gegenfrage „was ist denn Wirklichkeit?“ ...

Die Frage, was die Schüler vom Unterricht gehabt haben, soll durch die folgenden sechs Thesen beantwortet werden, die danach im einzelnen untersucht werden. Man könnte diese Thesen im nachhinein als Lernziele an den Anfang stellen. Sie sind geordnet vom Konkreten zum Allgemeinen:

1. Die Schüler können das graphische Kalkül der Cornu-Spirale auf verschiedene optische Phänomene anwenden und sie sich damit erklären.
2. Die Schüler kennen die Grundaussagen der Photonenoptik und verstehen damit verschiedene optische Phänomene.
3. Sie kennen die Denkansätze einer quantenphysikalischen Theorie und sind sich deren erkenntnistheoretischen Schwierigkeiten bewußt.
4. Sie kennen wesentliche Denkansätze der Gegenwartsphysik.
5. Sie haben erfahren, daß sich mathematische Gesetzmäßigkeiten genau auf die Phänomene der Natur abbilden lassen.
6. Sie haben das Gefühl bekommen, zu verstehen, wie die Natur „funktioniert“ und wissen, daß dies gar nicht so kompliziert ist.
7. Die Schüler haben erfahren, daß die Beschäftigung mit der Gegenwartsphysik interessant ist und Freude bereiten kann.

Der Unterschied zwischen Punkt 1 und 2 besteht darin, daß es zum einen um das mechanische Kalkül bzw. um Begriffsmuster geht, mit denen man sich scheinbar einiges erklären kann, zum anderen um *echtes* Verständnis durch die Grundprinzipien der Theorie. Letzteres fordern die Schüler selbst ein (siehe dazu Seite 15). Zumindest diejenigen Schüler, die den fachlichen Fragebogen bearbeitet haben, konnten die Grundaussagen der Theorie richtig herausfiltern und für ihre Erklärungen einsetzen. Im Unterricht wurden hin und wieder Zusammenfassungen des Wesentlichen verlangt, mit unterschiedlichem Erfolg: Während die drei leistungsschwachen Schüler *nie* in der Lage waren, eine Resümee zu liefern, gelang dies den anderen mit kleineren Einhilfen. Ich gehe deshalb davon aus, daß etwa die Hälfte der Schüler das Wissen um die Grundaussagen der Feynman'schen Photonenoptik besitzen.

Was das reine Kalkül angeht (Punkt 1), muß die Frage der *Übung* gestellt werden. Sie stand nicht im Zentrum des Unterrichts. Außerdem darf die rege Beteiligung während des Unterrichts nicht darüber hinwegtäuschen, daß die Schüler wegen des unverbindlichen Charakters der Stunden zu Hause keine

zusätzliche Arbeit leisteten. Es ist also davon auszugehen, daß die meisten Schüler nach ein paar Wochen nicht mehr in der Lage sein werden, eine entsprechende Aufgabe ohne Rückgriff auf Aufzeichnungen zu lösen.

Können sie die Aufgabe *mit* Rückgriff auf ihre Aufzeichnungen lösen? Die Sichtung der Schüleraufzeichnungen hat ergeben, daß sie zwar im Prinzip vollständig sind, jedoch insgesamt recht ungeordnet aufeinander folgen. Zum Beispiel fehlen Überschriften. Trotzdem sind im Prinzip alle notwendigen Informationen in Form von Merksätzen und Beispielen vorhanden. Damit könnten Schüler, die nachträglich Ordnung in ihre Aufzeichnungen bringen, eine praktische Aufgabe (z.B. Spaltversuch) lösen. Von den mathematischen Teilen sind allerdings diejenigen zwei bis drei Schüler ausgeschlossen, die damit schon während des Unterrichts Schwierigkeiten hatten.

Unter den *Denkansätzen der Quantentheorie* bei Punkt 3 verstehe ich insbesondere den Begriff der Wahrscheinlichkeit sowie die Beschränkung auf Beobachtbares. Beides war zwar immer implizit Teil des Unterrichts, wurde jedoch nur selten eigenständiges Thema (siehe z.B. Seite 21). Insbesondere das Wahrscheinlichkeitsprinzip wurde selten als eigenständiger Pfeiler der Theorie hervorgehoben. Die Beschränkung auf Beobachtbares war dagegen häufig Anlaß zu Diskussionen und machte sich auch bei der Beantwortung des Fragebogens (Frage 4) bemerkbar. In solchen Unterrichtsphasen waren sich die Schüler der Problematik des „anschaulichen Verstehens“ bewußt. Aber gerade bei solchen Diskussionen, die die Schüler auch untereinander führten, waren wieder nur die vier besseren Schüler dabei. Nur sie werden wissen, was eine quantenphysikalische Theorie ausmacht.

