

Optik in der Oberstufe

Roger Erb

Universität Gesamthochschule Kassel

(aus: *Physik in der Schule* 33 (1995) 2. S. 281-284)

”Ich habe (...) zu wiederholten Malen gesagt, dass ich nicht behaupte und auch nie behauptet habe, in die Geheimnisse der Natur eingeweiht zu sein, deren Wege dunkel und verborgen sind. Ich habe es nie unternommen, in sie einzudringen, ich habe der Natur bezüglich der Lichtbrechung bloß eine bescheidene Hilfe geometrischer Art angeboten, in der Annahme, sie käme ihr zustatten.”

(Pierre de Fermat, zitiert nach [Sim90, S. 232])

Die ”bescheidene Hilfe”, deren Veröffentlichung Fermat an dieser Stelle rechtfertigt, ist das nach ihm benannte Prinzip, welches wie folgt formuliert werden kann:

Das Licht nimmt zwischen zwei Punkten den Weg, für den es im Vergleich zu möglichen Nachbarwegen die kürzeste (allgemein: extremale) Zeit benötigt.

1 Unser Bild vom Licht

In der Schule begegnet uns die Optik zu verschiedenen Zeitpunkten, und gerne stellen wir uns das Licht in Abhängigkeit von der Fragestellung als Strahl, Welle oder Teilchen vor – Darstellungen, die in der Physik seit geraumer Zeit verwendet werden.

Fermat hingegen hatte nicht die Absicht, die zu seiner Zeit bekannten optischen Phänomene auf ein anschauliches Modell zurückzuführen. Ihm lag daran, zu zeigen, dass aus seinem Extremalprinzip das Brechungsgesetz abgeleitet werden kann, wenn man annimmt, dass sich das Licht in optisch dichteren Medien langsamer ausbreitet als in optisch dünneren. Da sein Prinzip auch die geradlinige Ausbreitung und die Reflexion des Lichtes einschließt, konnten somit alle Phänomene der geometrischen Optik beschrieben werden.

Mit seiner Veröffentlichung löste Fermat 1662 einige Kritik aus. Zum einen widersprach er mit seiner Annahme über die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes in (optisch) unterschiedlich dichten Medien der Ansicht Descartes. Zwar sollte Fermat, wie wir heute wissen, in dieser Frage Recht behalten, er konnte sich gegen Descartes Autorität aber kaum durchsetzen, und an eine experimentelle Überprüfung war zu der damaligen Zeit, in der noch fraglich war, ob dem Licht überhaupt eine Ausbreitungsgeschwindigkeit zugeordnet werden kann, nicht zu denken. Zum anderen liefert seine Ableitung dasselbe Brechungsgesetz, das schon zuvor bekannt war

und das auch Descartes mit seinen falschen Annahmen über die Lichtgeschwindigkeit abgeleitet hatte. Schließlich setzte er sich mit der Formulierung des Prinzips dem Verdacht aus, der Natur den Anspruch des "vernünftigen" Handels zusprechen zu wollen.

Fermat aber betont in seiner Erwiderung einem Kritiker gegenüber, dass es ihm gerade fern gelegen habe, eine Aussage über die "Geheimnisse der Natur" zu machen. (Anders als Maupertius, der bei seiner Suche nach Prinzipien zur Beschreibung mechanischer Vorgänge von einem allgemeinen "Sparsamkeitsprinzip der Natur" ausging [Sza87].)

In der Tat gelingt es ihm durch seine "bescheidene Hilfe geometrischer Art" die Phänomene der geometrischen Optik zusammenfassen zu beschreiben, ohne eine Aussage über ein verborgenes Wirkungsprinzip oder über die Entität des Lichtes selbst zu machen.

Aus diesem Grund erscheint uns das Fermat-Prinzip besonders geeignet, den Optikunterricht in der Mittelstufe zu leiten [Erb92]. Aber auch für die Beschreibung der Phänomene außerhalb der geometrischen Optik kann es uns den Weg weisen.

2 Elemente des Optikunterrichts in der Oberstufe

Konkurrierende Lichtmodelle, die über die geometrische Optik hinausgehen, sind insbesondere eine klassische Teilchenvorstellung und eine Wellenvorstellung, die, jede für sich, in der Lage sind, bestimmte Aspekte der Ausbreitung des Lichtes gut zu beschreiben.

