

Studienseminar September 1995/97
am Franz-Ludwig-Gymnasium

Schriftliche Hausarbeit im Fach Physik

Thema: **Interferenz an Spalt und Gitter**

**Computergestützte Betrachtungen unter Einbeziehung von
Feynman-Pfeiladdition**

Eine Unterrichtseinheit für Grund- und Leistungskurse

vorgelegt von
Studienreferendar Jürgen Roth

(Mathematik, Physik)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	III
1 Einführung	1
1.1 Zielsetzung der Unterrichtseinheit.....	1
1.2 Zusammenfassung der Inhalte der Vorstunden.....	2
2 Computergestützte Experimente zur Lichtinterferenz	3
2.1 Konzept der Stunde	3
2.1.1 Einstieg.....	3
2.1.2 Experimente zur Lichtinterferenz.....	3
2.1.3 Übertragung der Erkenntnisse bei Mikrowellen auf sichtbares Licht.....	6
2.2 Versuchsaufbau und experimentelle Hinweise	8
2.2.1 Zielsetzung.....	8
2.2.2 Versuchsaufbau.....	9
2.2.3 Die Hardware und Software.....	12
3 Computerpraktikum: Simulation der Lichtinterferenz.....	14
3.1 Konzept des Computerpraktikums	14
3.2 Konkrete Umsetzung	16
4 Zusammentragen der gewonnenen Erkenntnisse	21
5 Computeranimierte Feynman-Pfeiladdition	25
5.1 Konzept.....	25
5.2 Konkrete Umsetzung	26
6 Fragebogen zur Lernzielkontrolle	34
7 Erfahrungen und Ausblick.....	37
8 Literaturverzeichnis	39
9 Erklärung.....	41

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: $I(s)$ -Diagramm der Interferenzfigur hinter einem Doppelspalt.....	5
Abbildung 2: $I(s)$ -Diagramm der Interferenzfigur hinter einem Gitter mit 100 Strichen pro Zentimeter.....	5
Abbildung 3: Herleitungsskizze zur Gleichung $\Delta s = d \cdot \sin \alpha$	6
Abbildung 4: Prinzipielle Versuchsanordnung.....	7
Abbildung 5: Gesamtansicht des Versuchsaufbaus.....	9
Abbildung 6: Laser und Gitter.....	9
Abbildung 7: Stromkreis des Fotowiderstandes.....	10
Abbildung 8: Schaltung des Fotowiderstandes.....	10
Abbildung 9: Fahrbahn und Zählrad.....	11
Abbildung 10: C64-Rechner und Interfaces mit Anschlüssen.....	12
Abbildung 11: Quelltext des vom Autor dieser Arbeit geschriebenen Programms „Interferenzverteilung“.....	13
Abbildung 12: Oberfläche des Programms "Interferenz am Gitter" beim Starten des Programms.....	15
Abbildung 13: Oberfläche des Programms "Interferenz am Gitter" nach Abschluß der Vorbereitungen.....	16
Abbildung 14: Begrüßungsbildschirm der Programmgruppe „Eine Quantenwelt ohne Dualismus“.....	27
Abbildung 15: Programm „Einführung der Pfeiladdition“; Spalt 1: Elementarwellen.....	28
Abbildung 16: Programm „Einführung der Pfeiladdition“; Spalt 2: Pfeiladdition.....	28
Abbildung 17: Programm „Einführung der Pfeiladdition“.....	29
Abbildung 18: Programm „Einführung der Pfeiladdition“; Spalt 2: Pfeiladdition; Beugungswinkel $\varphi = 0^\circ$	30
Abbildung 19: Programm „Demonstration der Pfeiladdition am Einzelspalt“; quantitative Simulation.....	31
Abbildung 20: Programm „Schirmbilder bei Spalt und Gitter“; Gitter mit Gitterkonstante $d = 0,01 \text{ mm}$	31
Abbildung 21: Programm „Helligkeitsverteilung an Gittern, Vergleich mit Spalt“; Gitter.....	32
Abbildung 22: Programm „Helligkeitsverteilung an Gittern, Vergleich mit Spalt“; Spalt.....	32
Abbildung 23: Herleitungsskizze zur Minimumsbedingung beim Einfachspalt.....	33

1 Einführung

1.1 Zielsetzung der Unterrichtseinheit

Die Lichtinterferenz ist ein Phänomen, das die moderne Physik entscheidend voran gebracht hat. Es wurde immer wieder die Frage gestellt, was Licht nun sei, Welle oder Teilchen. Die Interferenzerscheinungen haben der Wellentheorie Aufschwung gegeben, ja sie überhaupt erst „salonfähig“ gemacht, nachdem im gesamten 18. Jahrhundert wegen der Erfolge der Newtonschen Gravitationstheorie die Korpuskulartheorie dominierte. Erst die Arbeiten von Young (er entdeckte 1801 das von ihm so benannte Interferenzprinzip) und Fresnel (er argumentierte bereits 1816 mit der Überlagerung von Huygensschen Elementarwellen), die sich mit Interferenzphänomenen auseinandersetzten, verhalfen der Wellentheorie zum Durchbruch. Damit war die Diskussion aber nicht abgeschlossen. Einstein hat 1905 den Welle-Teilchen-Dualismus wiederbelebt, indem er erkannte, dass sich Licht in „wärmetheoretischer Beziehung“ so verhält, als bestünde es aus voneinander unabhängigen Energiequanten der Größe $h\nu$ (h : Wirkungsquantum, ν : Frequenz). In den Folgejahren hat man Wellen- und Teilchenbild miteinander „versöhnt“ (Stichwort: Wahrscheinlichkeitsverteilung), womit aber auch noch nicht das letzte Wort gesprochen wurde. Gegenwärtig wird mit der Quantenmechanik und insbesondere der von Feynman mitbegründeten Quantenelektrodynamik ein Weg beschritten, der sich völlig von klassischen Objekten aus unserem Alltag wie Wellen und Teilchen gelöst hat. Es gibt nämlich Phänomene, bei denen sich Licht weder wie eine Welle noch wie ein Teilchen verhält. Die Quantentheorie beschreibt mit ihrem, sich der Anschauung völlig entziehenden Formalismus, die Naturerscheinungen in hervorragender Weise, und die klassische Physik erweist sich i.a. als Sonderfall dieser Theorie.

Der Versuch, diesen umfassenden Formalismus in die Schule zu übertragen und zwar so, dass die Schüler später nichts mehr davon zurücknehmen müssen, ist ein schwieriges Unterfangen. Es kann nur gelingen, wenn die Kollegiaten von den Rechentechniken, die dahinter stecken (völlig) befreit bleiben und ihnen das Prinzip auf möglichst anschauliche Weise vermittelt wird. Dazu wird die Feynman-Pfeiladdition herangezogen, bei der die Quantenmechanik mit Hilfe rotierender Pfeile beschrieben wird.

Wo setzt nun aber der in dieser Arbeit zu beschreibende Unterricht an? Es geht hier darum, den Schülern zunächst das Phänomen Lichtinterferenz zu vermitteln und sie eigene Erfahrungen damit sammeln zu lassen. Erst wenn hier eine Grundlage geschaffen ist, kann man Schritt für Schritt den mühsamen Weg gehen, und sich mit den Schülern an etwas, der Anschauung völlig entzogenes, wie die quantenmechanische Beschreibung der Realität heranzutasten.

Im Rahmen dieser Arbeit wird nur die Voraussetzung geschaffen, um diesen Übergang relativ homogen zu gestalten. Es bietet sich an, die Schüler von der noch relativ anschaulichen Betrachtung des Wellencharakters des Lichts ausgehen zu lassen und sie auf dieser Basis mit den Grundlagen des quantenmechanischen Formalismus vertraut zu machen. Hierauf aufbauend kann man durch Umdeutung der rotierenden Pfeile, bei der Behandlung des Teilchencharakters des Lichts und des „Welle-Teilchen-Dualismus“, relativ nahtlos zur quantenmechanischen Beschreibung übergehen.

In jedem der Abschnitte 2 bis 5 wird eine Unterrichtsstunde der vierstündigen Unterrichtseinheit beschrieben. Die ersten drei Sitzungen gehen das Thema im Wesentlichen phänomenologisch an und erst die vierte Stunde befasst sich mit der Feynman-Pfeiladdition. Der Beginn der Einheit wird von Realexperimenten zum Thema Lichtinterferenz markiert, die Analogiebetrachtungen zu bekannten Wellensystemen erlauben (Wasserwellen, Mikrowellen, Schallwellen,...). In der zweiten Stunde machen die Kollegiaten anhand eines Simulationsprogramms selbständig Erfahrungen mit der Lichtinterferenz und entdecken weitere Phänomene. Die dritte Einheit dient der Zusammentragung und Vertiefung der gewonnenen Erkenntnisse und die vierte Stunde ganz der Erklärung der Beobachtung mit dem Konzept der Feynman-Pfeiladdition.

An dieser Stelle soll noch erwähnt werden, dass aus Gründen der Vereinfachung bei der Nennung einzelner Gruppen ausschließlich von der männlichen Form Gebrauch gemacht wird. In allen diesen Fällen sind aber natürlich immer Frauen und Schülerinnen mit eingeschlossen.

1.2 Zusammenfassung der Inhalte der Vorstunden

Die in dieser Arbeit dargestellte Unterrichtseinheit ist für den im Fachlehrplan für Physik im Lehrplan für bayerische Gymnasien¹ im Grundkurs vorgesehenen Abschnitt „*Beugung und Zweistrahlinterferenz mit Mikrowellen und Licht; Interferenz am optischen Gitter*“², sowie für die entsprechenden Abschnitte „*Licht als elektromagnetische Welle, Beugungs- und Interferenzversuche mit Licht*“³ und „*Einfachspalt*“³ im Leistungskurs konzipiert. In beiden Fällen handelt es sich um das Kapitel „*(Elektromagnetische) Schwingungen und Wellen*“ und speziell um die Einheit „*Elektromagnetische Wellen*“ des Lehrplans¹.

Vor der hier beschriebenen Unterrichtseinheit sollten, anhand von Versuchen mit der Wellenwanne, bereits die Beugung und Interferenz von Wasserwellen und die Erklärung dieser Phänomene mit Hilfe des Huygensschen Prinzips (Elementarwellen; ungestörte Superposition) in zwei Unterrichtsstunden behandelt worden sein. In einer weiteren Stunde sollte auch die Erarbeitung der Bedingungen für Maxima und Minima beim Doppelspaltversuch mit Wasserwellen erfolgen. Spätestens in diesem Zusammenhang sollte auch die Einführung und klare gegenseitige Abgrenzung der Begriffe Beugung (das Eintreten einer Welle in den geometrischen Schattenraum) und Interferenz (Phänomene, die auf der ungestörten Superposition von zwei oder mehr Wellen mit fester Phasenbeziehung beruhen) erfolgen. Schließlich ist es sinnvoll, den Doppelspaltversuch auch mit Mikrowellen durchzuführen und die Analogie zu den Phänomenen bei den Wasserwellen herauszuarbeiten. Beim Mikrowellenversuch werden auch die Begriffe Gitterkonstante (= Spaltmittenabstand) und Spaltbreite eingeführt.

Diese Vorbereitung der hier beschriebenen Unterrichtseinheit soll den Schülern einerseits die Möglichkeit zu Analogieschlüssen eröffnen, und sie andererseits mit dem Huygensschen Prinzip, einer ausbau- und (im Sinne der Feynman-Pfeiladdition) umdeutungsfähigen Theorie vertraut machen.

¹ Lehrplan für das bayerische Gymnasium, Fachlehrplan für Physik, in: Amtsblatt des Bayerischen Staatsministeriums für Unterricht, Kultus, Wissenschaft und Kunst, Jahrgang 1991, Sondernummer 9, München, 29. November 1991

² ebd.: S. 1292

³ ebd.: S. 1313

2 Computergestützte Experimente zur Lichtinterferenz

2.1 Konzept der Stunde

2.1.1 Einstieg

Die erste Stunde dieser Unterrichtseinheit schließt direkt an den Doppelspaltversuch mit Mikrowellen der Vorstunde an. Im Unterrichtsgespräch wird die Frage diskutiert, wo solche Phänomene, wie sie bei Wasser- und Mikrowellen auftreten, evtl. noch zu erwarten sind. Da bis dahin sehr viel über Wellen diskutiert wurde, werden in der Regel andere Wellen gesucht und z.B. mit den Schallwellen auch gefunden. Unter Umständen werden die Schüler nicht auf das sichtbare Licht als „Testobjekt“ für Interferenz- und Beugungserscheinungen kommen. In diesem Fall muss der Lehrer, nachdem er den Schülern genügend Zeit gelassen hat, um das Problem zu durchdenken und zu diskutieren, die Frage aufwerfen, inwieweit das sichtbare Licht zu derartigen Phänomenen führt. Diese Frage wird zunächst im Raum stehen gelassen und anschließend ein Versuch vorgestellt, mit dem sie geklärt werden kann.

2.1.2 Experimente zur Lichtinterferenz

Anmerkung zum Experimentator

Die Experimente zur Lichtinterferenz sind im Grundkurs grundsätzlich vom Lehrer durchzuführen, da sie einerseits exakt justiert werden müssen und es andererseits etwas Übung erfordert, den Lichtsensor gleichmäßig und sehr langsam entlang der Maxima und Minima zu bewegen. Im Leistungskurs dagegen ist es durchaus möglich, diese Experimente als Experimentalreferat zu vergeben. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die Referenten entsprechende Anleitung durch den Kursleiter erhalten und bereits vorher ein experimentelles Praktikum mit Computereinsatz absolviert haben. Werden die Versuche als Experimentalreferat durchgeführt, so muss mit den Referenten die genaue Versuchsabfolge abgesprochen werden. Außerdem muss man sie darum bitten, sich beim Stundeneinstieg zurückzuhalten, um den anderen Kursteilnehmern nicht die Möglichkeit der intensiven kognitiven Auseinandersetzung zu nehmen.

Einführung in die Versuche

Zuerst wird ein Doppelspaltversuch aufgebaut, um den Analogieschluss zum Mikrowellenversuch zu erleichtern. Der Versuchsaufbau wird zunächst in seinen wichtigsten Details vorgestellt. Dazu und bei der gesamten Versuchsdurchführung steht der ganze Kurs so um den Versuchsaufbau herum, dass jeder eine gute Sicht auf das Wesentliche hat⁴ und der Experimentator nicht behindert wird. Da der Kurs hierzu ohnehin die normale Sitzordnung auflösen muss, ist es auch kein großer Nachteil, dass man den Versuch bereits in der Sammlung aufgebaut hat. Dies ist notwendig, da die Experimente einer längeren Justierung bedürfen, die aus Zeitgründen nicht im Unterricht erfolgen kann. Man geht an dieser Stelle nicht näher darauf ein, warum hier ein Laser und keine „normale“ Lichtquelle benutzt wird.⁵ Den Kollegiaten wird der zu benutzende Doppelspalt gezeigt und, falls keiner der Schüler die entsprechende Frage stellt (den Schülern Zeit zum Erfassen der Situation und zum Überlegen geben!), geht der Kursleiter selbst darauf ein, dass der Spalt eine völlig andere Größenordnung hat als der beim Mikrowellenversuch. Ausgehend vom Namen Zentimeterwellen⁶ und der dortigen Spaltbreite von ca. zwei Zentimetern, liegt die Vermutung nahe, dass hier ein Zusammenhang zwischen Spaltbreite und Wellenlänge vorliegen könnte. Diese Vermutung wird festgehalten ohne ihr (zunächst) weiter nachzugehen.