Der Geist der Gegenwartsphysik (Punkt 4) steckte im Grunde in jedem Teil des Unterrichts. Der Unterricht *selbst* war also für die Schüler ein Beispiel für ihre Denkgewohnheiten. Dazu gehört, neben der Reduktion auf wenige Grundprinzipien, der hohe Stellenwert der Theorie und die Tatsache, daß erst das Experiment über die Theorie entscheidet. Obwohl dies nicht explizit thematisiert wurde, ist anzunehmen, daß sich die Schüler das Paradigma der Gegenwartsphysik *Theorie $\hat{=}$ Voraussage $\hat{=}$ Experiment* (und nicht umgekehrt!) allein durch den Unterrichtsrythmus eingepägt haben; die meisten Schüler haben sich ja an dem Spiel der Voraussagen beteiligt. Auf der anderen Seite fehlt ihnen noch die bewußte Reflexion über diese neue Methode.

Was die Mathematik angeht (Punkt 5), hat wohl nur ein einziger Schüler (Gregor) die Faszination über das Zusammenspiel zwischen Mathematik und Natur gespürt. Alle anderen haben die Mathematik als störend empfunden.

Punkte 6 und 7 haben die Schüler durch den Fragebogen und in persönlichen Gesprächen selbst beantwortet, darunter auch einer der leistungsschwächeren Schüler. Sie glauben, etwas von der Natur verstanden zu haben, wobei alles offenbar gar nicht so kompliziert ist. Und Spaß gemacht hat es auch noch.

Zum Schluß seien die Lernerfolge noch einmal nach dem Leistungsvermögen der Schüler differenziert. Während die Unterrichtsbeteiligung sich in den Feynman-Stunden insgesamt verbessert hat, hat sich die relative Leistungskonstellation zwischen den Schülern nicht geändert. Wenn Noten zu vergeben wären, so unterschieden sie sich kaum von denen der parallel laufenden normalen Physikstunden.

Die Lerngruppe ließ sich in drei Gruppen einteilen: Neben einem außerordentlich begabten Schüler, der häufig weiterführende Ideen entwickelte, gab es drei Schüler, die sich immer interessiert und mit guten Beiträgen am Unterricht beteiligten. Die dritte Gruppe bestand aus drei Schülern, die schon von der Sitzordnung her deutlich von den anderen getrennt waren und im Unterricht kaum Aktivität zeigten. Nur als es um graphische Techniken, wie die der Cornu-Spirale ging, konnten sie befriedigende Leistungen erbringen. Zum Beispiel haben sie das Übungsblatt aus dem Unterrichtsabschnitt 7 (siehe Seite 31) gut bearbeitet. Was haben *diese* drei Schüler vom Unterricht gehabt?

Man ist geneigt anzunehmen, daß die guten Schüler vom Unterricht am meisten profitiert haben. Dies ist vom absoluten Fachwissen sicherlich richtig und wurde oben bereits besprochen. Vielleicht sollte man aber auch den *relativen* Kenntniszuwachs betrachten, d.h. ihn mit den sonstigen Schulerfahrungen und -leistungen vergleichen. Man mag auch bedenken, daß die geringe Unterrichtsbeteiligung der drei Schüler in seltsamen Gegensatz zu den persönlichen Gesprächen steht, in denen sie davon sprechen, daß der Physikunterricht Spaß gemacht habe, eine Erfahrung, die ihren eigenen Wert hat. Auf der anderen Seite muß akzeptiert werden, daß diese Schüler keine Beziehung zu theoretisch-abstraktem Denken hatten (und deshalb in einem Physik-Leistungskurs denkbar schlecht aufgehoben waren). Diese Unterrichtsreihe, die ja eben *nicht* auf dem sogenannten gesunden Menschenverstand fußte, ist deshalb an diesen drei Schülern zu großen Teilen vorbeigegangen.