Newton sah sich gezwungen, seine Vorstellung von der Ausbreitung des Lichtes durch Korpuskel um weniger anschaulich Elemente (Periodizität) zu erweitern, um auch die Interferenz einbeziehen zu können. Dagegen erfuhr das von Fresnel erweiterte Huygenssche Modell durch die Arbeit Maxwells eine starke Bestätigung. Experimente zur Wechselwirkung zwischen Licht und Materie wiederum brachten aber Ergebnisse, mit denen die Aussagen der elektromagnetischen Lichttheorie nicht ohne weiteres in Einklang zu bringen waren. So bemerkt Planck in einem Vortrag 1919:

"... die Huygenssche Wellentheorie zeigt sich, wenigstens in einem wesentlichen Bestandteil, ernstlich bedroht, und die Ursache davon ist die Entdeckung gewisser neuer Tatsachen... Die einzig mögliche Erklärung für diese eigentümliche Tatsache scheint zu sein, ... dass die Lichtenergie sich nicht völlig gleichmäßig nach allen Richtungen ausbreitet, in endlos fortschreitender Verdünnung, sondern dass sie stets in gewissen bestimmten, nur von der Farbe abhängigen Quanten konzentriert bleibt" [Pla91, S. 75]

Es stellte sich heraus, dass man, um alle Aspekte der Ausbreitung des Lichtes zu berücksichtigen, eine neue, umfassende Theorie – die Quantenelektrodynamik – benötigt.

Im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe hingegen wird die Optik in der Regel nicht als geschlossenes Gebiet behandelt, sondern ihre Inhalte werden zum einen der Wellenlehre und zum anderen der Quantenphysik zugeordnet.

3 "Stimmige Denkwege sind lustvoll"[Cio93]

Unser Erkenntnisstreben ist darauf gerichtet, möglichst alle zu einem bestimmten Bereich gehörenden Phänomene schlüssig in einem Konzept zu beschreiben. Es kommt auch dem Schülerinteresse entgegen, wenn ein Gesetz auf eine Reihe von Experimenten angewandt werden kann, der Zusammenhang schließlich einsichtig wird. Feynman formuliert hierzu:

"Aber der wirkliche Triumph der Wissenschaft besteht darin, dass wir einen solchen Gedankenweg finden können, dass das Gesetz einleuchtend erscheint." [FLS73, S. 26-4]

Die Schüler werden das Gesetz dann als sinnvolle Beschreibung akzeptieren, auch wenn es einen höheren Grad an Abstraktion als ein mögliches Modell besitzt – so wie es mit dem Fermat-Prinzip in der Mittelstufe gelingen kann. (Dies bestätigen eigene Unterrichtserfahrungen und auch [Ras83])

Stimmige Denkwege sind eben "lustvoll", und Ciompi präzisiert: – sowohl innerhalb schon gebahnter Bezugssysteme wie zu neuen hin [Cio93].

Unser Bestreben sollte deshalb sein, eine umfassende Beschreibung für die Phänomene außerhalb der geometrischen Optik zu finden, deren behutsame Entwicklung im Unterricht zwar vom Lehrer gelenkt werden muss, von den Schülern aber im Detail nachvollzogen werden kann. Dazu ist es erforderlich, zum einen möglichst unvoreingenommen von den Phänomenen selbst auszugehen und zum anderen von einer Erklärung nicht mehr zu erwarten als die Beschreibung einer Vielzahl von Einzelaspekten – eine Absicht, die an dieser Stelle zwar besonders bedeutsam wird, aber durchaus nicht neu ist. So ist auch beispielsweise

"Das Newtonsche Gravitationsgesetz... nur eine Beschreibung, zwar keine Beschreibung eines Individualfalles, aber die Beschreibung unzähliger Tatsachen in den Elementen." [Mac10, S. 426]

Eine Möglichkeit zur Realisierung dieses Vorhabens könnte darin bestehen dass wir uns an der Quantenelektrodynamik orientieren. Es sind Versuch unternommen worden, Elemente dieser Theorie dem Physikunterricht zugänglich zu machen [Kuh85].

Wir wollen hingegen nur einige der mit ihr gewonnenen Erkenntnisse in dem weiter unten ausgeführten Unterrichtsvorschlag nutzen und greifen dabei auf Ideen zurück, die Feynman

in seiner populärwissenschaftlichen Darstellung "QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie" [Fey88] ausgeführt hat. (Auch [Bad94] weist neben anderen auf die Möglichkeit hin, die Feynmanssche Idee im Physikunterricht zu verwenden.)

4 Der Zeigerformalismus

Bei der Behandlung der geometrischen Optik mit dem Fermat-Prinzip kann der sonst übliche Begriff des "Lichtstrahls" durch den Begriff "Lichtweg" ersetzt werden. Dessen Verwendung weist deutlicher darauf hin, dass lediglich eine *Eigenschaft* des Lichtes betrachtet werden soll.

Feynman betont in seiner Darstellung deutlich die Teilcheneigenschaft des Lichtes. Wir aber wollen die *Lichtwege* als wesentliches Beschreibungsmerkmal beibehalten. Während in der geometrischen Optik allerdings der tatsächliche von "denkbaren" Lichtwegen unterschieden werden müsste, bekommt der Begriff außerhalb der geometrischen Optik zum Teil eine andere Funktion. (Einen ähnlichen Begriff, nämlich den der "Blickrichtung", stellen wir in dem Teil des Optikunterrichtes, der nach unseren Vorstellungen noch vor der geometrischen Optik unterrichtet wird, in den Vordergrund [Sch94].)