Als erster Schritt wird der Laser direkt auf den Auffangschirm gerichtet, wo ein kreisrunder Leuchtfleck am Auftreffpunkt des Strahls zu erkennen ist. Anschließend wird ein Doppelspalt in den Strahlengang gebracht. Zunächst wird deutlich, dass hier die Beugung eine Rolle spielt (Eintritt in den Schattenraum), da kein kreisrunder Leuchtfleck mehr auf dem Auffangschirm zu erkennen ist, sondern ein in die Breite gezogener leuchtender Streifen.

Spätestens bei der intensiveren Betrachtung des „Leuchtreifens“ hinter dem Doppelspalt muss man das Licht vollständig löschen. Dies ist auch in der Kollegstufe gut vorzubereiten! Erst wird ein klarer Beobachtungsauftrag gegeben, dann wird das Licht für den kurzen Versuchs- und Beobachtungszeitraum gelöscht und anschlie-

⁴ Dies erreicht man z.B. dadurch, daß manche ihre Stühle mitbringen und sich in die erste Reihe setzen und der Rest sich dahinter stellt.

⁵ Eventuelle Fragen zu diesem Punkt werden vom Lehrer als gut und wichtig qualifiziert, und mit dem Hinweis auf eine Besprechung in einer der folgenden Stunden zurückgestellt. Dabei sollte man allerdings immer darauf achten, daß man dem entsprechenden Schüler diese Anerkennung zollt.

⁶ bzw. anhand der aus der Länge l des Sendedipols berechneten Wellenlänge λ ($l = \frac{\lambda}{2}$)

Beim sofort wieder eingeschaltet. Diese Prozedur wiederholt sich bei jedem Versuchsteil, wird hier aber nur einmal erwähnt.

Bei genauerer Betrachtung lassen sich innerhalb des Streifens Stellen großer Helligkeit von solchen relativer Dunkelheit unterscheiden. Diese legt die Vermutung nahe, dass es sich um Maxima und Minima handeln könnte. Allerdings sind die Maxima nicht deutlich genug voneinander zu trennen, so dass sich eine genauere Betrachtung empfiehlt.

Erläuterung der computergestützten Messwerterfassung und -auswertung

Den Schülern wird nun die prinzipielle Methode zur genaueren Erfassung der Intensitätsverteilung erläutert. Dazu wird parallel zum Leuchtschirm eine Schülerversuchsfahrbahn aufgestellt. Auf einem zugehörigen Wagen wird ein Fotowiderstand befestigt. Dadurch ist es möglich, den Fotowiderstand (*light dependent resistor* [LDR]) durch den „Leuchtbereich“ zu bewegen. An diesen LDR wird eine Spannung angelegt. Je größer die Intensität des auf den Fotowiderstand einfallenden Lichts ist, desto kleiner wird sein Widerstandswert. Dadurch wird die an einem Vorwiderstand abfallende Spannung größer. Letztere ist damit (in einem bestimmten Bereich) direkt proportional zur Intensität I des auf die lichtempfindliche Fläche des LDR treffenden Lichts. Diese Spannung U wird über einen AD-Wandler (Analog-Digital-Wandler)⁷ an einen Rechner weitergegeben. Gleichzeitig erhält der Computer Signale von einem Zählrad, das die Bewegungen des Wagens registriert.⁸ Dazu wird das Zählrad an einem Ende der Fahrbahn befestigt und eine Umlenkrolle am anderen Ende. Um die beiden Räder wird dann ein Bindfaden gespannt und am Wagen befestigt. Auf diese Weise wird jede Bewegung des Wagens in eine Drehbewegung des Laufrades umgesetzt. Dieses Rad hat am Rand einen durchsichtigen Ring, auf dem radial schwarze Streifen aufgetragen sind, die sich mit durchsichtigen Streifen abwechseln. Diese Streifen werden, wenn der Wagen verschoben wird, an einer Lichtschranke vorbeigeführt.⁹ Dies führt zu Hell-Dunkel-Impulsen, deren Anzahl über einen Zähladapter dem Rechner übermittelt wird. Im Auswertungsprogramm des Rechners wird dann die einlaufende Zahl mit dem Abstand der Streifen auf dem Zählrad multipliziert. Dies ergibt den vom Wagen zurückgelegten Weg s . Der Rechner setzt die beiden beschriebenen Signale in ein $U(s)$ - bzw. $I(s)$ -Diagramm um und gibt sie über den Bildschirm aus.

Wenn, wie im Fall des Grundkurses, in dem die Unterrichtseinheit erprobt wurde, den Kollegiaten die Messwerterfassung mit Hilfe des Computers bereits von anderen Versuchen vertraut ist, so kann die Einführung natürlich entsprechend kürzer gefasst werden. Sollte der Kurs aber noch nie eine Messwerterfassung und Auswertung mit Hilfe eines Rechners gesehen haben, so sollte man sich an dieser Stelle mehr Zeit für die Einführung nehmen. Es wäre in diesem Fall auch wichtig, den Schülern die richtige Erfassung der Messgrößen durch den Computer vorzuführen. Dazu bewegt man den Wagen z.B. bei konstanter Spannung (Laser ausgeschaltet) entlang der Fahrbahn und beobachtet gleichzeitig die Bildschirmausgabe des $U(s)$ -Diagramms. Auch die Ausgabe der am Vorwiderstand abfallenden Spannung wird bei konstantem Ort (stehender Wagen) getestet. Dazu wird der Laser eingeschaltet, langsam immer näher an das Zentrum der lichtempfindlichen Fläche des LDR herangeführt und dabei die Bildschirmausgabe des $U(s)$ -Diagramms beobachtet.

Experimenteller Hauptteil der Stunde

Nach dieser kurzen Erklärung des Messverfahrens beginnt die erste Messung mit dem Rechner als Auswertungsgerät. Es wird die „Interferenzfigur“ hinter einem **Doppelspalt** aufgenommen. Dazu wird der Doppelspalt in den Strahlengang des Lasers gebracht und der Wagen bei absoluter Dunkelheit *sehr* langsam von einer Seite des „Leuchtbereichs“ zur anderen bewegt. Es ist bei der Justierung darauf zu achten, dass die Mitte der lichtempfindlichen Fläche des Fotowiderstands immer entlang der Mittelachse des „Leuchtbereichs“ bewegt wird. Das Ergebnis der Messung ist das $I(s)$ -Diagramm der Abbildung 1.

Zunächst ist dem Diagramm eindeutig zu entnehmen, dass hier eine Interferenzerscheinung mit Maxima und Minima vorliegt. Die auch zu erkennende zusätzliche Struktur wird hier nur festgestellt, aber zunächst nicht diskutiert. Bereits hier lässt sich also mit den Schülern die Analogie zum Mikrowellenversuch herausstellen. Es ist sinnvoll (manch ein Schüler wird sogar selbst danach fragen) darauf einzugehen, dass die Minima in der Interferenzfigur nicht bis zur Intensität Null herabreichen. Dies liegt daran, dass die Minima sehr schmal sind und deshalb kaum aufgelöst werden können. Während des Gesprächs über diese Problematik wird das aufgenommene $I(s)$ -Diagramm (vgl. Abbildung 1) ausgedruckt.

⁷ Zum Thema AD-Wandler genügt es, den Schülern mitzuteilen, daß der Computer nur digitale Signale verarbeiten kann und der AD-Wandler deshalb die ankommenden analogen Signale in digitale umwandelt.

⁸ Die Bewegung des Wagens, also dessen Ort, kann prinzipiell auch noch auf andere Weise registriert werden. Man kann z.B. auch mit Hilfe eines Sonarmeters und eines auf dem Wagen angebrachten Reflektionsschirms (größere ebene Fläche) den Abstand Sonarmeter—Wagen bestimmen, oder den Ort des Wagens mit Hilfe eines Potentiometers in ein elektrisches Potential umsetzen.

⁹ Eigentlich handelt es sich um zwei direkt nebeneinander angebrachte Lichtschranken. Auf diese Weise kann anhand der Reihenfolge der Verdunklungsimpulse an den Lichtschranken die Laufrichtung des Rades bestimmt werden.

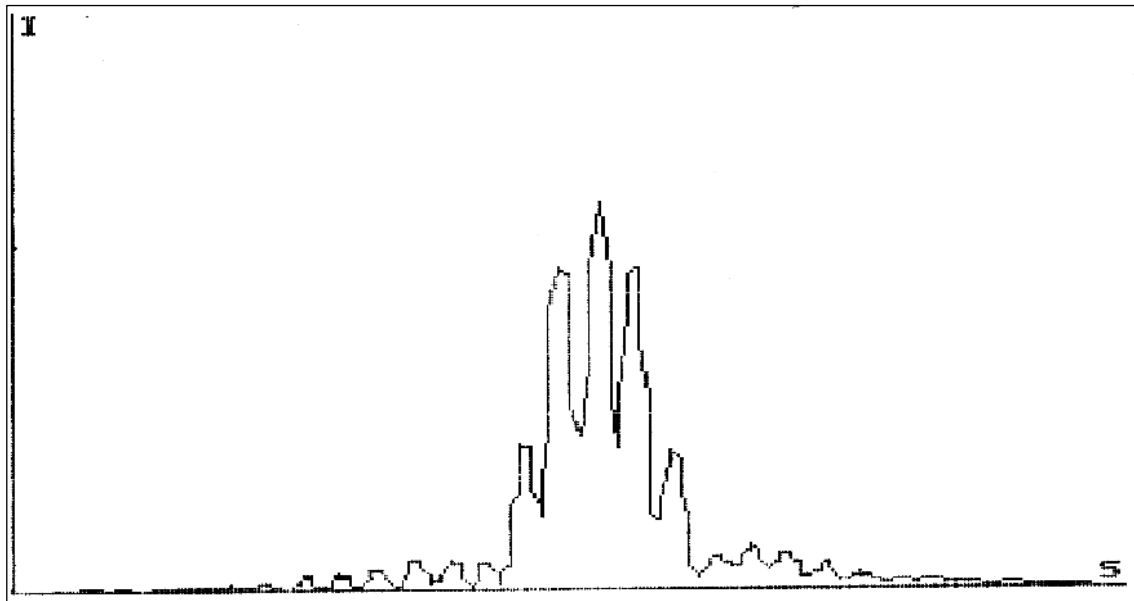


Abbildung 1: $I(s)$ -Diagramm der Interferenzfigur hinter einem Doppelspalt

Als nächstes wird die Frage aufgeworfen, welche Auswirkung es hat, wenn man mehr als zwei Spalte benutzt, die aber schmaler sind (kleinere Spaltbreite) und näher beieinander stehen (kleinere Gitterkonstante), also ein sogenanntes **optisches Gitter** verwendet. Man lässt eine Reihe von Vermutungen aufstellen und sammelt diese nur, ohne sie zu bewerten. Anschließend wird im nächsten Versuch die Interferenzfigur hinter einem Gitter mit 100 Spalten pro Zentimeter aufgenommen. Beim vorliegenden Durchmesser des Laserstrahls (ca. $0,5 - 1 \text{ mm}$) werden also ca. 5 bis 10 Spalte ausgeleuchtet. Die Versuchsdurchführung erfolgt wie beim Doppelspalt. Das resultierende $I(s)$ -Diagramm zeigt Abbildung 2.

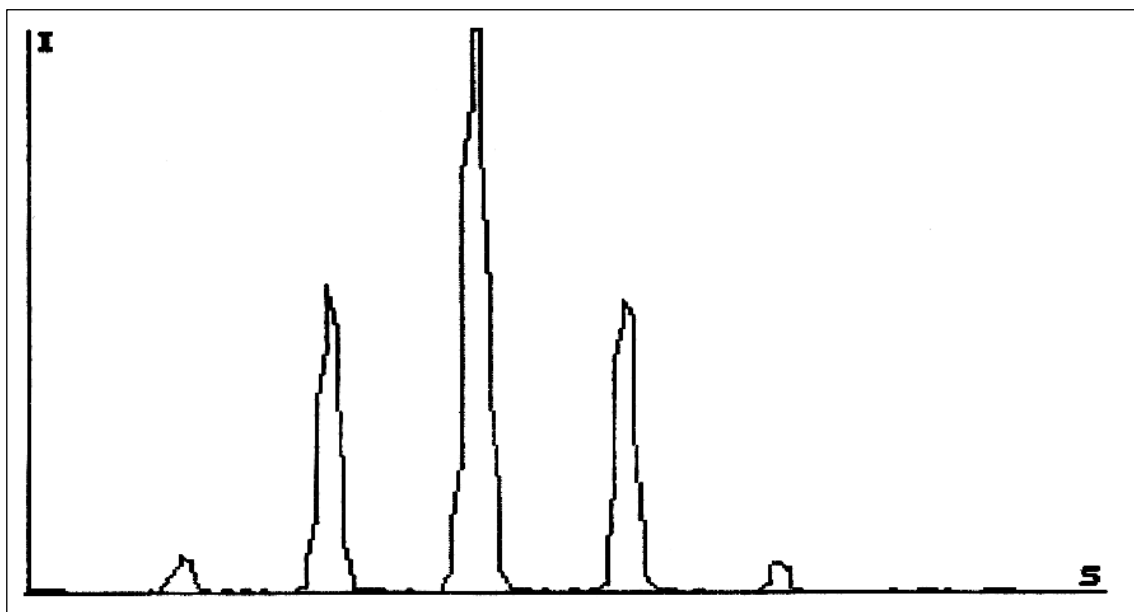


Abbildung 2: $I(s)$ -Diagramm der Interferenzfigur hinter einem Gitter mit 100 Strichen pro Zentimeter

Hier sind die Maxima und Minima noch deutlicher zu erkennen als beim Interferenzbild nach dem Doppelspalt. Spätestens jetzt werden die Schüler überzeugt sein, dass auch bei sichtbarem Licht Interferenzerscheinungen

auftreten. Man sollte an dieser Stelle auch nicht versäumen, den „Strahlengang“ nach dem Gitter zu verfolgen. Dazu bläst man den Rauch einer Zigarette vor und hinter dem Gitter in den Laserstrahl. Dadurch lassen sich die Interferenzmaxima als einzelne „Strahlen“ verfolgen.¹⁰

Für diesen Versuch, bei dem die Maxima bereits auf einem „Leuchtschirm“ deutlich voneinander getrennt erscheinen, misst man den gegenseitigen Abstand der Maxima (hier: $a_1 = 1,33 \text{ cm}$), die Entfernung Gitter–„Leuchtschirm“ (hier: $a = 210 \text{ cm}$).