6.2. Sollte der Unterricht in dieser Form wiederholt werden?

Die Photonenoptik Feynmans kann in der hier vorgestellten Form, (also ca. 8 Stunden, 13. Jahrgangsstufe) erfolgreich unterrichtet werden, wenn es gelingt, die Schüler für das Thema zu begeistern. Dies klingt banal, ist aber in diesem Falle von größter Wichtigkeit, da das Thema überwiegend an die Vorstellungskraft der Schüler appelliert, sie sich also nicht auf ein mechanisches Kalkül zurückziehen können. Schüler ohne abstraktes Denkvermögen werden den Stoff trotzdem als schwierig empfinden. Insgesamt ergab die Beurteilung der Schüler keine signifikanten Unterschiede zu ihren Ergebnissen aus dem traditionellen Physikunterricht.

Die Abfolge der Sachinhalte sowie die didaktische Reduktion, angelehnt an Feynmans Vorschlag, hat sich bewährt. Es hat sich weiterhin gezeigt, daß die für die Schule wichtigen Elemente der Schülerbeteiligung und der Übungsmöglichkeiten prinzipiell eingebracht werden können. In wieweit sich das Thema auch für längere Unterrichtssequenzen mit entsprechenden Leistungskontrollen und vielleicht sogar für das Abitur eignet, wurde hier nicht untersucht, erscheint aber mit einer entsprechenden Ausdehnung der mathematischen Aspekte möglich.

6.3. Was kann verbessert werden?

Es soll geprüft werden, was an der Struktur der Unterrichtsreihe sowie an stundenübergreifenden didaktischen bzw. methodischen Entscheidungen im Sinne der Schüler verbessert werden kann. Dagegen wird *nicht* untersucht, ob man die Photonenoptik vielleicht auch auf ganz andere Art einführen kann. Natürlich kann man das (siehe z.B. [KUH 1985]), eine derartige Diskussion würde jedoch bei weitem den Rahmen dieser Arbeit sprengen.

Feynmans Zeigerformalismus wurde in diesem Unterricht anfangs nicht en bloc vorangestellt, sondern es wurden zunächst Teile erarbeitet (z.B. Amplituden- *oder* Phasenbetrachtung), um ganz bestimmte Phänomene zu erklären. Damit konnte die Unterrichtsreihe abwechslungsreich gestaltet werden, mit stetem Wechsel zwischen Theorie und Experiment. Die Schüler dankten es mit dem Hinweis, daß sie den Unterricht nicht als langweilig empfanden. Auf der anderen Seite barg diese Vorgehensweise die Gefahr, daß die Schüler die Theorie als Ganzes aus dem Blickfeld verlieren. Immer wenn sie

bisher Erlerntes zusammenfassen sollten, zeigten sich entsprechende Schwierigkeiten. Es kann deshalb empfohlen werden, *noch häufiger die grundlegenden Aussagen der Theorie von den Schülern resumieren zu lassen*. Dies dient auch dem Ziel, sie nicht wieder nur ein von den wichtigen Prinzipien losgelöstes Begriffsschema zu lehren. In gleichem Zusammenhang sollte auch auf größtmögliche Übersichtlichkeit geachtet werden, die sich in den Aufzeichnungen der Schüler niederschlagen muß. Zum Beispiel bieten sich hier *zusammenfassende Überschriften* an, auch wenn diese für Schüler der Oberstufe vielleicht schon aus der Mode gekommen sind.

Während die anschaulichen Elemente des Unterrichts erwartungsgemäß gut ankamen, sind die Schüler der Meinung, daß die Mathematik nicht viel zum Verständnis beigetragen hat (siehe Kapitel 6.1). Soll die Mathematik also noch weiter reduziert werden? Ich glaube, eine Stundenanzahl von acht ist ungefähr die Grenze, bei der beides möglich wäre. Bei weniger Stunden ist es sicher sinnvoll, die Mathematik ganz aus dem Spiel zu lassen, so wie es Feynman in seinem Buch vorführt, welches ja ursprünglich aus einer vierstündigen Vorlesung hervorgegangen ist. Bei mehr als acht Stunden bekommen allerdings die Vorgaben der Rahmenpläne ein größeres Gewicht, in denen die Mathematik als fester Bestandteil der Oberstufenphysik aufgeführt ist. Auch persönlich halte ich es für ein unverzichtbares Lernziel, den Schülern die Verquickung von Physik und Mathematik vor Augen zu führen. Allerdings ist es offenbar nicht gelungen, die Mehrzahl der Schüler für dieses Zusammenspiel zu begeistern. Abhandlungen darüber, warum es so schwierig ist, Schüler für die Mathematik zu gewinnen, füllen ganze Bibliotheken. Hier sei nur erwähnt, daß derjenige Schüler, der mit Mathematik souverän umgehen konnte, diese auch mit Freude einsetzte und mit ihr physikalisches Verständnis erlangte. Dagegen mußten sich andere so sehr auf die Mathematik konzentrieren, daß sie dabei die Physik aus den Augen verloren. Vor diesem Hintergrund wäre *eine entsprechende Binnendifferenzierung* denkbar.