Die neue Beschreibung muss neben den Phänomenen der geometrischen Optik folgende mit einbeziehen:

a) Die Intensität des auf zwei oder mehr Lichtwegen ankommenden Lichtes darf nicht einfach addiert werden, sondern es muss das Interferenzprinzip berücksichtigt werden.

Im Wellenmodell ist die Intensität des Lichtes proportional zum Quadrat der Amplitude der elektrischen Feldstärke E . Sind zwei Wellen zu addieren, so gilt (skalar):

$$I = I_1 + I_2 + E_{01}E_{02} \cos \delta,$$

wobei δ der Phasenunterschied der beiden Wellen ist.

In komplexer Schreibweise kann

$$E = E_0 \cos(kx - \omega t)$$

als Realteil von

$$E = E_0 e^{i(kx - \omega t)}$$

aufgefasst werden. Da aufgrund der hohen Frequenzen der zeitliche Verlauf nicht von Bedeutung ist, kann statt $e^{i(kx - \omega t)}$ vereinfacht $e^{i\varphi}$ geschrieben werden, wobei φ der Phasenwinkel der Welle ist, der von der Länge des Lichtwegs und der Wellenlänge abhängt.

Sind zwei Wellen zu addieren, so ergibt sich nun für die Feldstärke

$$E = E_1 + E_2 = E_{01}e^{i\varphi_1} + E_{02}e^{i\varphi_2} = E_0e^{i\varphi}.$$

Weiter ist allgemein

$$E^2 = (E_0e^{i\varphi})(E_0e^{i\varphi})^*$$

und somit für zwei Wellen

$$\begin{aligned} E^2 &= E_{01}^2 + E_{02}^2 + E_{01}E_{02} \left(e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} + e^{i(\varphi_2 - \varphi_1)} \right) \\ E^2 &= E_{01}^2 + E_{02}^2 + 2E_{01}E_{02} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \end{aligned} \quad (1)$$

Die Intensität wird wie oben

$$I = I_1 + I_2 + 2(I_1I_2)^{\frac{1}{2}} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)$$

und für

$$I_1 = I_2 \quad (2)$$

$$I = 4I_1 \cos^2 [(\varphi_1 - \varphi_2) / 2],$$

was eine Interferenzfigur, die durch zwei Wellen entsteht (zum Beispiel hinter einem Doppelspalt mit infinitesimalen Spaltbreiten), richtig beschreibt.

Für den Unterricht ist hierbei bedeutsam, dass die Summe (1) grafisch wie die Addition zweier Vektoren gebildet werden kann, ohne dass Kenntnisse über die Verwendung komplexer Amplituden erforderlich sind.

Die Darstellung wird außerdem unabhängig von dem hier zunächst verwendeten Wellenmodell, wenn man eine Zeigerdarstellung wählt. Hierbei wird für jeden Lichtweg (den beiden Wellen beim Doppelspalt entsprechen also zwei Lichtwege) ein Zeiger gezeichnet, die bei gleicher Frequenz des Lichtes mit gleicher Geschwindigkeit rotieren. Erneut wird vom zeitlichen Verlauf abgesehen, da lediglich E_0 und nicht $E(t)$ von Bedeutung ist. Die Zeiger werden dann phasenrichtig addiert, wobei aber nur die Phasendifferenz eine Rolle spielt. Das Quadrat des resultierenden Zeigers wird schließlich als Intensität interpretiert. Alle Zeiger haben dabei die gleiche Länge – alle Lichtwege tragen mit gleichem Betrag bei. Diese Vereinfachung ist in der Regel zulässig und wurde auch schon bei Formel 2 verwendet.

Mit der Zeigerdarstellung wird also die Interferenz beschrieben, ohne dass trigonometrische Funktionen erforderlich sind, die zwangsläufig an die Wellenvorstellung erinnern.

Auch für Beugungsprobleme ist diese Technik verwendbar. Im Wellenbild müssen zur Lösung von Beugungsproblemen in jedem Punkt auf dem Schirm die ankommenden Wellen vieler Sekundärwellenerreger (zum Beispiel in einem Spalt) addiert werden. Hierbei sollen die Ab-

stände zwischen diesen klein sein und für eine genaue Betrachtung gegen 0 gehen. Verwendet man dagegen Lichtwege zur Beschreibung, muss analog gefordert werden, dass die Zeiger vieler Lichtwege (durch den Spalt) in jedem Schirmpunkt addiert werden. Genaugenommen müssten wieder unendlich viele (und auch nicht nur gerade) Lichtwege herangezogen werden. Diese Argumentation ist die Grundlage für Feynmans "QED" und wurde von ihm schon 1948 und ausführlicher 1965 dargestellt [Fey48, FH65].

b) Die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie (am Ende eines Lichtweges) ist quantenhaft

Das Bestimmen der Intensität muss deshalb immer mit dem Registrieren sogenannter Photonen verbunden sein.