Die Frage nach dem Zusammenhang zwischen Anzahl der Spalte, Gitterkonstante, Spaltbreite und der Lage der Maxima (bzw. Minima) im $I(s)$ -Diagramm konnte noch nicht geklärt werden. Es lässt sich mit den Kollegiaten an dieser Stelle leicht erarbeiten, dass dazu eine ganze Reihe weiterer Experimente notwendig ist, bei denen jeweils nur eine der genannten Variablen variiert wird und die anderen konstant gehalten werden. Nur so lassen sich die Wirkungen jeder einzelnen Variablen experimentell feststellen. Dies ist, wie den Schülern bereits anhand dieser beiden Versuche deutlich vor Augen geführt wurde, mit erheblichem Aufwand verbunden.¹¹ Der Kursleiter kündigt deshalb bereits jetzt an, dass die Kollegiaten diese Fragen in der folgenden Unterrichtsstunde im Rahmen eines Computerpraktikums mit Hilfe eines Simulationsprogrammes klären werden. Dadurch können praktisch alle Schüler gleichzeitig „experimentieren“.

2.1.3 Übertragung der Erkenntnisse bei Mikrowellen auf sichtbares Licht

Nach oben genanntem Ausblick auf die nächste Stunde geht der Kurs in den Kursraum zurück. Hier wird noch einmal gemeinsam zusammengetragen, wie man, analog zum Doppelspaltversuch mit Mikrowellen, das Zustandekommen der Maxima und Minima im Interferenzbild hinter dem Doppelspalt erklären kann. Der Analogieschluss von den Mikrowellen zum sichtbaren Licht liegt für die Schüler nach den beobachteten Versuchen derart nahe, dass es ihnen keine Schwierigkeit bereitet, die bei den Mikrowellen gewonnenen Erkenntnisse auch auf das sichtbare Licht zu übertragen. Um die Analogie deutlich herauszuarbeiten und den Schülern den Einstieg in die Materie zu erleichtern, sollte man sich an dieser Stelle darauf beschränken, die Doppelspaltkonfiguration theoretisch zu beschreiben. Zur Unterstützung der Erklärungen der Schüler sollte man die bekannte Grundlagenskizze, zur Herleitung der Gleichung $\Delta s = d \cdot \sin \alpha$ für den Zusammenhang zwischen dem Gangunterschied Δs , der Gitterkonstanten d und dem Winkel α unter dem ein Maximum (bzw. Minimum) erscheint, als Folie auf den Overheadprojektor (OVP) legen (vgl. Abbildung 3), bzw. notfalls an die Tafel skizzieren.

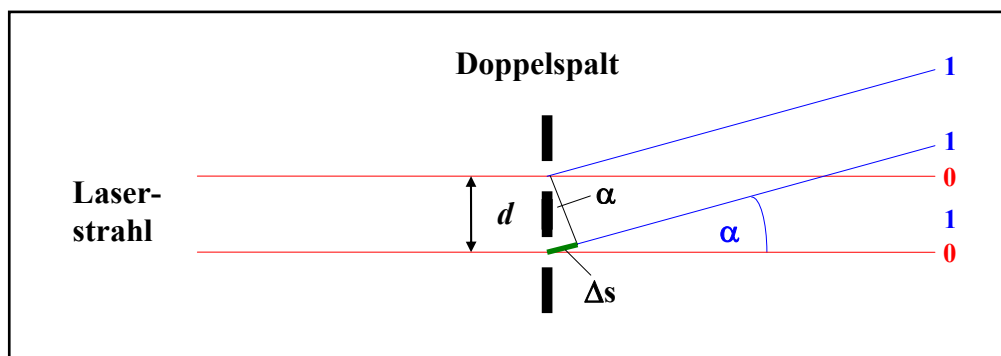


Abbildung 3: Herleitungsskizze zur Gleichung $\Delta s = d \cdot \sin \alpha$

Hefteintrag

¹⁰ Falls die erwähnten Strahlen nicht deutlich genug zu sehen sind, empfiehlt es sich ein „Rowlandgitter“ zu verwenden und den Versuch zu wiederholen, da sich hier eine größere Winkelablenkung zwischen den einzelnen Maxima ergibt und gleichzeitig deren Intensität größer ist.

¹¹ Trotzdem wird man im Leistungskurs noch mindestens einen Versuch zu Beugung und Interferenz am Spalt durchführen um eine experimentelle Grundlage für die spätere ausführliche Diskussion zu schaffen.

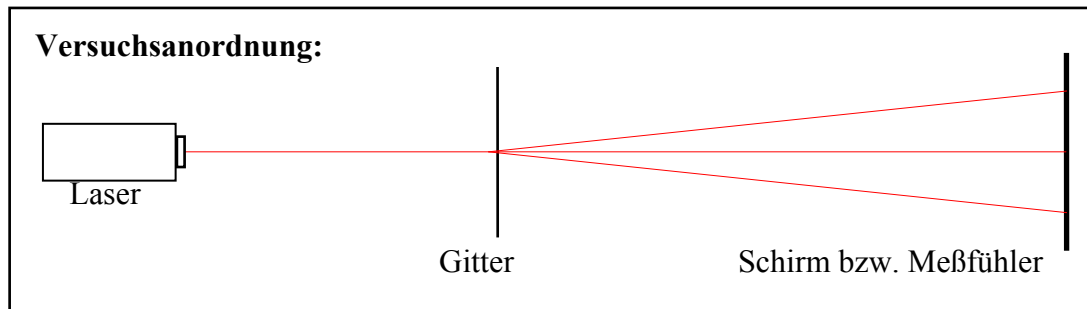


Abbildung 4: Prinzipielle Versuchsanordnung

Da es sich hierbei um reine Wiederholung handelt und in der übernächsten Unterrichtsstunde eine Zusammenfassung der Ergebnisse anhand eines Arbeitsblattes erfolgt, kann man sich beim Hefteintrag auf das Wesentlichste beschränken. Als Merkhilfe zu dieser Sitzung wird als Kapitelüberschrift „**Beugung und Interferenz bei sichtbarem Licht**“ und als Unterüberschrift „**Doppelspaltversuch**“ in das Heft eingetragen, der in **Abbildung 4** dargestellte prinzipielle Versuchsaufbau in Kopie ausgeteilt und in das Heft eingeklebt. Anschließend werden nur die beiden Gleichungen für Maxima und Minima in das Heft notiert.

Doppelspalt:

$$\text{Minima: } (2m+1) \cdot \frac{\lambda}{2} = d \cdot \sin \alpha$$

$$\text{Maxima: } m \cdot \lambda = d \cdot \sin \alpha$$

Anhand der Gleichung für Maxima lässt sich noch einmal überprüfen, ob der Analogieschluss von den Mikrowellen zum sichtbaren Licht auch sinnvolle Ergebnisse liefert.¹² Mit den gemessenen bzw. gegebenen Werten

Gemessene bzw. gegebene Werte:

- Entfernung Gitter–„Leuchtschirm“: $a = 210 \text{ cm}$
- Gegenseitiger Abstand der Maxima: $a_1 = 1,33 \text{ cm}$
- 100 Striche pro Zentimeter \Rightarrow Gitterkonstante $d = 10^{-4} \text{ m}$

kann man z.B. die Gleichung für das erste Maximum ($m = 1$) zur Berechnung der Wellenlänge des Laserlichts benutzen.

Berechnung der Wellenlänge des Laserlichts:

$$\lambda = d \cdot \sin \alpha \approx d \cdot \tan \alpha = d \cdot \frac{a_1}{a} = 10^{-4} \text{ m} \cdot \frac{1,33 \text{ cm}}{210 \text{ cm}} = 633 \text{ nm}$$

Der Vergleich mit der Angabe des Herstellers bezüglich der Wellenlänge λ_{Laser} zeigt, wie tragfähig der hier durchgeführte Analogieschluss ist.

Herstellerangabe: $\lambda_{\text{Laser}} = 632,8 \text{ nm}$

In der nächsten Stunde erhalten die Kollegiaten Kopien der ausgedruckten **I(s)-Diagramme** von den durchgeführten Messungen (mit Beschriftung, vgl. Abbildungen 1 und 2), die dann auch in das Heft eingeklebt werden. Der gesamte Hefteintrag setzt sich aus allen explizit genannten Teilen und den hier eingerahmten Stellen zusammen.

Am Ende der Stunde werden die Schüler noch einmal darauf hingewiesen, dass der Unterricht der nächsten Stunde im Computerraum stattfindet.

¹² Da die Maxima bei der Interferenzverteilung hinter dem Doppelspalt für Meßzwecke zu dicht beieinander liegen, werden für die rechnerische Überprüfung die Werte des Gitters verwendet. Dies legt bereits nahe, daß die Analogie evtl. noch weiter trägt als zunächst vermutet.

2.2 Versuchsaufbau und experimentelle Hinweise

2.2.1 Zielsetzung

Manch einer wird sich schon gefragt haben, wozu der Aufwand mit der computergestützten Messwertaufnahme und -ausgabe als $I(s)$ -Diagramm gut sein soll. Hätte es nicht auch gereicht, die Interferenz bei sichtbarem Licht mit Hilfe der von den Maxima gebildeten Interferenzflecken auf dem Leuchtschirm nachzuweisen? Einerseits sind manchmal benachbarte Maxima und Minima (z.B. bei der Doppelspaltinterferenz) mit dem Auge nur schwer zu trennen. Dies alleine würde es im Sinne eines experimentellen Nachweises der Lichtinterferenz bereits rechtfertigen, ein genaueres Erfassungssystem, wie eben die hier benutzte Computeranordnung, einzusetzen. Andererseits, dies ist für den Autor der ausschlaggebende Hintergrund, wird das Phänomen Interferenz in der Literatur immer auch mit Hilfe von Intensitätsdiagrammen dargestellt.¹³ Die in dieser Unterrichtseinheit eingesetzten Simulationsprogramme arbeiten ebenfalls mit Intensitätsgraphen. Sie können nur dann gewinnbringend eingesetzt werden, wenn die Schüler die Aussage dieser Diagramme vollständig durchschauen. Es ist also wichtig, den Kollegiaten ein Verständnis für diese Art der Darstellung zu vermitteln. Dies kann erfahrungsge- gemäß am leichtesten (gelegentlich sogar nur) dadurch geschehen, dass die Schüler die Entstehung eines solchen Diagramms direkt am Experiment mit verfolgen. Nur auf diese Weise verbindet sich nämlich mit der Darstellung eine konkrete Vorstellung des realen Zusammenhangs. Gerade das ist aber aus Sicht der Lerntheorie für eine Vernetzung der neuen Erkenntnisse mit bereits vorhandenem Wissen, aber auch für die ganzheitliche Erfas- sung des Phänomens besonders wichtig.

Dem Autor ging es bei der Konzeption der Versuche darum, dass sie

- einerseits leicht an verschiedenen Schulen mit unterschiedlichen Computer- und Geräteausstattun- gen nachgebaut werden können und
- andererseits übersichtlich und für Schüler möglichst leicht durchschaubar sind.

Dies hat dazu geführt, dass er manche Bauteile, die durchaus zu messtechnischen Verbesserungen beigetragen hätten, nicht verwendet hat. So wurde z.B. davon abgesehen, eine Fotodiode als lichtempfindliches Bauteil zu verwenden. Dies hätte zwar den Vorteil einer besseren Auflösung und einer im betrachteten Bereich sehr guten Linearität zwischen Fotostrom und Lichtintensität gehabt. Hierzu würde man aber entweder geeignete (erdffreie) Messverstärker von Lehrmittelfirmen benötigen, die selten in Sammlungen vorhanden sind, oder müsste selbst mit Hilfe von Schülerversuchsbauteilen (soweit vorhanden) eine Operationsverstärkerschaltung aufbauen.¹⁴ Beides würde den Aufbau für Schüler unübersichtlicher machen. Aus diesem Grund wird hier mit einem Foto- widerstand (LDR) gearbeitet, der eine für Schüler leicht überschaubare Messanordnung erlaubt. Außerdem weißt er einen, für die hier intendierten halbquantitativen Zwecke, ausreichend linearen Widerstandsverlauf in Abhängigkeit von der Lichtintensität auf.

Eine noch bessere Ortsauflösung als die hier beschriebene Anordnung ließe sich durch die Verwendung eines Motors erreichen, der den auf den Wagen montierten Fotowiderstand mit einer konstanten Geschwindigkeit von ca. 5 - 10 cm pro Minute durch die Interferenzfigur bewegt. Da hierzu entweder ein Schrittmotor, oder aber ein Motor mit geeigneter (sehr) großer Untersetzung notwendig ist (beides ist nur in wenigen Sammlungen vorhan- den), hat sich der Autor der hier beschriebenen und durchaus ausreichenden Auflösung mittels Handbetrieb bedient.

Die einzige wirkliche Anforderung an eine Sammlung, die der hier beschriebene Versuchsaufbau stellt, besteht darin, dass sie über einen Rechner und die zugehörige Hardware und Software verfügt, um Spannungen im Be- reich 0 bis 2 V und Ortsschwankungen ab $\Delta s \approx 0,9 \text{ mm}$ messen zu können.¹⁵ Alle anderen im Folgenden aufge- listeten Materialien müssten in ähnlicher Form in jeder Sammlung zu finden sein.

¹³ Vgl. hierzu alle im Literaturverzeichnis aufgeführten Lehrbücher der Experimentalphysik, physikalischen Nachschlagewerke und Schulbü- cher.

¹⁴ Die Schaltskizze einer hierfür geeigneten Schaltung ist beim Autor erhältlich.

¹⁵ Ortsschwankungen können auf verschiedene Weisen registriert werden. Zum einen mit Hilfe eines oben in seiner Funktionsweise be- schriebenen Zählrades, zum anderen läßt sich aber z.B. auch unter Verwendung eines Sonarmeters und eines auf dem Wagen angebrachten Reflektionsschirms (größere ebene Fläche) der Abstand Sonarmeter–Wagen bestimmen. Schließlich gibt es auch noch die Möglichkeit, den Ort des Wagens mittels eines Potentiometers direkt in ein elektrisches Potential umzusetzen.

2.2.2 Versuchsaufbau

Eine Gesamtansicht des Versuchsaufbaus ist der Abbildung 5 zu entnehmen. In den folgenden Abschnitten werden die verwendeten Geräte und Materialien nach Baugruppen getrennt aufgelistet. Natürlich handelt es sich dabei nicht um feste Vorgaben für die Art der Bauteile. Je nach den Gegebenheiten an verschiedenen Schulen und der Ausstattung der jeweiligen Physik-Sammlung wird man ähnliche Bauteile verwenden, die ebenso gut geeignet sind. Die Auswahl der hier verwendeten Bauteile wurde unter genau diesen Vorgaben getroffen.