In wieweit mathematische Formulierungen Einzug halten sollen, muß auch vor dem Hintergrund möglicher Leistungskontrollen (z.B. Klausuren) entschieden werden. Dabei sollte jedoch darauf geachtet werden, daß die Mathematik nicht dazu mißbraucht wird, die Photonoptik Feynmans „schulgerecht“ zu machen.

Vielleicht gibt die Kritik der Schüler an der Menge der Arbeitsblätter und Übungen zusätzlich Aufschluß über das Mathematikproblem. Dabei gab

es nur zwei (!) Arbeitsblätter während der acht Unterrichtsstunden, die jeweils in etwa 15 Minuten bearbeitet wurden. Die Vermutung liegt nahe, daß einige Schüler wegen des unverbindlichen Charakters dieser Unterrichtsreihe eine Konsumhaltung einnahmen, die zwar im Unterrichtsgespräch nicht deutlich wurde, sich aber in dem Moment zeigte, als größere Anstrengungen verlangt wurden. Angesichts der Tatsache, daß die Schüler selbst tätig werden müssen (und eigentlich auch wollen), halte ich es für bedenklich, die Anzahl der Übungen und Arbeitsblätter zu reduzieren. Allerdings können die Übungen auch anders gestaltet werden, zum Beispiel unter Benutzung des Computers:

Im Unterricht wurde der Computer zwar eingesetzt, jedoch waren die Schüler zum passiven Zuschauen verurteilt. *Besser wäre es, wenn die Schüler selbstständig mit den entsprechenden Computerprogrammen umgehen und Ergebnisse erarbeiten.* Dabei ist die Software, die zur Feynman-Optik existiert, von den Schülern durchaus leicht zu erlernen (siehe Kapitel 3.2). Voraussetzung ist natürlich genügend Zeit (ab zehn Stunden vielleicht) und ein Computerarbeitsplatz für jeden Schüler. Bei vermehrtem Computereinsatz und höherer Mathematisierung sollten die anschaulichen Programmen von Franz Bader durch die genaueren von Roger Erb ersetzt werden. Der entsprechende Pascal-Quelltext findet sich in [ERB 1994a p. 141ff.].

Neben diesen prinzipiellen Änderungsvorschlägen gibt es in der Rückschau einige unterrichtspraktische Unstimmigkeiten, die im Wiederholungsfall beseitigt werden können. Zum Beispiel wurden die Brechung am Wasser sowie das Phänomen der Farben nur am Rande erwähnt, obwohl die Aufmerksamkeit der Schüler durch den einführenden Fragebogen (siehe Seite 15) gerade dorthin gelenkt wurde. *Beide Phänomene könnten stärker in den Unterrichtsabschnitten 9 bzw. 4 betont werden.*

Was das Ziel der vorliegenden Arbeit angeht, war es ungünstig, die beiden abschließenden Fragebögen außerhalb der Schule beantworten zu lassen (siehe Seite 39). Durch den relativ schwachen Rücklauf wurden wichtige Indikatoren für den Lernerfolg verschenkt. Ich habe die Verbindlichkeit der meisten Schüler überschätzt.