Werden N Photonen in einem Zähler mit der Eintrittsfläche ΔA gezählt, so ist

$$I = \frac{hfN}{t\Delta A}.$$

Ist N die Zahl der bei I insgesamt registrierten Photonen, so ergibt sich

$$\frac{I}{I_0} = \frac{N}{N_0} \frac{A_0}{\Delta A}.$$

Die Wahrscheinlichkeit $P = N/N_0$, ein Photon im Zähler zu registrieren, ist folglich

$$P \sim I\Delta A.$$

Somit ergibt sich die Wahrscheinlichkeitsdichte und für *einen* realen Zähler auch die Wahrscheinlichkeit als proportional zur Intensität.

5 Bedeutung des Zeigerformalismus für den Optikunterricht

Die "fortschrittlichsten und ausgefeilten" Theorien gingen dagegen von einem rein phänomenologischen Gesichtspunkt aus: Wissenschaftliche Theorien sollten nur die Beziehungen beobachtbarer Größen behandeln, und ein Streben nach der Denkökonomie sollte den Versuch ersetzen, die Phänomene durch unbeobachtbare Größen zu erklären... (S. Brush zitiert nach [Hol84])

Diese Auffassung zur Entstehung physikalischer Theorien, die um die letzte Jahrhundertwende diskutiert wurde, kann sicher nicht für alle Gebiete der Wissenschaft aufrechterhalten werden. Aber könnte nicht gerade dem Optikunterricht der Oberstufe eine solche Geisteshaltung förderlich sein? Wenn wir im Physikunterricht eine Stelle berühren, an der auch die Wissenschaft lernen musste manche Ansprüche zurückzustellen, ist es vielleicht der richtige Moment, sich auf die Grenzen physikalischer Aussagemöglichkeiten zu besinnen. Wir können es vermeiden, den Schülern auf im Unterricht entstehende Fragen Teillösungen in Form von Rückgriffen auf

bekannte Modelle anzubieten, wenn wir ihnen eine Beschreibung vorstellen, deren gesamte Tragweite sie überschauen können, die die gezeigten Phänomene umfasst und bei deren Erarbeitung ihre eigenen Grenzen unmittelbar deutlich werden. Der Zeigerformalismus ist eine solche Beschreibung, und er eröffnet darüberhinaus die Möglichkeit, eine Reihe von weiteren Phänomenen einzubinden (auch solche, die bislang im Physikunterricht nicht behandelt werden konnten). Zudem werden, wie es von einer übergreifenden Beschreibung erwartet werden kann, einige Sachverhalte vorausgesagt, die experimentell überprüft werden können.

Die Ausführung der Zeigeraddition (vgl. nächsten Abschnitt) selbst geschieht im Unterricht wegen der im allgemeinen großen Zahl von Zeigern mit einem Computerprogramm¹, wird also nicht von den Schülern selbst durchgeführt. Alle Schritte, die dazu nötig sind, sind aber elementar und können von den Schülern nachvollzogen werden.

Als ein Problem bleibt bislang bestehen, dass das Phänomen der Polarisation noch nicht in den Zeigerformalismus eingebunden ist. Im Anschluss an die hier vorgestellte Unterrichtseinheit kann aber die Deutung der schon behandelten optischen Phänomene im Wellenbild angesprochen werden (wobei *dann* der Modellcharakter deutlich wird) und bei dieser Gelegenheit die Polarisation gezeigt werden. Es wird an dieser Stelle auch die Entsprechung der Wellenlänge und der in unserem Konzept verwendeten "Basislänge" deutlich.

6 Ein Unterrichtsvorschlag

Zu Beginn werden die drei Phänomene *partielle Reflexion*, *quantenhafte Wechselwirkung* und *Interferenz* vorgestellt. Hierzu gibt es eine Reihe von Experimenten, von denen hier nur jeweils eines kurz geschildert wird. (Eine ausführlichere Darstellung ist in [Erb94] zu finden.)

a) Partielle Reflexion

V: Mit dem Licht einer Kerze wird der Raum durch eine Glasscheibe hindurch beleuchtet. Ein Teil des Lichtes wird dabei von der Scheibe reflektiert.

Ergebnis: *Licht wird an einer Glasscheibe partiell reflektiert. Ein Lichtweg kann sich in zwei oder mehrere aufspalten.*

¹Dieses Programm kann gegen Einsendung eines frankierten Rückumschlages vom Autor bezogen werden. Der Quelltext ist zu finden in [Erb94].

b) Quantenhafte Wechselwirkung

Letztlich sind alle Aussagen über Licht nur möglich, weil es in Wechselwirkung mit dem Auge, einem Fotonegativ, einem Zählrohr oder ähnlichem tritt. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich dabei, dass Lichtenergie nur portionsweise aufgenommen wird.