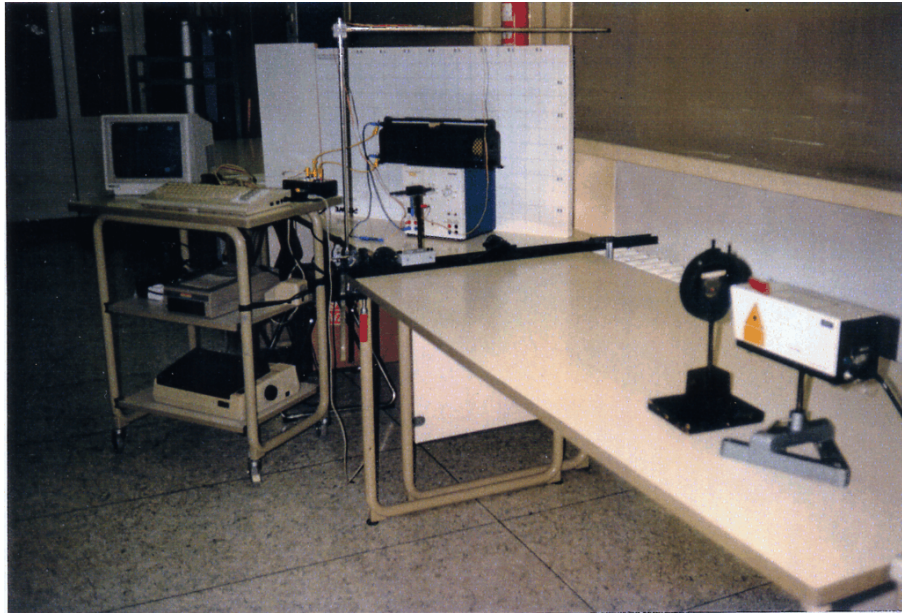


Abbildung 5: Gesamtansicht des Versuchsaufbaus

Laser und Gitter

Material:

- Laser: Phywe Laser, Klasse 2, DIN 58126, $\lambda = 632,8 \text{ nm}$, Art.-Nr.: 08177.93
- Blende mit Doppelspalt: Phywe Art.-Nr.: 8527
- Strichgitter: 100 Striche pro Zentimeter, Phywe Art.-Nr.: 8540



Abbildung 6: Laser und Gitter

Stromkreis des Fotowiderstands (Messung der Lichtintensität)

Material:

- Fotowiderstand: Phywe LDR, Art.-Nr.: 06049.12
- Technische Daten:
- Cadmiumsulfid-Fotowiderstand
 - Lichtempfindliche Fläche: $45\text{ mm} \cdot 18\text{ mm}$
 - Hellwiderstand: $280\ \Omega$
 - Dunkelwiderstand: $4,5\text{ M}\Omega$
 - Betriebsspannung: max. 150 V_DC
 - Maximale Empfindlichkeit: $\lambda = 675\text{ nm}$

Experimentelle Hinweise:

- Es ist notwendig, die lichtempfindliche Fläche des LDR bis auf einen schmalen Schlitz abzudecken. Der oben genannte Phywe Fotowiderstand verfügt in seinem Gehäuse über seitliche Einschnitte, so dass man einen Tonpapierstreifen mit einem geeigneten Schlitz einschieben kann (vgl. Abbildung 7). Bei anderen Widerständen muss die lichtempfindliche Fläche evtl. mit Gewebepapier abgeklebt werden.
- Wie in der Abbildung 7 zu erkennen ist, empfiehlt es sich, möglichst leichte und flexible Kabel für die Zuleitung zum Fotowiderstand zu benutzen und diese von oben über eine Gestängekonstruktion zuzuführen. Dies erweist sich als günstig, weil andere Formen der Kabelzuführung beim Verschieben des Wagens behindern und so evtl. die Ortsmessung beeinträchtigen.
- Die Grobeinstellung der Höhe des LDR auf dem Wagen lässt sich z.B. mit Bananensteckern und zugehörigen Steckverbindungen erreichen.

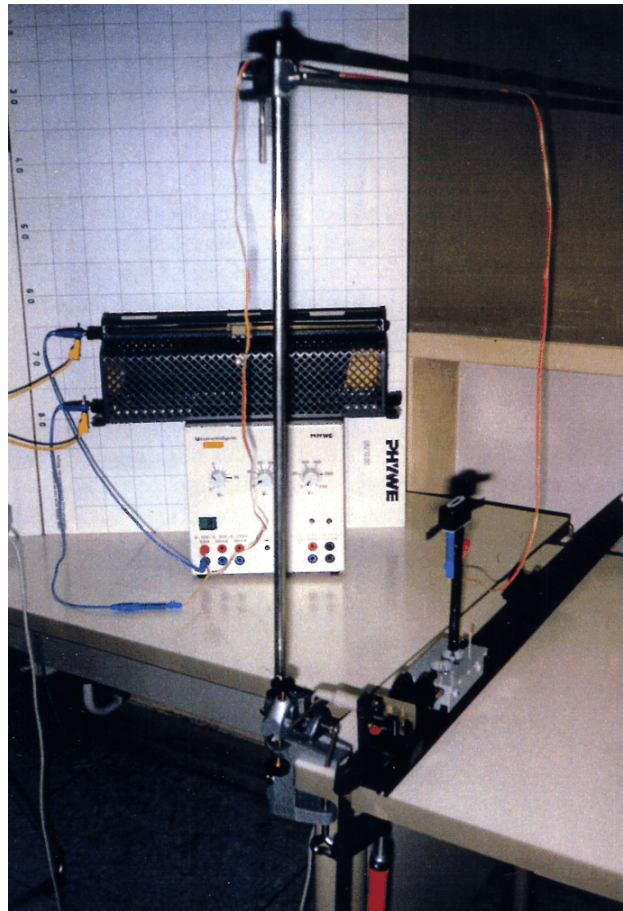


Abbildung 7: Stromkreis des Fotowiderstandes

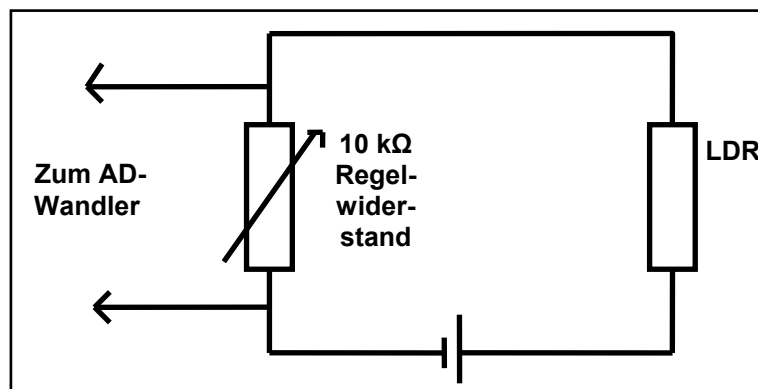


Abbildung 8: Schaltung des Fotowiderstandes

- Phywe Netzanschlussgerät, Art.-Nr.: 11725.93

Einstellung:

- Benutzter Abgriff: $0 \dots 12 V_-$; $0,6 A$
- Die von der Quelle gelieferte Spannung wird auf $5 V_-$ eingestellt (z.B. mit Hilfe eines Digital-Multimeters).

- Phywe Schiebewiderstand, Art.-Nr.: 965389

Technische Daten:

- Widerstandwert: $0 - 10.000 \Omega$
- max. Betriebsstromstärke: $0,2 A$

Einstellung:

- Der Schiebewiderstand wird so eingestellt, dass die Intensität des nullten Maximums beim Versuch mit dem Gitter gerade noch innerhalb des am Messwerterfassungssystem gewählten Messbereiches liegt. Der Peak des nullten Maximums in der Bildschirmausgabe der Grafik muss das Diagramm also gerade ausfüllen (vgl. nulltes Maximum in Abbildung 2).
- Konkret bedeutet das:
 1. Den Messbereich des Messwerterfassungssystem feststellen bzw. festlegen. (Im vorliegenden Fall wurde z.B. der Messbereich $0 - 2 V$ gewählt.)
 2. Das Gitter in den Strahlengang des Lasers bringen.
 3. Den Fotowiderstand in das nullte Maximum fahren und dort stehen lassen.
 4. Die dabei am Schiebewiderstand abfallende Spannung messen (z.B. mit einem Digital-Multimeter).
 5. Den Schiebewiderstand so einstellen, dass an ihm eine Spannung knapp unter der Obergrenze des Messbereichs (in unserem Fall knapp unter $2 V$) abfällt. (Hier war das z.B. beim Widerstandswert $5,61 k\Omega$ der Fall.)
 6. Ein $I(s)$ -Diagramm aufnehmen und kontrollieren, ob der Peak des nullten Maximums in der Bildschirmausgabe das Diagramm gerade ausfüllt.
 7. Falls dies nicht ausreichend genau der Fall ist, den Schiebewiderstand vorsichtig nachregeln.

Fahrbahn und Zählrad (Ortsmessung)

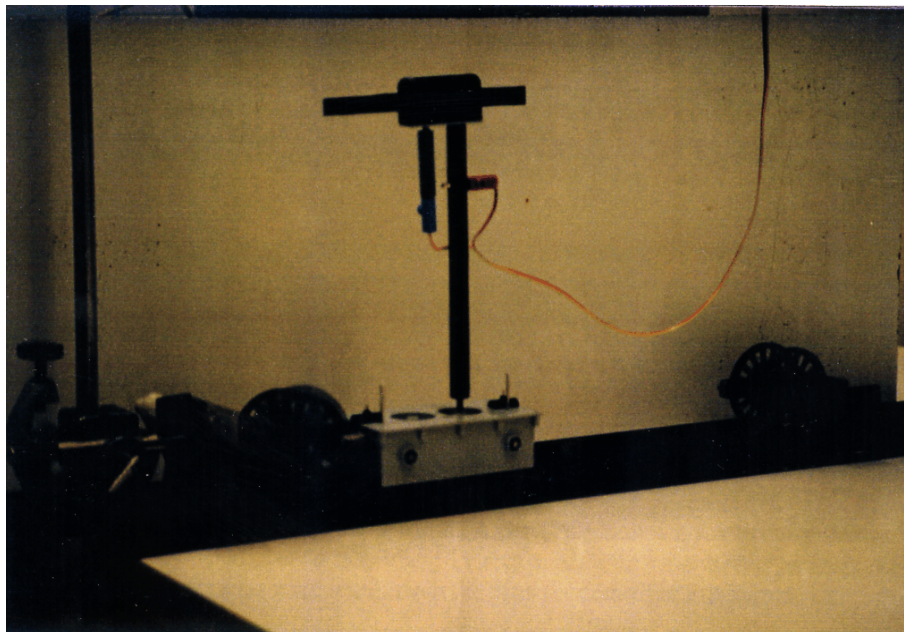


Abbildung 9: Fahrbahn und Zählrad

- Bei der hier verwendeten Fahrbahn handelt es sich um eine einfache Schülerversuchsfahrbahn mit zugehörigem Wagen und Umlenkrolle. Die Fahrbahn wurde mit Schraubzwingen am Tisch befestigt um selbst ein minimales Verrutschen während der Messung zu vermeiden.
- Das Zählrad wird über einen zugehörigen Zähladapter an den Rechner angeschlossen.
- Näheres zum Aufbau und zur Funktionsweise des Zählrades wurde bereits unter „2.1.2 Experimente zur Lichtinterferenz“ im Abschnitt „Erläuterung der computergestützten Messwerterfassung und -auswertung“ ausgeführt.

2.2.3 Die Hardware und Software

Der Versuch stellt weder größere Anforderungen an die Hardware noch an die Software. Es lässt sich nahezu mit jedem kommerziellen System arbeiten, das in der Lage ist, Spannungen im Bereich 0 bis 2V und Ortschwankungen ab $\Delta s \approx 0,9 \text{ mm}$ messen und in ein $U(s)$ -Diagramm umsetzen zu können. Benötigt werden dazu auf die eine oder andere Weise ein AD-Wandler zur Umsetzung der analogen Spannung in digitale Signale und ein Adapter, mit dem die gemessenen Ortsschwankungen in digitale Signale umgesetzt werden können. Beim hier verwendeten System handelt es sich bei letzterem um das nun schon mehrfach erwähnte Zählrad mit zugehörigem Zähladapter. Beim im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Unterricht wurde ein C64-Rechner benutzt, an dessen USER-Port ein USER-Verteiler aufgesteckt wurde, so dass der AD-Wandler und der Zähladapter gleichzeitig angeschlossen werden konnten (vgl. Abbildung 10). Für die Kollegiaten wird man diese Interfaces nur grob als „Signalübersetzungsbauteile“ beschreiben.

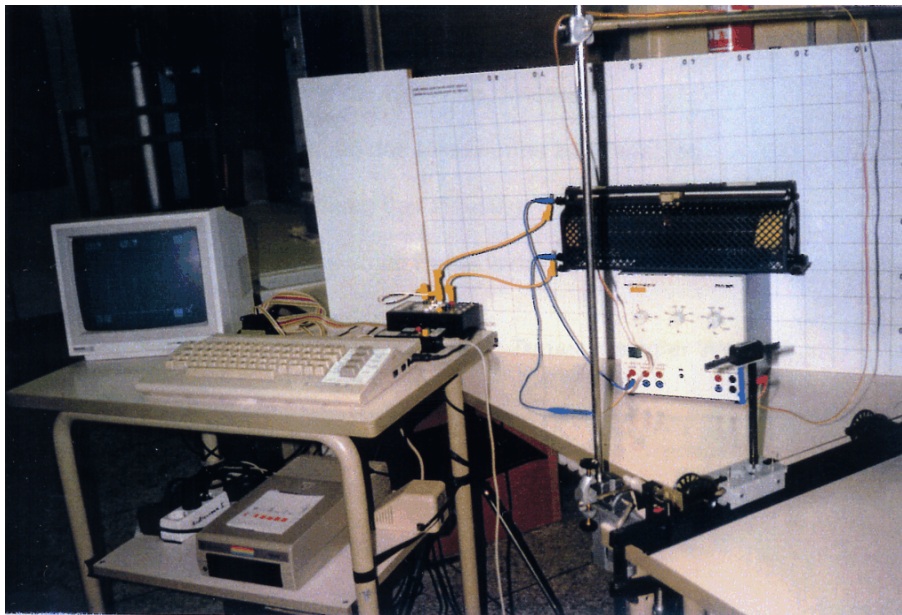


Abbildung 10: C64-Rechner und Interfaces mit Anschlüssen

Das benötigte Mess- und Auswertungsprogramm wurde in der (Programmier-)Umgebung **Pakma**¹⁶ in Comal mit Pakmaerweiterung geschrieben. Der in Abbildung 11 abgedruckte, kommentierte Quelltext des vom Autor dieser Arbeit geschriebenen Programms zeigt wie einfach die Struktur derartiger Programme ist.