Zum Abschluß möchte ich noch auf die *Gefahr hinweisen, die philosophische Komponente vor den Schülern überzubewerten.* Auch wenn der Lehrer sich von den entsprechenden Fragestellungen begeistern läßt und sie interessanter findet als die optischen, müssen die Schüler noch lange nicht genauso empfinden. Der Fragebogen und die Unterrichtserfahrung zeigt, daß

bei ihnen beide Aspekte gleich hoch im Kurs stehen. Ich wage es, dies als ein positives Zeichen für die Physik zu deuten. Es hat sich hier nämlich gezeigt, daß die meisten Schüler die seltsamen Wege der Natur vorurteilsfrei und tolerant akzeptieren und sie als so einleuchtend empfinden, daß eine philosophische Diskussion, die oft nur den Zweck hat, die Physik zu verbiegen, damit wir sie in unser mechanistisches Weltbild pressen können, gar nicht notwendig erscheint. Diese offene Einstellung ist notwendig für eine zukünftige, vielleicht seltsame, aber dafür einfache Physik.

7. **Schlußwort**

Am Ende der Physikstunde ging der Lehrer auf den Schüler Richard Feynman zu und sagte: „Richard, you look bored. I'll show you something interesting.“ Und er erklärte Feynman, wie die Natur, wenn sie die Wahl hat, immer den Weg mit der kleinsten Wirkung (*engl.*: 'action') nimmt. Dieses Prinzip, das Joseph de Lagrange im Jahre 1788 mathematisch formulierte, begeisterte Feynman so sehr, daß es ihn sein ganzes Leben nicht losgelassen hat. All seinem physikalischen Denken lag es zugrunde. Er pflegte es grundsätzlich als Postulat an den *Anfang* einer Theorie zu stellen, so daß sich alles andere aus diesem einen Prinzip ergab.

Ungeachtet der Tatsache, daß die größten Physiker seiner Zeit es auf anderen Wegen versuchten, hielt Feynman an seiner Vorgehensweise fest. Und er behielt recht. Seine größtes Werk, die Quantenelektrodynamik, deren Teil die Photonoptik ist, beschreibt die Natur besser, als je eine Theorie zuvor.

Daß die Natur offenbar nur ganz wenige grundlegende Prinzipien kennt, mit denen sich die gesamte physikalische Welt erklären läßt, ist eine der aufregendsten Erfahrungen der Physik. Diese Erfahrung sollte unseren Schülern so früh wie möglich nahegebracht werden; denn dann werden sie voller Sympathie feststellen, daß die Natur alles unnötig Komplizierte vermeidet und im Grunde unglaublich einfach ist.

8. Literatur

- Bader, F.: Optik und Quantenphysik nach Feynmans QED. Physik in der Schule. 32 (1994) 7/8. p. 250-256
- Bader, F [P].: QED-Programme zur Quantenphysik. Schroedel. Hannover, 1994. [Software]
- Bleichroth, W. *et. al.*: Fachdidaktik Physik. Aulis. Köln, 1991. p. 202ff
- Erb, R. [a]: Optik mit Lichtwegen. Westarp. Magdeburg, 1994
- Erb, R. [b] und Schön, L.: Lichtwege – zentrales Element unseres Optik-Lehrgangs. GDCP 94, 1994
- Erb, R.: Fermat und Feynman in der Oberstufe. In: Behrendt (Hg.). Zur Didaktik der Physik und Chemie: Probleme und Perspektiven. Vorträge auf der Tagung für Didaktik der Physik/Chemie in Hamburg, September 1991. Leuchtturm. Alsbach, 1992. p. 291-293
- Feynman, R.P.: QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie. Piper. München, 1988
- Feynman, R.P.: Surely you're joking, Mr. Feynman. Counterpoint. London, 1985
- Gleick, J.: Genius. Vintage. New York, 1992
- Kuhn, W.: Methodisches Konzept zur Elementarisierung der Quantenelektrodynamik. Praxis d. Nat.-Wiss.-Physik. 7/34, 1985
- Lichtfeld, M. 1991: Schülervorstellungen in der Quantenphysik und ihre möglichen Veränderungen durch den Unterricht. Westarp. Essen, 1991
- Mehra, J.: The beat of a different drum. Claredon. Oxford, 1994
- Rahmenplan Berlin: Vorläufiger Rahmenplan für Unterricht und Erziehung. Gymnasiale Oberstufe - Physik. Senatsverwaltung für Schule, Berufsbildung und Sport. Berlin, 1984
- Zech, F.: Grundkurs Mathematikdidaktik. Beltz. Weinheim, 1977

Für interessante Anregungen und nützliche Materialien möchte ich mich bedanken bei Franz Bader, Roger Erb, Hajo Hensel, Prof. Karl-Heinz Lotze, Lutz Schön und Peter Wessels.