V: Experimente, die die "körnige Struktur der Wechselwirkung zeigen, sind nicht einfach zu realisieren. Man bekommt einen Eindruck beim Betrachten einer belichteten Fotoschicht unter dem Mikroskop.

Ergebnis: *Wird Licht am Ende eines Lichtwegs registriert, so geschieht dies immer portionsweise. Die Wechselwirkung zwischen Licht und Materie ist quantenhaft.*

Es ergibt sich nun die Frage, wie die partielle Reflexion mit der quantenhaften Wechselwirkung in Einklang gebracht werden kann.

Tatsächlich gibt es keine Möglichkeit, das Registrieren *eines* durchgelassenen und *eines* reflektierten Photons vorherzusagen, da die Photonen im Glas nicht unterschiedlich behandelt werden. Es kann lediglich die Aussage gemacht werden, dass bei senkrechtem Einfall 4% *aller* Photonen reflektiert werden. Die Wahrscheinlichkeit für das einzelne Photon, reflektiert zu werden, ist dementsprechend 0,04.

Ergebnis: *Bei Experimenten, in denen ein Lichtweg aufgeteilt wird, kann das Registrieren eines Photons nur in Form einer Wahrscheinlichkeit vorausgesagt werden.*

c) Interferenz

V: Betrachtet man eine in einem Drahtrahmen aufgespannte Seifenhaut (an der das Licht ebenfalls partiell reflektiert wird), so findet man die Farben der Seifenblasen wieder. Beim Beleuchten mit einfarbigem Licht zeigt sich, dass die Farben dieser Haut auf Hell-Dunkel-Streifen zurückführbar sind. Auch dickere Schichten wie Objektträger oder zwei teilverspiegelte Glasplatten (eine Art Fabry-Perot-Interferometer in Reflexion) erzeugen solche Muster aus hellen und dunklen Stellen auf einem Schirm, der eigentlich gleichmäßig vom reflektierten Licht beleuchtet werden müsste.

Das Charakteristische dieser Aufbauten ist, dass durch die Verwendung von zwei reflektierenden Grenzschichten zwei Lichtwege zwischen Lichtquelle und einem Punkt auf dem Schirm zur Verfügung stehen.

Dabei spielt offensichtlich die Längendifferenz der beiden Lichtwege die entscheidende Rolle, denn das Interferenzmuster wechselt mit zunehmender Dicke der keilförmigen Seifenschicht von Dunkel nach Hell wieder nach Dunkel usw. Die periodische Struktur lässt darauf schließen, dass bestimmte Wegdifferenzen (in der Größenordnung der Dicke der Seifenhaut) gleiche Phänomene bewirken.

Ergebnis: *Kann das Licht auf zwei oder mehr Wegen von der Lichtquelle zu einem Punkt kommen, so dürfen nicht einfach die Intensitäten addiert werden. Es kommt zu dem Phänomen von Verstärkung und Auslöschung, welches Interferenz genannt wird.*

d) Zeigerformalismus

Um alle Phänomene gemeinsam zu beschreiben, fassen wir die Befunde zusammen und verwenden eine Technik, die der Addition von Vektoren entspricht.

Ergebnis: Zeigerformalismus

- a) Bei mehreren Lichtwegen von einer Lichtquelle zum Empfänger müssen alle Wege berücksichtigt werden, um das richtige Ergebnis für die Intensität zu erhalten.
 - b) Dabei trägt jeder Lichtweg vom Betrag gleich viel zum Ergebnis bei.
 - c) Jedem Lichtweg wird ein Zeiger zugeordnet, der sich während der Lichtausbreitung dreht. Wenn der Zeiger eine vollständige Drehung gemacht hat, hat das Licht einen Weg zurückgelegt, der gleich seiner Basislänge λ ist.
 - d) Die Länge des Zeigers wird so gewählt, dass das Quadrat die Wahrscheinlichkeit angibt, am Empfänger ein Photon zu registrieren.
 - e) Um das Gesamtergebnis zu erhalten müssen zunächst alle Zeiger wie Vektoren addiert werden. Anschließend wird die Resultierende quadriert.
- (Die Notwendigkeit des Quadrieren wird erst im Nachhinein begründet werden.)

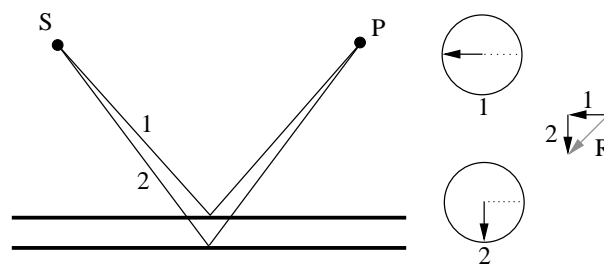


Abbildung 1: Schematische Darstellung Addition zweier Zeiger

In Abbildung 1 ist die Addition der Zeiger zweier Lichtwege von einer Lichtquelle im Punkt S über zwei Glasplatten zu einem Punkt P schematisch dargestellt.

e) Bestimmung der Basislänge

Die Basislänge λ des Lichtes macht sich uns in seiner Farbe bemerkbar.