¹⁶ Pakma ist eine Entwicklung des Lehrstuhls für Didaktik der Physik an der Universität Würzburg.

```

0010 PROC kern           // "Interferenzverteilung"
0020 dt:=0.2             // Festsetzung des Messintervalls (0,2 s)
0030 se:=0.1; sa:=0      // Festlegung des Anfangs- und Endpunktes der Wegachse
0040 ue:=2; ua:=0        // Festlegung des A.- und E.-Punktes der (Spannungs-)Intensitätsachse
0050 ufzs:=1/1119        // Umrechnungszahl Zaehl impuls =>Weg
0060
0070 grafik("a")        // Festlegung der Erscheinungsform des Grafikbildschirmes
0080
0090 u_meter             // Spannungsmessung
0100 vorb(1)             // Vorbereitung der Ablage 1
0110 m_bereich(2,0)      // Messbereich 0-2 V für alle Eingangskanaele für Spannungen
0120 mitt(200)           // Mittelung der Messwerte
0130 s_folg("e",dt)      // Festlegung der Messweise
0140
0150 zaehlen             // Zaehlen
0160 vorb(1)             // Vorbereiten der Ablage 1
0170 vor_rueck           // Vorwaerts- und Rueckwaertszaehlen
0180 trig("i")           // Festlegung der Triggerung
0190 s_folg("i",dt)      // Festlegung der Messweise
0200
0210 t:=0; s:=0          // Startwerte fuer Zeit und Ort auf Null setzen
0220 REPEAT              // Repeat-Schleife
0230 zaehlen             // Zaehlvorgang
0240 mes                 // Durchfuehrung einer Zaehlung
0250 ds:=mes_w*ufzs      // Berechnung des resultierenden zurueckgelegten Weges
0260
0270 u_meter             // Vorgang der Spannungsmessung
0280 mes_p(1)            // Messung
0290 u:=mes_wp(1)        // Zuweisung des Messwertes zur Variablen
0300
0310 s:=s+ds             // Berechnung des aktuellen Ortes
0320
0330 punkt(1,s,u)        // Ausgabe eines Punktes mit den Messwerten als Koordinaten
0340
0350 t:=t+dt             // Hochzaehlen der Zeit
0360 UNTIL s>0.096       // Abbruchkriterium (Hier: Zurueckgelegter Weg 9,6 cm)
0370 ENDPROC kern        // Programmende

```

Abbildung 11: Quelltext des vom Autor dieser Arbeit geschriebenen Programms „Interferenzverteilung“

3 Computerpraktikum: Simulation der Lichtinterferenz

3.1 Konzept des Computerpraktikums

Vor dem Hintergrund der Erkenntnis der Lerntheorie, dass selbst erarbeitete Erkenntnisse leichter behalten und auch besser mit der bereits vorhandenen Wissensstruktur vernetzt werden, liegt es nahe, das Verständnis der Auswirkungen der Variablen Gitterkonstante, Anzahl der Spalte, Wellenlänge des verwendeten Lichts und Spaltbreite auf die Interferenzfigur in Form eines Praktikums erarbeiten zu lassen. Am geeignetsten erscheint in diesem Zusammenhang zunächst immer das experimentelle Praktikum zu sein, da die Schüler hier direkt erleben können, welche Auswirkungen ihre konkreten, realen „Manipulationen“ haben. Dies stößt bei der hier behandelten Materie aber auf erhebliche Schwierigkeiten. Es gibt beispielsweise an keiner, dem Autor bekannten Schule genügend Materialien, um Gitterinterferenz mit sichtbarem Licht in Form von Schülerversuchen mit mehreren Gruppen durchzuführen. Daneben ist die Justierung der Versuche mit einigem Zeitaufwand verbunden, der es nicht erlauben würde viele Versuche durchzuführen. Bei vorhandenen Materialien müsste man also arbeitsteilige Gruppenarbeit durchführen. Dies hätte den Nachteil, dass den Schülern der Überblick wieder nur beim Zusammentragen der Ergebnisse vermittelt werden könnte. Alleine dieser Ausdruck „vermittelt werden“ macht deutlich, dass die Kollegiaten sich ihr Wissen nicht über eigene Erfahrung und persönliche intensive Auseinandersetzung angeeignet haben. Es fällt ihnen deshalb schwerer, ein Verständnis für die Inhalte zu entwickeln.

Da Selbsttätigkeit in Form eines experimentellen Praktikums hier nicht möglich ist, bietet sich als zweitbesten und gangbarer Weg ein Computerpraktikum an einem Simulationsprogramm zur Interferenz an. Dies hat gegenüber realen Schülerexperimenten in diesem speziellen Fall sogar den Vorteil, dass lange Aufbau- und Justierungszeiten zugunsten intensiverer Betrachtung der relevanten Sachverhalte wegfallen. So ergibt sich auch die Möglichkeit, arbeitsgleiche Gruppen zu bilden, so dass sich die Schüler im vorgegebenen Zeitrahmen (ca. 30 Minuten) mehr oder weniger mit allen Fragestellungen auseinandersetzen können. Es ist allerdings nicht unbedingt notwendig, dass alle Gruppen auch wirklich alle Arbeitsaufträge ausführen. Es ist vielmehr entscheidend, dass sie sich mit den Aufgaben, die sie bearbeiten, intensiv auseinandersetzen.

Beim Computerpraktikum der hier vorgestellten Unterrichtseinheit geht es natürlich nicht nur darum, die Schüler eigene Erfahrungen mit Interferenzphänomenen sammeln zu lassen, obwohl auch das ein erklärtes Ziel dieses Abschnitts ist. Noch wichtiger ist die kognitive Beschäftigung mit dem Problemkreis. Die Schüler können im Gegensatz zum lehrerzentrierten Unterricht jederzeit auf eine Fragestellung, die sie spontan interessiert, eingehen und sie untersuchen. Diese Chance des Praktikums sollte intensiv genutzt werden. Da jeder Kollegiat unterschiedlich viel Zeit benötigt, um sich mit einer Fragestellung auseinanderzusetzen, kann jede jeweils aus zwei bis drei Schülern bestehende Arbeitsgruppe selbst festlegen, wie lange sie sich mit jeder Aufgabe beschäftigen will. Um dies zu gewährleisten, werden die Arbeitsanweisungen nicht vom Lehrer verkündet, sondern auf den Arbeitsblättern (= Praktikumsprotokoll) mitgeteilt. Dabei ist es wichtig, nicht alle Blätter auf einmal zu verteilen, sondern zunächst nur das erste und sonst nur bei Bedarf der einzelnen Gruppe das jeweils nächste. Dadurch fühlen sich die langsameren Schüler durch den Umfang der Aufgaben nicht unter Druck gesetzt und die besseren Schüler erhalten durch die später ausgeteilten vermeintlichen Spezialaufgaben einen zusätzlichen Motivations Schub. Zusätzlich hat diese Vorgehensweise den Vorteil, dass der Kursleiter immer genau weiß, wie weit die einzelnen Arbeitsgruppen sind. Wenn er das nächste Arbeitsblatt vorbeibringt, kann er sich gleich davon überzeugen, ob die Arbeitsaufträge auf dem letzten Blatt intensiv genug bearbeitet wurden. Er kann gegebenenfalls auch Fragen beantworten und dosierte Hinweise geben.

Es wird hier mit dem Simulationsprogramm „**Interferenz am Gitter**“ aus dem Programmpaket **ALBERT**[®] des Springer-Verlags gearbeitet.¹⁷ In den Programmen dieses Pakets, die im Wesentlichen selbsterklärend sind und über eine ausgezeichnete Online-Hilfe verfügen, findet man sich schnell zurecht. Es gibt hier auch die Möglichkeit, die Oberfläche nach eigenen Wünschen zu gestalten und diese Konfiguration abzuspeichern. Leider gibt es aber einzelne Details, die nicht gespeichert werden können. Der Autor hat sich aufgrund seiner bisherigen Erfahrungen mit Schülerversuchen am Computer für eine Änderung der Grundkonfiguration entschieden. Es hat sich nämlich gezeigt, dass, falls ganz bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind, aus vorhandener bzw. fehlender Computerpraxis der Schüler keinerlei Vor- oder Nachteile für den Verständnisgewinn entstehen.

¹⁷ M. Wüllenweber: ALBERT[®], Physik Interaktiv, 1. Mechanik u. Wellenlehre, Optik, Version 1.1, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1996

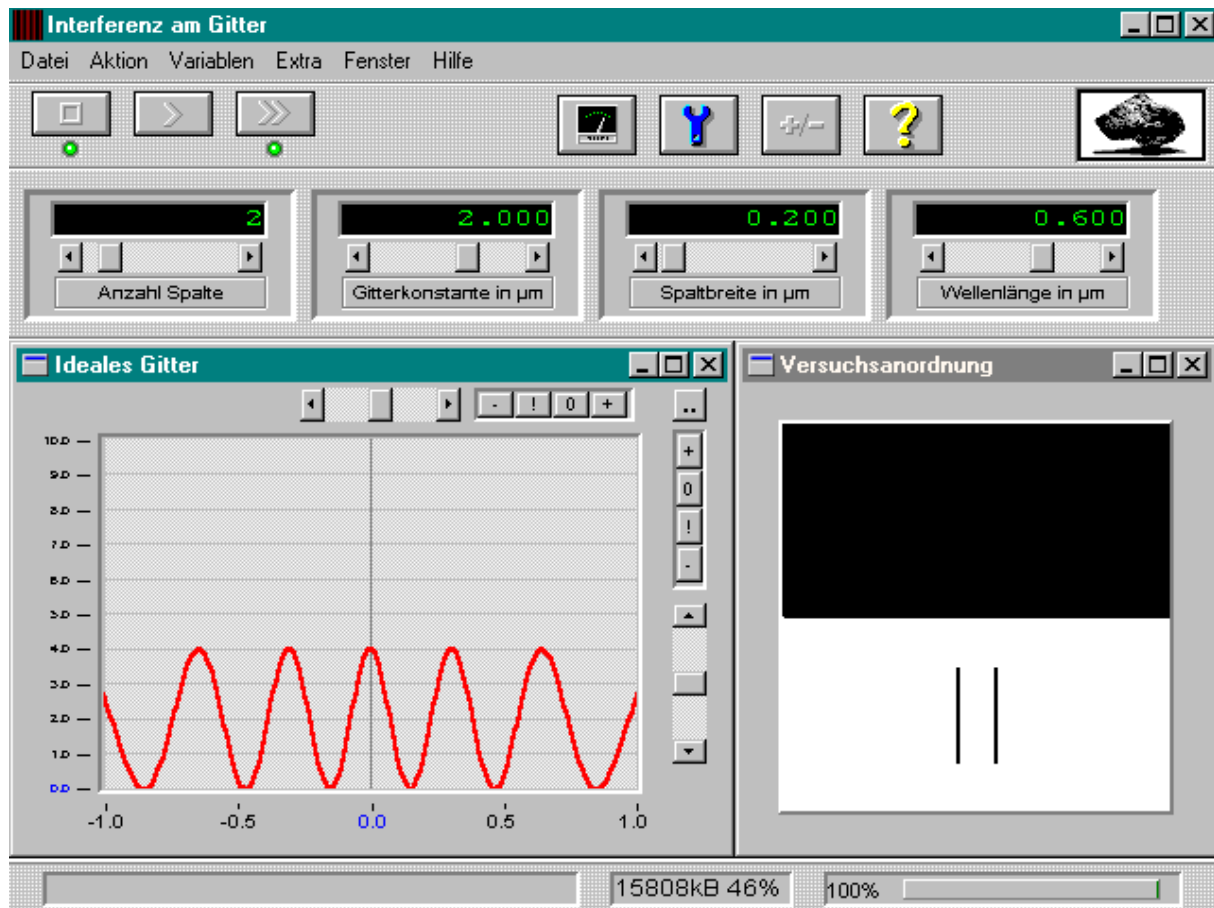


Abbildung 12: Oberfläche des Programms "Interferenz am Gitter" beim Starten des Programms

Diese Voraussetzungen sind im Einzelnen:

- Die Benutzeroberfläche muss übersichtlich gestaltet sein.
- Es sollte nur wenige Menüpunkte geben, an denen Einstellungen vorgenommen werden können bzw. müssen.
- Alle für den konkreten Unterrichtszweck nicht benötigten Menüpunkte sollten inaktiv und nicht sichtbar, am besten sogar völlig unerreichbar sein (auch für Computerfreaks!).
- Die Einführung in das Programm muss in maximal 5–10 Minuten so durchgeführt werden können, dass anschließend alle Schüler in der Lage sind, die Arbeitsaufträge auszuführen.¹⁸
- Es muss ein Arbeitsblatt geben, auf dem, für die Schüler jederzeit nachlesbar, alle wichtigen Hinweise und Arbeitsaufträge stehen und auf dem sie ihre Ergebnisse in eigenen Worten schriftlich festhalten müssen.

Mit dem hier benutzten Programm lassen sich alle eben genannten Punkte realisieren, mit einer Ausnahme: Die nicht benötigten Menüpunkte sind teilweise noch sichtbar und können jederzeit erreicht werden. Um dem oben beschriebenen Ideal so nahe wie möglich zu kommen, hat der Autor sich eine geeignete Startkonfiguration überlegt. Um diese herzustellen, müssen, da leider nicht alle Details gespeichert werden können, eine Reihe von Manipulationen vorgenommen werden. Diese zunächst lästige Notwendigkeit kann dazu genutzt werden, Schülern, die bisher noch nie oder sehr selten selbst mit einem Computer konfrontiert waren, den Einstieg mit einem kleinen Erfolgserlebnis zu erleichtern. Die unter „Vorbereitung“ auf dem ersten Blatt des Praktikumsprotokolls abgedruckten Arbeitsaufträge lassen sich nämlich leicht umsetzen. Die Abbildungen 12 und 13 zeigen die Oberfläche des Programms „Interferenz am Gitter“ vor bzw. nach den Vorbereitungen und sollen einerseits die Unterschiede dokumentieren und andererseits helfen, die folgenden Ausführungen nachzuvollziehen.

¹⁸ Es ist aus mehreren Gründen wichtig, daß die Einführung derart schnell (und effektiv!) erfolgen kann. Zum einen wird die Zeit für das eigentliche Praktikum dringend gebraucht, zum anderen fühlen sich „Computerfreaks“ sehr schnell gelangweilt und versuchen sich die Zeit mit Ausflügen im Programm zu vertreiben, während Computerneulinge bei längeren Erklärungen sehr schnell innerlich das Handtuch werfen und einfach glauben, daß sie das sowieso nicht verstehen.

An dieser Stelle ist es auch wichtig darauf hinzuweisen, dass die Startkonfiguration bewusst so gewählt wurde, dass die Interferenzfigur im Fenster „Reales Gitter“ der Interferenzfigur entspricht, die in der Vorstunde mit dem Strichgitter aufgezeichnet wurde. Dieser Wiedererkennungseffekt, der bei allen Schülern eintritt,¹⁹ erleichtert es ihnen (genau wie die erneute Darstellung der zugrunde liegenden experimentellen Anordnung auf der ersten Seite des Praktikumsprotokolls), sich immer zu vergegenwärtigen, welcher Versuch dem Simulationsprogramm zugrunde liegt.