V: Um den Zusammenhang zwischen Basislänge und Farbe des Lichtes zu verdeutlichen, beleuchten wir die vertikal eingespannte Seifenlamelle nacheinander mit Licht verschiedener Farbe und beobachten den Abstand der in Reflexion sichtbaren Interferenzstreifen. Die Basislänge monochromatischen Lichtes kann z.B. mit einem Michelson-Interferometer ermittelt werden.

V: Beobachtet wird das ringförmige Interferenzmuster auf einem Schirm. dass sich bei Verwendung eines aufgeweiteten Laserlichtbündels ergibt. Beim Verstellen des beweglichen Spiegels läuft das Interferenzmuster (am besten sichtbar im Zentrum) gerade einmal von Hell nach Dunkel und wieder nach Hell, wenn die Änderung des Lichtweges – also das Doppelte der Strecke, um die der Spiegel bewegt wurde – gleich λ ist.

f) Mehrfachreflexion und Phasensprung

Bei der Berechnung des Ergebnisses, das durch die Reflexion an Vorder- und Rückseite einer Glasplatte zustandekommt, wird deutlich, dass das *Quadrat* des resultierenden Zeigers ein Maß für die Intensität ist. Außerdem wird für die Reflexion am optisch dichteren Medium ein Phasensprung eingeführt, der unter anderem auch erklärt, wieso die vertikale Seifenlamelle im reflektierten Licht im oberen Bereich nach kurzer Zeit dunkel und damit völlig durchsichtig wird.

Die Überlegungen zur Addition der Lichtwege an Vorder- und Rückseite einer Glasplatte beschreibt Feynman [Fey88] ebenso ausführlich, wie die sich daraus ergebende Konsequenzen für die Beugung. Die uns wichtigen Elemente sind in unserem Lehrgang berücksichtigt worden [Erb94].

g) Ein Beispiel: Beugung am Spiegel

Die ganze Tragweite wird deutlich, wenn man neben den in der Schule üblichen Phänomenen auch solche behandelt, die überraschende, bislang nicht berücksichtbare Ergebnisse hervorrufen [Erb95]. An einem Beispiel, das auch Feynman verwendet und das von uns im Experiment nachvollzogen wurde, soll dies deutlich werden.

Es soll die Intensität des von einer punktförmigen Lichtquelle S über einen Spiegel kommenden Lichtes in einem Punkt P bestimmt werden.

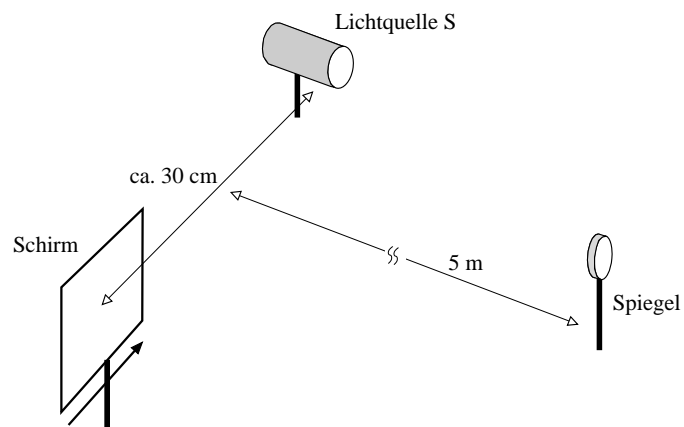


Abbildung 2: Versuchsaufbau zur Reflexion

V: Hierzu wird das Licht eines Lasers mit einer kurzbrennweitigen Linse ($f \approx 10 \text{ mm}$) aufgeweitet. Das Lichtbündel wird so auf einen Oberflächenspiegel in einer Entfernung von 5 m gerichtet, dass ein sich neben dem Laser befindender Schirm beleuchtet wird (Abbildung 2).

Da wir nicht mehr auf der Basis der geometrischen Optik argumentieren, genügt es für die Berechnung nicht, wie bislang den geometrisch zu erwartenden Lichtweg heranzuziehen, sondern es müssten alle, d.h. unendlich viele Wege (über verschiedene Punkte des Spiegels) berücksichtigt werden. In der Praxis reicht es aus, wenn man eine Auswahl aller Lichtwege heranzieht.

Die soll zunächst mit Hilfe einer schematischen Darstellung veranschaulicht werden. Die Zeiger von 33 ausgewählten Lichtwegen addieren sich zu einer Spirale, wie in Abbildung 3 deutlich wird. Man erkennt, dass nicht nur der geometrische, kürzeste Lichtweg zum Ergebnis (hel-

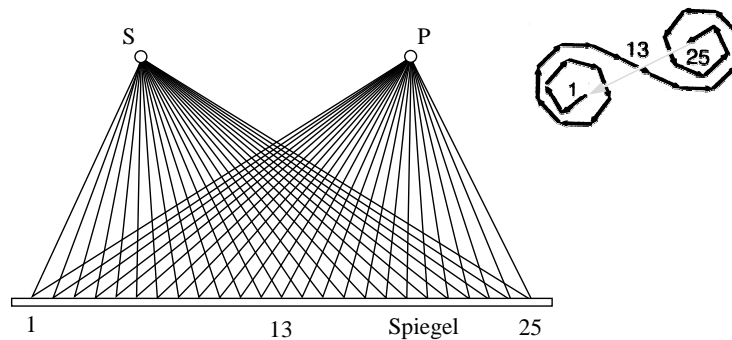


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Zeigeraddition

ler Zeiger) beiträgt, sondern auch benachbarte einen konstruktiven Beitrag liefern, weil ihre Zeigerstellungen kaum voneinander abweichen.

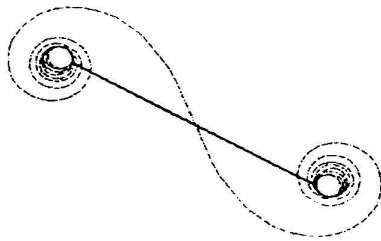


Abbildung 4: Zeigeraddition

Weiter entferntliegende Lichtwege interferieren aber destruktiv, tragen also nicht bei: Hiermit wird das aus der geometrischen Optik zu erwartende Ergebnis und damit das Fermat-Prinzip bestätigt. Auch die Vereinfachung, die darin besteht, dass wir nur geradlinige Wege verwendet haben, lässt sich auf ähnlich Weise rechtfertigen. Man sieht weiter, dass eine Erhöhung der Zahl der Lichtwege keine grundsätzlich Änderung hervorrufen würde.

Aber es ist auch zu erkennen, dass eine noch höhere Intensität in P erwarten werden dürfte, wenn die Lichtwege, deren Zeigerstellung um mehr als $\pm 90^\circ$ von der Richtung des resultierenden Zeigers abweicht, nicht einbezogen würden. Dazu dürfte der Spiegel an den Stellen, über die die betreffenden Lichtwege gehen, nicht reflektieren. Dies könnte gelingen, wenn wir ihn durch ein Gitter bedecken.

In einem entsprechenden Experiment wollen wir hierzu allerdings nicht den gesamten Spiegel, sondern nur eine 1 cm breiten Bereich betrachten. Verwenden wir ein Strichgitter, so bleibt die Berechnung auf eine Dimension beschränkt. Wir erwarten dann statt eines hellen Punktes eine helle Linie, deren Höhe von der des Strichgitters abhängt.

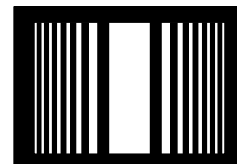


Abbildung 5: Das verwendete Gitter

Wir berechnen die sich für unseren experimentellen Aufbau aus 500 Zeigern ergebende Spirale mit dem Computer (Abbildung 4 auf der vorherigen Seite).

Blendet man die Lichtwege, die destruktiv interferieren, aus, ergibt die Addition der Zeiger das in Abbildung 6 gezeigte Ergebnis (Ausschnitt: Bei gleichem Maßstab wie Abbildung 4 auf der vorherigen Seite).

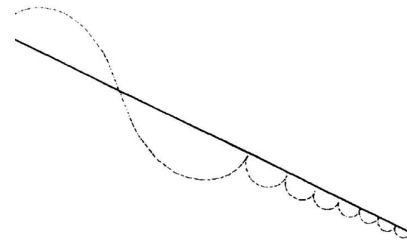


Abbildung 6: Zeigeraddition bei Verwendung des Gitters

Wir können jetzt das erforderliche Gitter vergrößert zeichnen, fotografieren und im richtigen Maßstab auf Folie kopieren (Abbildung 5 auf der vorherigen Seite).

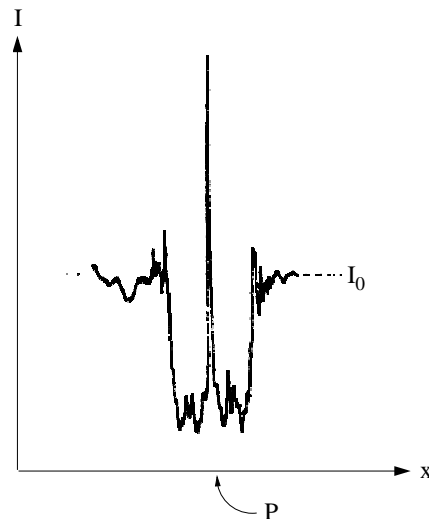


Abbildung 7: Gemessene Intensität auf dem Schirm

Bringt man das Gitter direkt vor den Spiegel, so erscheint auf dem Schirm wie vorausgesagt deutlich sichtbar eine helle Linie. Die Intensität auf dem Schirm kann mit einer Photodiode vermessen werden. Das Messergebnis zeigt die deutliche Erhöhung der Intensität gegenüber der Intensität des ohne Gitter beleuchteten Schirms I_0 (Abbildung 7).