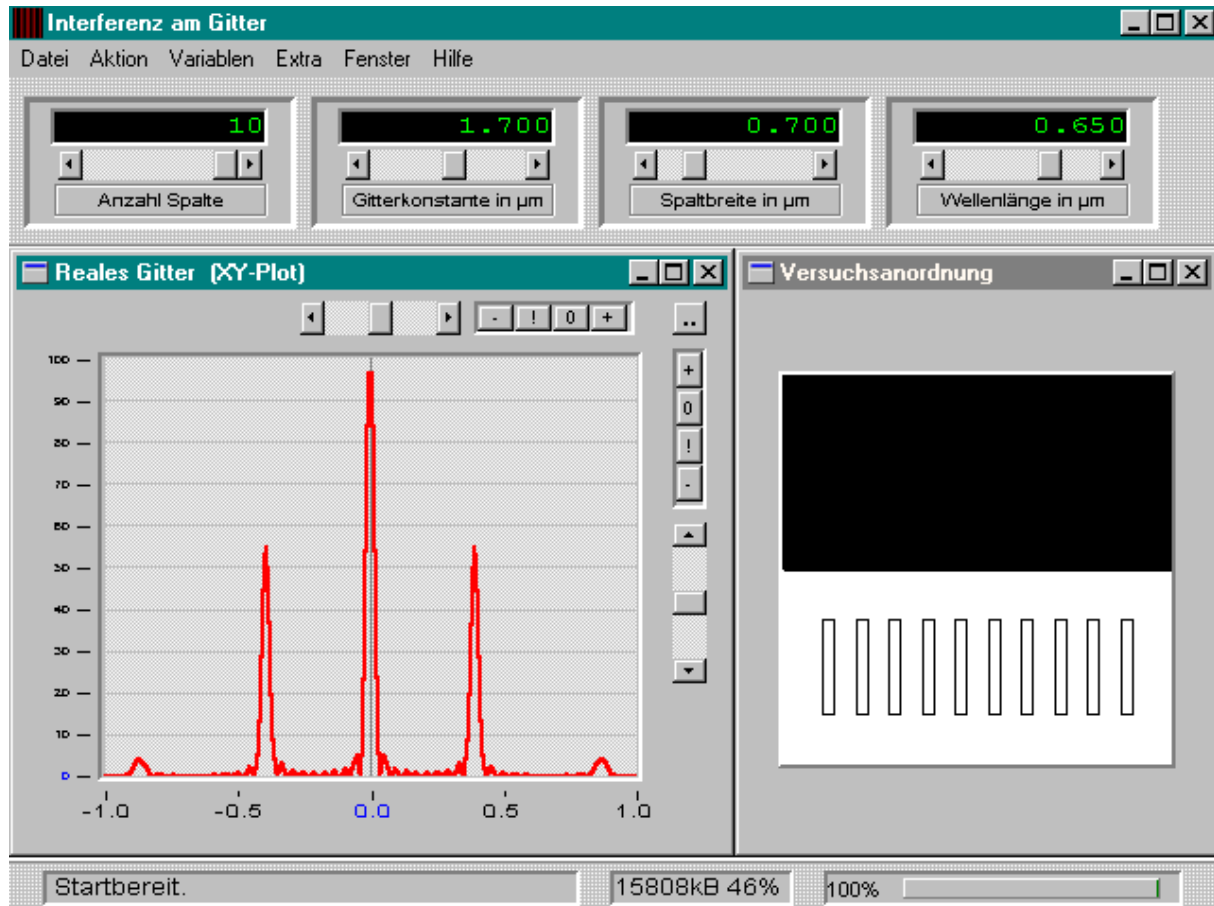


Abbildung 13: Oberfläche des Programms "Interferenz am Gitter" nach Abschluss der Vorbereitungen

3.2 Konkrete Umsetzung

Im vorliegenden Abschnitt wird die konkrete Vorgehensweise in der Stunde des Computerpraktikums im Einzelnen geschildert.

Zunächst stellt der Lehrer den Schülern vor, was im Verlauf des Praktikums auf sie zukommt. Anschließend teilt er das erste Blatt des Praktikumsprotokolls aus, das auf den folgenden drei Seiten abgedruckt ist, und macht auf wesentliche Details aufmerksam (z.B. darauf, dass die grün unterlegten wichtigen Hinweise gründlich zu lesen und zu beherzigen sind). Dann wird das Arbeitsblatt gemeinsam von oben nach unten besprochen.

Die Skizze der experimentellen Anordnung erinnert noch einmal an den realen Versuchsaufbau, den die Kollegiaten in der letzten Stunde gesehen haben.

Es folgt die Einführung in die Bedienung des Programms. Dazu benutzt der Kursleiter einen Rechner mit OVP-Display, so dass die Schüler jeden Schritt direkt mit verfolgen können. Den Kollegiaten wird jeder Bedienungsvorgang schrittweise am Bildschirm erklärt und sie werden jeweils direkt anschließend aufgefordert, ihn an ihrem Computer nachzuvollziehen. Dies beginnt mit dem Starten und Konfigurieren des Programms, wobei

¹⁹ Falls er einmal nicht eintreten sollte, genügt ein kurzer Hinweis an die Kollegiaten sich die Interferenzfigur im Fenster „Reales Gitter“ einmal genau anzusehen.

Schritt für Schritt nach den Angaben auf dem Arbeitsblatt vorgegangen wird. Am Ende dieses Vorgangs haben alle Schülergruppen denselben Ausgangsbildschirm.²⁰


An diesem Punkt angelangt erläutert der Lehrer anhand der Projektion des OVP-Displays den Fensteraufbau analog zu den auf dem Praktikumsprotokoll abgedruckten Angaben. Wenn es hierzu keine Fragen mehr gibt, fordert der Kursleiter den Kurs dazu auf, die Arbeitsaufträge durchzulesen und sich insbesondere die „wichtigen Hinweise“ gut einzuprägen. Es wird den Kollegiaten Zeit zum Lesen gegeben. Anschließend wird anhand der Projektion des OVP-Displays die Auswirkung der Gitterkonstante auf die Interferenzfigur beobachtet. Dabei lernen die Schüler wie die Arbeitsaufträge umgesetzt werden können. Anschließend werden die Kollegiaten aufgefordert, den gesehenen Vorgang an ihrem Rechner zu wiederholen, die Ergebnisse schriftlich zu fixieren und sich beim Kursleiter zu melden, wenn sie den Arbeitsauftrag ausgeführt haben.

Damit beginnt die eigenständige Arbeit in den Übungsgruppen. Ab diesem Zeitpunkt bewegt sich der Lehrer zwischen den einzelnen Gruppen hin und her und ist für Fragen jederzeit ansprechbar, hütet sich aber tunlichst davor, zu viele gutgemeinte Ratschläge zu geben. Er sollte nur eingreifen, wenn das „Versuchsergebnis“ ersichtlich falsch interpretiert wurde. In diesem Fall muss er einen weiteren Versuchslauf anordnen und sich von den Schülern ihre Beobachtungen und Schlussfolgerungen direkt darlegen lassen.

Der Lehrer muss die Schüler bei seinen Rundgängen immer wieder dazu anhalten, sich intensiv mit den Versuchsausgängen zu beschäftigen. Dazu kann er sich leicht an der schriftlichen Fixierung der Ergebnisse orientieren. Fallen sie sehr spärlich aus oder sind sie gar nicht vorhanden, dann hat sich die Gruppe in der Regel nicht intensiv genug mit der Problematik auseinandergesetzt. In der Tat scheinen sehr viele Schüler Schwierigkeiten zu haben, physikalische Sachverhalte schriftlich auszudrücken. Folglich ist für eine angemessene, schriftliche Fixierung der Ergebnisse für diese Schüler genau die intensive, kognitive Auseinandersetzung notwendig, die hier angestrebt wird.

Wichtig ist auch, dass der Lehrer nicht zu viele neue (und sicher auch interessante) Fragen aufwirft. Die Schüler sollen sich ja selbst und in ihrem Tempo um die Probleme bemühen, die sie selbst sehen und die gelegentlich ganz anders aussehen (und sich teilweise auch auf einem anderen Niveau bewegen) als es der Lehrer erwartet. Gerade hier liegt aber die Chance der eigenständigen Arbeit. Es kann am Grundlagenverständnis gefeilt werden, indem die Kollegiaten spontan auftretende Fragen aufgreifen und sich mit ihnen auseinandersetzen. Folglich ist es wichtig, dass der Lehrer ab und zu in jeder Gruppe nach aktuellen Problemen fragt und, egal um welches Problem es sich handelt, gemeinsam mit ihr nach einer Lösung forscht (und diese nicht einfach angibt, z.B. weil die Frage schon im Unterricht behandelt wurde).

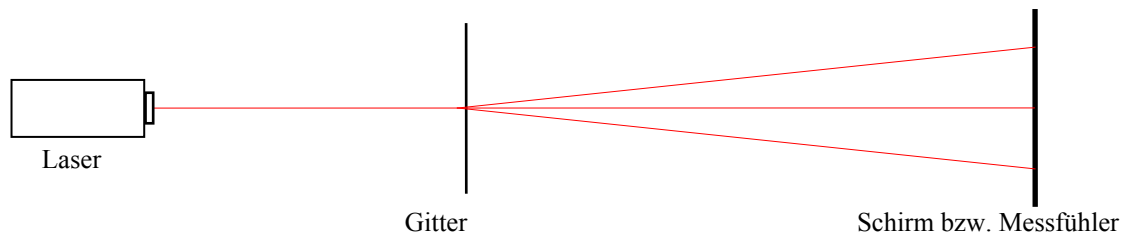
Bei der Untersuchung der Auswirkung der Gitterkonstanten auf die Interferenzfigur, werden, wie bei allen folgenden Aufgaben, die übrigen drei Variablen, nämlich Anzahl der Spalte, Wellenlänge des Lichts und Spaltbreite konstant gehalten und die zu untersuchende Variable, durch Anklicken der Pfeiltasten unterhalb der zugehörigen Digitalanzeige, variiert. Neben der schriftlichen Fixierung der Ergebnisse wird hier auch der Nachweis der Vereinbarkeit mit der Gleichung $m \cdot \lambda = d \cdot \sin \alpha$ verlangt. Dies dient wieder der Kontrolle, ob der Analogieschluss von den Mikrowellen zum sichtbaren Licht sinnvoll war und bringt die Kollegiaten gleichzeitig dazu, sich intensiv mit ihren gerade gewonnenen Erkenntnissen auseinanderzusetzen.

Fünf Minuten vor dem Stundenende gibt der Kursleiter die allgemeine Anweisung, die gerade begonnene Teilaufgabe abzuschließen und anschließend keine neue zu beginnen. Es muss hier aber deutlich darauf hingewiesen werden, daß dazu noch genügend Zeit bleibt, sonst bricht in einigen Arbeitsgruppen Hektik aus. Dies führt dazu, daß die letzte Teilaufgabe dann nur noch sehr oberflächlich bearbeitet wird. Eine Minute vor dem Ende des Unterrichts wird dann gemeinsam das Programm verlassen (durch anklicken des Abbruchsymbols ) , anschließend wird der Rechner heruntergefahren und ausgeschaltet.

²⁰ Sollte wider erwarten eine Gruppe doch Schwierigkeiten haben einen der Schritte nachzuvollziehen, so gibt der Lehrer zunächst einen zusätzlichen kurzen Hinweis. Wenn dieser nicht ausreicht, fordert er die Gruppe auf, sich auf die einzelnen Schritte am OVP-Display zu konzentrieren, sie zu verstehen und nicht weiter zu versuchen, ihren Rechner zu konfigurieren. Erst müssen alle anderen Gruppen bis zur selbständigen Arbeit gebracht werden. Dann kann der Kursleiter sich ganz der einen Gruppe und deren Problemen widmen. Dadurch, daß sie alle Konfigurationsschritte auf ihrem Arbeitsblatt stehen haben, sind sie nach der Behebung eines eventuellen Fehlers jederzeit in der Lage die Grundkonfiguration herzustellen (auch ohne Hilfe des Lehrers).

Untersuchung der Gitterinterferenz bei sichtbarem Licht²¹

Experimentelle Anordnung



Vorbereitung:

- Programm „**Interferenz am Gitter**“ des Programmpakets **ALBERT**[®] laden.
- **Alle folgenden Schritte mit der Maus und der linken Maustaste durchführen.**
- Im Menüpunkt **Datei** den Unterpunkt **Laden** aufrufen
- Datei **inter.alb** mit **OK** öffnen
- Fenster **Ideales Gitter** schließen
- Im Menüpunkt **Variablen** den Unterpunkt **Variablen anzeigen** aufrufen
- Variable **Reales Gitter** anklicken und anschließend die Tasten **anzeigen** und **Fertig**
- Im Menüpunkt **Fenster** den Unterpunkt **Schalterleiste entfernen** aufrufen
- Im Menüpunkt **Fenster** den Unterpunkt **Nebeneinander** aufrufen

Fensteraufbau:

- In der oberen Leiste sehen Sie Digitalanzeigen der aktuellen Einstellungen der Variablen.
- Im Fenster **Reales Gitter** (links) sehen Sie die aus den aktuellen Einstellungen resultierende Intensitätsverteilung hinter dem Gitter.
- Das Fenster **Versuchsanordnung** (rechts) zeigt im unteren Teil eine vergrößerte Darstellung des Gitters.

Arbeitsaufträge:

Sie sollen untersuchen, welche Auswirkung die Veränderung der Variablen

- Gitterkonstante
- Anzahl der Spalte
- Wellenlänge
- Spaltbreite

auf die Intensitätsverteilung bei der Gitterinterferenz hat.

Wichtige Hinweise:

- Führen Sie alle Arbeitsschritte und Einstellungen mit der Maus und der linken Maustaste durch!
- Mit den Tasten **+** und **-** am Rand des Fensters **Reales Gitter** lässt sich die Auflösung vergrößern bzw. verkleinern (jeweils einzeln für die x- bzw. die y-Achse). Stellen Sie bei jeder Untersuchung eine geeignete Auflösung ein.
- Verändern Sie immer nur eine Variable und lassen Sie die anderen in dieser Zeit konstant! Nur so können Sie klare Aussagen über die Auswirkungen einzelner Variablen treffen.
- Achten Sie jeweils auf die Lage der Maxima, deren Intensität und Breite.

1. Auswirkung der Gitterkonstante

Wie sie wissen, gibt die Gitterkonstante d den Spaltmittenabstand zweier benachbarter Spalte an. Untersuchen Sie die Auswirkung der Gitterkonstanten, indem Sie diese bei einer größeren Anzahl von Spalten (z.B. 10) variieren.

Notieren Sie Ihre Erkenntnisse und zeigen Sie (schriftlich), dass diese mit der Ihnen bekannten Formel für Interferenzmaxima vereinbar sind.

²¹ Hier ist Licht im Wellenlängenbereich zwischen 400 und 800 nm gemeint, dem für das menschliche Auge sichtbaren Spektralbereich.

2. Auswirkung der Anzahl der Spalte

Variieren Sie die Anzahl der Spalte bei jeder der folgenden beiden Aufgabenstellungen im gesamten, in diesem Programm vorgesehenen Bereich (1-10).

a) Achten Sie zuerst auf die deutlich ausgeprägten Maxima (Hauptmaxima) und beschreiben Sie Ihre Beobachtungen.

b) Betrachten Sie nun die Intensitätsverteilung zwischen den Hauptmaxima genauer. Versuchen Sie einen Zusammenhang zwischen der Anzahl der Spalte N und der Anzahl der sogenannten Nebenmaxima zu finden und formulieren Sie ihn.