Das Beispiel macht deutlich, dass die Anwendung des Zeigerformalismus zu vernünftigen Ergebnissen führt. In diesem Fall zudem zu einem für die Schüler überraschenden: Obwohl ein Teil der Spiegelfläche abgedeckt wird, ergibt sich eine *größere* Intensität in einem bestimmten Bereich.

Der Aufbau des benötigten Gitters ist wegen seiner Ausmaße der Anschauung direkt zugänglich – das Gitter kann auch von den Schülern selbst hergestellt werden.

7 Abschliessende Bemerkungen

Der vorstehende Unterrichtsvorschlag kann natürlich nicht beanspruchen, unabhängig von allen schulischen Gegebenheiten einen größeren Lernerfolg zu bewirken. Er ist aber so angelegt, dass in jedem Fall die sensiblen Punkte der Optik auf Oberstufenniveau und damit zugleich die Anfänge der Quantenphysik hervorgehoben werden. Gemeinsam mit der Möglichkeit, eine in sich schlüssige Darstellung zu erhalten, und der Chance zur Bearbeitung elementarer Beugungsprobleme resultiert daraus die Hoffnung auf die Entwicklung eines zeitgemäßen Bildes der Optik.

Die Einordnung in den Unterricht erfolgt idealerweise *vor* dem Unterricht über Quantenphysik, ohne dass die Schüler zuvor das Wellenmodell des Lichtes, dafür aber schon in der Mittelstufe die geometrische Optik mit dem Fermat-Prinzip kennengelernt haben. Aber auch die zusätzliche Einbindung in den "normalen" Unterricht kann erfolgversprechend sein!

Literatur

- [Bad94] BADER, F.: Optik und Quantenphysik nach Feynmans QED. In: *Physik in der Schule* 32 (1994), Nr. 7/8, S. 250–256
- [Cio93] CIOMPI, L.: Die Hypothese der Affektlogik. In: *Spektrum der Wissenschaft*, 1993, S. 76–87
- [Erb92] ERB, R.: Geometrische Optik mit dem Fermat-Prinzip. In: *Physik in der Schule* 30 (1992), S. 291–295
- [Erb94] ERB, R.: *Optik mit Lichtwegen – Das Fermat-Prinzip als Grundlage für das Verstehen der Optik*. Bochum, Magdeburg : Westarp-Wissenschaften, 1994. – Dissertation
- [Erb95] ERB, R.: Curved Mirrors. In: *Physics Education* 30 (1995), S. 287–289
- [Fey48] FEYNMAN, R. P.: Space-Time-Approach to Non-Relativistic Quantum Mechanics. In: *Rev. Mod. Phys.* 20 (1948), S. 367–387
- [Fey88] FEYNMAN, R. P.: *QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*. München : Piper, 1988
- [FH65] FEYNMAN, R. P. ; HIPPS, A.R.: *Quantum Mechanics and Path Integrals*. McGraw-Hill, 1965
- [FLS73] FEYNMAN, R. P. ; LEIGHTON, R.B. ; SANDS, M.: *Vorlesungen über Physik Band I Teil 2*. München : Oldenbourg, 1973. – Hauptsächlich Mechanik, Strahlung und Wärme

- [Hol84] HOLTON, G.: *Themata zur Ideengeschichte der Physik*. Braunschweig : Vieweg, 1984
- [Kuh85] KUHN, W.: Methodisches Konzept zur Elementarisierung der Quantenelektrodynamik. In: *PdN-Ph* 34 (1985), Nr. 7, S. 18–25
- [Mac10] MACH, E. *Populärwissenschaftliche Vorlesungen*. 1910
- [Pla91] PLANCK, M.: *Vom Wesen der Wissenschaftsfreiheit*. Frankfurt : Fischer, 1991
- [Ras83] RASCHER, R.: "Moderne Physik" am Beispiel der geometrischen Optik in der Stufe 5/6. In: SCHARMANN, A. (Hrsg.) ; HOFSTAETTER, A. (Hrsg.) ; KUHN, W. (Hrsg.): *Vorträge auf der Frühjahrstagung der DPG FA Didaktik*. Gießen, 1983, S. 244–249
- [Sch94] SCHÖN, L.: Ein Blick in den Spiegel – Von der Wahrnehmung zur Physik. In: *Physik in der Schule* 32 (1994), Nr. 1, S. 2–5
- [Sim90] SIMONY, K.: *Kulturgeschichte der Physik*. Frankfurt/M : Harri Deutsch, 1990
- [Sza87] SZABO, I.: *Geschichte der mechanischen Prinzipien*. Basel, Boston, Stuttgart : Birkhäuser, 1987