3. Auswirkung der Wellenlänge des Lichts

Jetzt soll es darum gehen, welchen Einfluss die Wellenlänge²² λ des Lichts, mit der das Gitter beleuchtet wird, auf die Intensitätsverteilung hinter dem Gitter hat.

Notieren Sie auch hier Ihre Beobachtungen und untersuchen Sie wieder, ob diese mit der Formel für die Interferenzmaxima $d \cdot \sin \alpha = m\lambda$ vereinbar sind.

²² bzw. Frequenz (vgl.: $c = f \cdot \lambda$)

4. Auswirkung der Spaltbreite

- a) Setzen Sie zunächst die **Anzahl der Spalte** auf 1 (Einfachspalt).
Variieren Sie nun die Spaltbreite und notieren Sie Ihre Erkenntnisse.
- b) Stellen Sie jetzt folgende Werte ein: Anzahl Spalte: $N = 2$; Gitterkonstante: $d = 2.000 \text{ } \mu\text{m}$; Spaltbreite: $b = 0.100 \text{ } \mu\text{m}$; Wellenlänge: $\lambda = 0.500 \text{ } \mu\text{m}$.
- c) Variieren Sie die Spaltbreite und schreiben Sie Ihre Beobachtungen auf.
- d) Fügen Sie nun im Fenster **Reales Gitter** die Variablen **Einzelspalt** und **Ideales Gitter** hinzu. Gehen Sie dabei auf folgende Weise vor, indem Sie die Maus und die linke Maustaste benutzen:
- Doppelklicken auf den grauen Rand des Fensters **Reales Gitter**
 - Taste **Variable hinzufügen** anklicken
 - Variable **Einzelspalt** mit **OK** auswählen
 - Taste **Variable hinzufügen** anklicken
 - Variable **Ideales Gitter** mit **OK** auswählen
 - Variable **Reales Gitter** anklicken und **Dicke** stark vergrößern
 - Variable **Ideales Gitter** anklicken und **Dicke** auf den minimalen Wert setzen
- e) Vergrößern Sie die Spaltbreite schrittweise von 0.100 bis $3.000 \text{ } \mu\text{m}$ und achten Sie wieder auf die Intensitätsverteilungen. (Sie müssen jetzt nach jeder Änderung etwa zwei Sekunden warten, bis das Bild wieder aufgebaut ist.) **Ein ideales Gitter ist eines mit unendlich schmalen Gitterspalten, von denen nur jeweils genau eine Huygenssche Elementarwelle ausgehen kann.**
- f) Stellen Sie eine Hypothese auf, wie die Intensitätsverteilung eines realen Gitters zustande kommt und formulieren Sie diese.

4 Zusammentragen der gewonnenen Erkenntnisse

In der auf das Computerpraktikum folgenden Unterrichtsstunde werden die gewonnenen Ergebnisse zusammengetragen und vertieft. Dazu empfiehlt es sich, mit dem Kurs nicht im Physiksaal zu bleiben, sondern sich, sofern möglich, gleich im Physik-Übungsraum bzw. in einem nahegelegenen Klassenzimmer zu treffen. Hier soll nämlich kein lehrerzentrierter Unterricht stattfinden, sondern ein gleichberechtigtes Unterrichtsgespräch, in dem der Lehrer (nur) die Aufgabe eines guten Moderators übernimmt. Zu diesem Zweck ist eine Sitzordnung am besten geeignet, die es allen Kursteilnehmern erlaubt, sich gegenseitig direkt ins Gesicht sehen zu können. Gleichzeitig soll aber auch allen eine gute Sicht auf den großformatigen Computerbildschirm²³, bzw. auf das an die Wand geworfene Bild des (falls vorhanden besser geeigneten) OVP-Farbdisplays möglich sein. Letzteres ist notwendig, da als Diskussionsgrundlage und gelegentlich auch als Entscheidungshilfe das Programm „**Interferenz am Gitter**“ des Programmpakets **ALBERT**[®] in der aus dem Computerpraktikum gewohnten Form auf einem „Lehrerrechner“ aktiv ist. Dadurch kann der Lehrer jederzeit auf Anfrage aus dem Kurs die fraglichen „Operationen“ durchführen.²⁴

Da sich bereits alle Kursteilnehmer im Computerpraktikum selbstständig mit den zu besprechenden Fragestellungen auseinandergesetzt haben, ist eine Diskussion der Schüler untereinander wünschenswert und im Rahmen dieser Unterrichtseinheit auch intendiert. Sie sollen nämlich lernen, ihre Erkenntnisse zu formulieren, sie gegen eventuellen Widerspruch mit geeigneten Argumenten zu verteidigen, sich aber gegebenenfalls von besseren Argumenten anderer überzeugen (nicht überreden) zu lassen. Dabei geht es darum, dass die Kollegiaten ihre sprachliche Kompetenz trainieren und eine geeignete, physikalische Fachsprache einüben. Außerdem ist es im Hinblick auf die in Wirtschaft und Gesellschaft immer häufiger geforderte Teamfähigkeit notwendig, das Zusammentragen von Ergebnissen einzelner Gruppen und die gemeinsame Auswertung und Bewertung zu lernen.

Um die oben genannten Ziele zu erreichen, muss der Lehrer ein guter Gesprächsleiter sein, der in der Lage ist, die Äußerungen der Schüler nicht selbst zu bewerten, sondern im Sinne eines Moderators weitere Diskussionspunkte sammelt bzw. einfordert, zwischendurch die bis dahin gewonnenen Teilergebnisse zusammenfasst und eventuell Diskussionsbeiträge, die zu weit vom Thema wegführen, kanalisiert. Es ist dabei wichtig, dass der Kursleiter nicht zu viel von seinem Wissen einbringt und schon gar nicht fertige Konzepte liefert, sondern den Schülern nur gegebenenfalls vorsichtig Anregungen gibt, wie man die eigenen Konzepte hinterfragt. Der erfahrene Lehrer wird spätestens nach der Lektüre der letzten Sätze zu bedenken geben, dass es innerhalb einer Unterrichtsstunde schwer möglich sein dürfte, soviel offene, d.h. wenig gelenkte Interaktion zwischen den Schülern zuzulassen und andererseits eine ganze Reihe neuer Erkenntnisse zu fixieren und zum Verfügungswissen der Schüler zu machen. Dem hat der Autor Rechnung getragen, indem er den Kollegiaten die zeitaufwendige Schreibarbeit abgenommen hat. Sie erhalten, wie ihnen bereits am Anfang der Stunde mitgeteilt wird, am Ende der Stunde eine Zusammenfassung der Ergebnisse in Form der auf den folgenden beiden Seiten abgedruckten Arbeitsblätter. Dies hat den Vorteil, dass die Schüler sich länger und intensiver kognitiv mit den Inhalten auseinandersetzen können.

Der konkrete Ablauf der Unterrichtsstunde folgt der, den Arbeitsblättern zu entnehmenden Reihenfolge. Zu Beginn der Stunde wird anhand der auf dem ersten Arbeitsblatt ausgedruckten Skizze noch einmal die Entstehung der Hauptmaxima und Minima diskutiert. Hier wird das Problem der Entstehung der Minima beim Gitter allerdings nur kurz angerissen und auf eine exakte Erklärung in der Folgestunde verwiesen. Dabei werden die Arbeitsblätter entweder auf Folie ausgedruckt (bzw. kopiert) und mit dem Overheadprojektor (OVP) an die Wand geworfen, oder direkt aus der Arbeitsblattdatei auf dem Bildschirm bzw. über das OVP-Farbdisplay ausgegeben. Es wird dabei nur jeweils der Teil aufgedeckt, der gerade abschließend besprochen worden ist.

Die weiteren Gesichtspunkte auf dem Arbeitsblatt werden in der oben beschriebenen Weise mit Unterstützung des Programms „**Interferenz am Gitter**“ erarbeitet.

Bei der Besprechung der Abhängigkeit von der Wellenlänge sollte der Kursleiter kurz andeuten, dass die Wellenlänge beim sichtbaren Licht die vom Auge wahrgenommene Farbe festlegt (vgl. roter Laser).²⁵

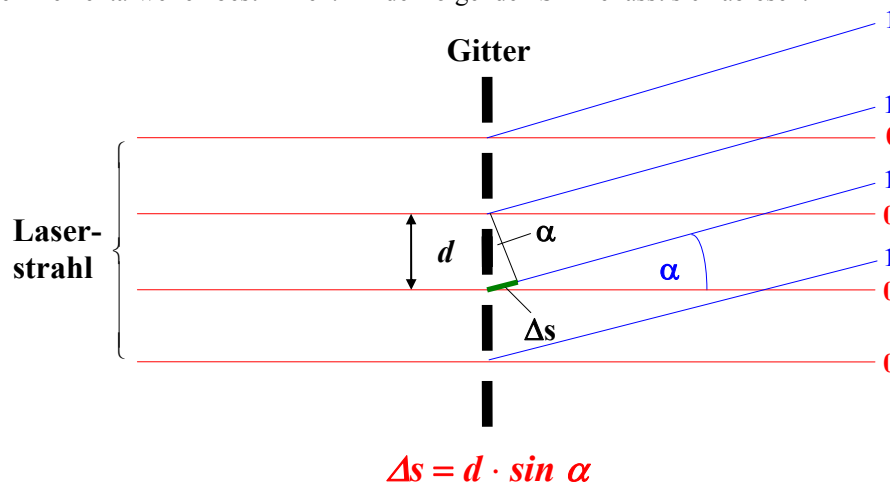
²³ Hierfür sind bereits 17 Zoll Bildschirme geeignet.

²⁴ Natürlich könnte auch jeder Schüler den Computer selbst bedienen, aber da der Kursleiter die längere Erfahrung mit dem Programm hat (haben sollte!) wird er aus Zeitgründen sinnvollerweise die Bedienung selbst übernehmen.

²⁵ Wenn Schüler an dieser Stelle nachfragen, so sollte man sie auf eine Klärung in einer späteren Unterrichtseinheit verweisen. Dies kann für diesen Kollegiaten gleichzeitig motivierend wirken.

Zusammenfassung der Erkenntnisse über Gitterinterferenz mit sichtbarem Licht

Beleuchtet man ein Gitter mit sichtbarem Licht, so erkennt man auf einem Schirm hinter dem Gitter Interferenzerscheinungen, wie wir sie bereits bei Wasser- und Mikrowellen kennengelernt haben. Die Lage der deutlich sichtbaren Hauptmaxima lässt sich auch hier mit Hilfe der Gleichungen für den Gangunterschied Δs zweier benachbarter Elementarwellen bestimmen. An der folgenden Skizze lässt sich ablesen:



Dabei steht d für die Gitterkonstante und α für den Winkel unter dem ein Hauptmaximum erscheint. In obiger Skizze wird z.B. das 1. Hauptmaximum betrachtet ($m = 1$).

Für ein **Hauptmaximum** müssen **alle** von den einzelnen Spalten des Gitters ausgehenden Elementarwellen **konstruktiv interferieren** (sämtliche Wellenberge aufeinander). Für den Gangunterschied Δs zweier benachbarter Elementarwellen gilt daher wie beim Doppelspalt

$$\Delta s = m \cdot \lambda,$$

er ist also ein ganzzahliges ($m \in \mathbb{Z}$) Vielfaches der Wellenlänge λ . Gleichsetzen der beiden Gleichungen liefert

$$m \cdot \lambda = d \cdot \sin \alpha.$$

Doppelspalt: Bei einem **Minimum** der Intensität müssen die von den beiden Spalten ausgehenden Elementarwellen **destruktiv interferieren** (Wellenberg auf Wellental). Für den Gangunterschied Δs gilt daher

$$\Delta s = (2m+1) \cdot \frac{\lambda}{2},$$

er ist also ein ungeradzahliges ($m \in \mathbb{Z}$) Vielfaches der halben Wellenlänge. Gleichsetzen der beiden Gleichungen liefert

$$(2m+1) \cdot \frac{\lambda}{2} = d \cdot \sin \alpha.$$

Gitter: Für ein **Minimum** der Intensität beim Gitter müssen die von den vielen Spalten ausgehenden Elementarwellen **insgesamt gerade destruktiv interferieren** (nicht notwendigerweise jeweils zwei miteinander!).

Eine Analyse der Gleichung für Hauptmaxima zeigt, dass der Sinus des Winkels (und damit für kleine Winkel in guter Näherung auch der Winkel), unter dem ein Hauptmaximum erscheint, proportional zur Wellenlänge λ des Lichts und indirekt proportional zur Gitterkonstante d ist. Diese Ergebnisse stimmen mit den experimentellen Befunden überein. Es lässt sich also formulieren:

- Je größer die **Wellenlänge** λ des verwendeten Lichts ist, desto weiter liegen die Maxima auseinander.
- Je größer die **Gitterkonstante** d (= Spaltmittenabstand) ist, desto näher liegen die Maxima beieinander.

Experimentell ergeben sich folgende Ergebnisse für den Einfluss der Anzahl der Spalte N auf die „Interferenzfigur“:

- Bei der Beugung an N Spalten treten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Hauptmaxima jeweils $N - 1$ Minima und $N - 2$ Nebenmaxima auf.
- Mit zunehmender **Anzahl der Spalte** N wächst die Intensität der Hauptmaxima, während ihre Breite abnimmt.

Beim Einzelspalt lässt sich folgendes über den Einfluss der Spaltbreite b auf die „Interferenzfigur“ aussagen:

- Je größer die **Spaltbreite b** bei der Beugung und Interferenz am **Einzelspalt** ist, desto **schmäler werden die Maxima**.

Betrachtet man die Interferenzerscheinungen bei einem realen Gitter, so muss man zwei Effekte berücksichtigen. Einerseits die „Interferenzfigur“, die sich aus unendlich schmalen Gitterspalten²⁶ ergeben würden und andererseits die „Interferenzfigur“, die eine endliche Spaltbreite hervorruft. Insgesamt lässt sich also festhalten:

- Die Intensitätsverteilung des realen Gitters ist das **Produkt** der Intensitätsverteilung eines idealen Gitters mit unendlich schmalen Spalten⁴ und der Verteilung, die sich aus der endlichen Breite eines Spalts ergibt.

Anmerkungen:

Wir haben gesehen, dass man mit sichtbarem Licht Interferenzerscheinungen hervorrufen kann, wie wir sie auch von Wasserwellen, Schallwellen und Mikrowellen kennen. Trotzdem wird man Lichtinterferenz im Alltag nicht beobachten können, weil den „normalen“ Lichtquellen eine wichtige Eigenschaft fehlt. Sie senden keine kohärenten Lichtbündel aus.

- Man nennt zwei Lichtbündel **kohärent**, wenn sie eine feste Phasenbeziehung zueinander haben. „Normale“ Lichtquellen senden **inkohärentes Licht** aus.

Um zu verstehen, was damit gemeint ist, muss man sich zunächst eine Vorstellung vom prinzipiellen Entstehungsmechanismus des von konventionellen Lichtquellen ausgestrahlten Lichts machen. In einem Lehrbuch der Experimentalphysik²⁷ steht dazu:

„Die eigentlichen lichtaussendenden Zentren sind die Atome oder Moleküle, deren Elektronen durch Energiezufuhr in angeregte Zustände gehoben werden. Bei Rückkehr in den Grundzustand wird Energie in Form einer gedämpften Welle abgestrahlt. Diese kann näherungsweise als ein Wellenzug mit begrenzter Länge aufgefasst werden. Die einzelnen Akte der Lichtemission verschiedener Atome erfolgen statistisch, so daß die einzelnen Wellenzüge wechselnde Phasenkonstanten besitzen. Deshalb sind die von verschiedenen Punkten einer Lichtquelle, d.h. von verschiedenen Atomen, abgestrahlten Lichtwellen zueinander inkohärent. Das gleiche gilt für verschiedene Lichtquellen.“

Wir können festhalten:

- Licht wird in **Wellenzügen** begrenzter Länge, der sogenannten **Kohärenzlänge** ausgesandt.

Bei „normalen“ Lichtquellen liegt die Kohärenzlänge in der Größenordnung von 10^{-6} m, bei Lasern kann sie über 100 m betragen. Laser senden auch kohärentes Licht aus. Aus diesem Grund haben wir unsere Interferenzversuche mit Laserlicht durchgeführt. Übrigens kann man, durch sehr starkes Einengen der Lichtquelle mit Hilfe eines Spaltes, auch mit „normalen“ Lichtquellen Interferenzerscheinungen erzeugen. Dies liegt daran, dass der Spalt dann im Wesentlichen nur noch einzelne Wellenzüge durchlässt, die mit sich selbst natürlich in konstanter Phasenbeziehung stehen.

Damit ergeben sich folgende **Interferenzbedingungen**:

- Interferenzerscheinungen können nur beobachtet werden, wenn zwei oder mehr **kohärente Lichtbündel** überlagert werden.
- Der **Gangunterschied Δs** muss **kleiner** als die **Kohärenzlänge** sein.

²⁶ Unendlich schmale Gitterspalte sind solche, von denen nur jeweils genau eine Huygenssche Elementarwelle ausgehen kann.

²⁷ Heinrich Gobrecht (Hrsg.): Bergmann-Schäfer Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III Optik, 6., völlig neue Auflage, Walter de Gruyter, Berlin, 1974, S. 300

Die Auswirkung der Spaltbreite sollte man im Grundkurs weniger intensiv besprechen. Hier ist es möglich, dass die Mehrheit der Schüler Schwierigkeiten damit hat, eine Hypothese zu formulieren, wie die Intensitätsverteilung eines realen Gitters zustande kommt, bzw. die letzte Seite des Praktikumsprotokolls gar nicht oder nur teilweise bearbeitet hat. In diesem Fall sollte man sich im Grundkurs damit begnügen, in Form eines gelenkten Unterrichtsgesprächs (oder bei Zeitknappheit eines Lehrervortrages) anhand der im Praktikumsprotokoll in Arbeitsauftrag 4b) beschriebenen Konfiguration von ALBERT® die Arbeitsaufträge 4c) und 4d) zu bearbeiten. Im Grundkurs ist das Thema Einzelspalt nämlich kein Bestandteil des Lehrplans²⁸. Für den Leistungskurs gilt diese Einschränkung nicht. Deshalb erarbeitet man hier, falls ähnliche Probleme wie die oben beschriebenen auftreten, die Aufgabe 4 des Praktikumsprotokolls in Form eines offenen Unterrichtsgesprächs.

Wenn alle Erkenntnisse, die im Computerpraktikum erreicht werden konnten, zusammengetragen sind, teilt der Kursleiter die Arbeitsblätter aus. Anschließend wird er die unter der Überschrift „**Anmerkungen**“ angesprochenen Gesichtspunkte hinsichtlich der Kohärenz in Form eines Lehrervortrags mitteilen. Dies hat mehrere Gründe. Zum einen lassen sich diese Inhalte praktisch überhaupt nicht im Unterrichtsgespräch erarbeiten, und zum anderen ist dieser Wechsel der Unterrichtsform nach der, für manche Schüler noch anstrengenden offenen Diskussion gut geeignet, etwaigen Konzentrationsproblemen der Kollegiaten zu begegnen.

Anmerkung zur Verwendung von Begriffen:

Viele Lehrbücher der Experimentalphysik, die meisten physikalischen Nachschlagewerke, aber auch eine Reihe von Schulbüchern verwenden Begriffe wie **Beugungsfigur**, **Beugungsverteilung** u.ä. für das Ergebnis von Beugung und Interferenz am Einfachspalt. Im Sinne einer klaren begrifflichen Trennung von Beugung²⁹ und Interferenz³⁰, die vom Lehrplan²⁷ gefordert wird, sollte man dies im Unterricht vermeiden und am besten auch hier von **Interferenzfigur**, **Interferenzverteilung** u.ä. reden!³¹ Andernfalls setzt sich bei einigen Schülern die (Fehl-)Vorstellung fest, dass Beugung ein Phänomen des Spaltes und Interferenz eines des Gitters ist und dass beide jeweils nur bei entsprechenden Gegebenheiten eine Rolle spielen. Diese „erarbeitete“ Überzeugung wirkt sich später negativ auf die Aufnahmefähigkeit der Kollegiaten für tragfähige „Gesamtkonzepte“ aus und muss dann mühsam wieder abgebaut werden!

²⁸ Lehrplan für das bayerische Gymnasium, Fachlehrplan für Physik, in: Amtsblatt des Bayerischen Staatsministeriums für Unterricht, Kultus, Wissenschaft und Kunst, Jahrgang 1991, Sondernummer 9, München, 29. November 1991

²⁹ Eintritt (von Wellen) in den geometrischen Schattenraum

³⁰ Ungestörte Überlagerung von Elementarwellen

³¹ Es gibt unterschiedliche Meinungen zu der Frage ob und gegebenenfalls wie die Begriffe Beugung und Interferenz zu unterscheiden sind. Falls man eine Unterscheidung trifft, so sollte sie nach Meinung des Autors aber klar abgegrenzt ausfallen. Feynman z.B. sieht die Notwendigkeit der Unterscheidung eigentlich nicht. Er schreibt in [2] auf Seite 399: „Niemand hat jemals vermocht, den Unterschied zwischen Interferenz und Beugung befriedigend zu definieren. Es ist einfach eine Frage der Gewohnheit, und es gibt keinen spezifischen, wichtigen Unterschied zwischen ihnen. Am besten können wir es ganz grob wohl so ausdrücken: Wenn sich nur wenige Quellen, sagen wir zwei, überlagern, dann wird das Ergebnis gewöhnlich Interferenz genannt, wenn es aber eine große Anzahl von ihnen gibt, wird anscheinend das Wort Beugung häufiger gebraucht.“

5 Computeranimierte Feynman-Pfeiladdition

5.1 Konzept

In den drei bisherigen Sitzungen dieser Unterrichtseinheit haben die Kollegiaten viele Erfahrungen mit Lichtinterferenz gemacht, Phänomene entdeckt, deren Abhängigkeit von bestimmten Variablen erforscht und die Ergebnisse zusammengetragen. Eine Erklärung für das Zustandekommen dieser Sachverhalte steht allerdings, abgesehen von einzelnen Vorstellungen zum Doppelspalt und der Lage der Hauptmaxima beim Mehrfachspalt, noch aus. Dazu gehören die Fragen nach der Entstehung der Minima und Nebenmaxima bei der Gitterinterferenz, der Lage der Minima bei Interferenzversuchen am Einfachspalt und der Interferenzfigur beim Mehrfachspalt (Gitter) als Überlagerung von Spalt- und Gitterverteilung (ideales Gitter).

Diese letzte zur vorgestellten Unterrichtseinheit gehörende Stunde ist ganz der Vorstellung eines Konzepts zur Interpretation dieser Phänomene gewidmet. Dazu wird den Kollegiaten zunächst ein anschauliches Verständnis des zugrunde liegenden Prinzips vermittelt. Anschließend werden im Unterrichtsgespräch exemplarisch einige ausgewählte Phänomene damit erklärt. Dadurch sollen die Schüler in die Lage versetzt werden, auch andere Sachverhalte mit dem dargestellten Konzept deuten zu können.

Gerade aus Gründen der Anschaulichkeit und um den Schülern die Vernetzung der Methode mit dem Vorwissen zu erleichtern, wird hier mit dem Wellencharakter des Lichts gearbeitet. Die Feynman-Pfeiladdition, die letztlich eine bildliche Darstellung der mathematisierten, quantenmechanischen³² Beschreibung ist, trägt natürlich viel weiter. Sie ist völlig unabhängig vom Wellenbild und sogar in der Lage, den später auftauchenden sogenannten Welle-Teilchen-Dualismus des Lichts (aber auch der Elementarteilchen) zugunsten einer dritten, der quantenmechanischen Sicht der Dinge aufzulösen.

Wie so oft im Physikunterricht stellt sich auch hier die Frage, inwieweit Unterrichtsinhalte und aktueller Stand der Forschung auseinanderklaffen müssen bzw. dürfen. Dem schulischen Physikunterricht wird oft vorgeworfen, zu weit vom aktuellen Forschungsstand der Physik entfernt zu sein und in weiten Bereichen mit Methoden und Modellen zu arbeiten, die längst überholt sind. Dem halten Physikdidaktiker einerseits entgegen, dass zunächst Grundlagen gelegt werden müssen, auf denen später aufgebaut werden kann. Andererseits geben sie zu bedenken, dass sich die meisten (mathematischen) Beschreibungen der Natur, bei denen die moderne Physik erfolgreich angewendet wird, sich der Anschauung völlig entziehen. So kommt es nicht von ungefähr, wenn Richard Feynman in [22] feststellt, dass auch und gerade die Forscher „erst einmal den ‚gesunden Menschenverstand‘ über Bord werfen“³³ mussten, um sich „unvoreingenommen“ z.B. mit der Quantenmechanik auseinandersetzen zu können. Er führt weiter aus: „Wir Physiker haben uns mit diesem Problem herumgeschlagen und einsehen müssen, daß es nicht darauf ankommt, ob uns eine Theorie paßt oder nicht. Sondern darauf, ob die Theorie Vorhersagen erlaubt, die mit dem Experiment übereinstimmen. Es geht nicht darum, ob eine Theorie philosophisch bestrickend oder leicht zu verstehen ist oder dem gesunden Menschenverstand von A bis Z einleuchtet. Die Natur, wie sie die Quantenelektrodynamik beschreibt, erscheint dem gesunden Menschenverstand absurd. Dennoch decken sich Theorie und Experiment. Und so hoffe ich, daß Sie die Natur akzeptieren können, wie sie ist – absurd.“³⁴

Man könnte sich nun als Physiklehrer auf den Standpunkt stellen, dass man die Schüler überfordern würde, wollte man sie dazu bringen, sich mit unanschaulichen, ja absurd wirkenden Theorien und Erklärungsmethoden zu beschäftigen. Damit würde man ihnen aber das eigentlich reizvolle der Physik vorenthalten, nämlich die Möglichkeit mit wenigen, tragfähigen Konzepten möglichst viel vorhersagen bzw. beschreiben zu können, was in der Natur vor sich geht. Eines dieser Konzepte ist die Quantenmechanik, die wegen ihrer mathematisch-formalistischen Grundlagen für Kollegiaten des Leistungskurses Physik nur in Ansätzen zu verstehen ist.

Wie soll man aber vorgehen, wenn die mathematischen Grundlagen fehlen und auch nicht zu vermitteln sind³⁵? Es kann nur darum gehen, den Schülern ein Verständnis dafür zu vermitteln, wie Physiker vorgehen, und was sie bei ihren unübersichtlichen Rechnungen eigentlich tun.

³² bzw. quantenelektrodynamischen

³³ aus [22], S.15

³⁴ aus [22], S.21

³⁵ Zum Vermitteln der mathematischen Grundlagen fehlt einerseits die Zeit und es ist andererseits auch nicht sinnvoll, so tief in „Rechnetechniken“ einzusteigen.

An dieser Stelle setzt Feynman an, wenn er, wie in seiner Vorlesungsreihe „QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie“³⁶, Wahrscheinlichkeitsamplituden mit Hilfe von rotierenden Pfeilen darstellt. So vermittelt er auch den anwesenden physikalischen Laien das Prinzip der quantenelektrodynamischen Überlegungen.

Der Autor leitet, die Feynmansche Methode aufgreifend, bereits bei den Interferenzversuchen mit Licht im sichtbaren Spektralbereich von der klassischen Erklärung nach dem Huygesschen Prinzip über zu einer Beschreibung im Rahmen der modernen Physik. Dies hat den Vorteil, dass man damit näher am aktuellen Stand der Forschung ist, und man außerdem auch bei tieferem Einstieg in die Materie, z.B. im Rahmen eines Physikstudiums, nichts von den bereits behandelten Konzepten aufgeben muss. Es kann an dieser Stelle allerdings nicht darum gehen, eine Einführung in die Quantenmechanik vorwegzunehmen. Trotzdem wird implizit darauf hingearbeitet, da die Feynmanschen Pfeile letztlich nur eine Veranschaulichung der komplexen Wahrscheinlichkeitsamplituden der Quantenmechanik darstellen.

Es wird hier also, dies sei noch einmal betont, auf der Basis der Wellentheorie des Lichts ein Konzept vermittelt, das viel weiter trägt, weil es im Sinn der Quantenmechanik praktisch ohne Abstriche umgedeutet werden kann. Franz Bader stellt in [18] einen Unterrichtsgang vor, der auf der hier bereitgestellten Grundlage „Eine Quantenwelt ohne Dualismus“ beschreibt und vermittelt. Er benutzt dazu ein von ihm entwickeltes Programmpaket [30] bestehend aus einer Reihe von Simulationsprogrammen, die die Methode der Pfeiladdition erklären und dann an Beispielen anwenden. Hierbei übernehmen die Programme die etwas mühsame Addition der Pfeile, so dass sich der Anwender alleine auf das Verständnis konzentrieren kann.

Die Programme sind in mancher Hinsicht als ausgefeilt und gelungen zu bezeichnen, haben allerdings aus der Sicht des Autors auch einen erheblichen Nachteil. Dieser besteht darin, dass Franz Bader zu viele Variationsmöglichkeiten eröffnen wollte und dadurch, wegen der jedesmal notwendigen Festlegung von Variablen, der Einstieg in viele Programme unübersichtlich wird. Dies schreckt unerfahrene Anwender ab. Ein weiterer Nachteil ist die Informationsüberfrachtung des Ausgabebildschirms, die nicht abgestellt werden kann. Diese Tatsache macht eine weitgehende Erklärung und Fokussierung der Aufmerksamkeit durch den Lehrer erforderlich und ist der Grund, warum der Autor der Meinung ist, übrigens ganz im Gegensatz zu Franz Bader, dass diese Programme nicht für Computerpraktika von Schülern geeignet sind. Zur systematischen Einführung der Feynman-Pfeiladdition in Form eines Unterrichtsgesprächs sind sie allerdings sehr gut einsetzbar. Zu genau diesem Zweck werden sie auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet.

5.2 Konkrete Umsetzung

In aller Regel werden in den ersten drei Stunden dieser Unterrichtseinheit von Seiten der Schüler Fragen nach der Erklärung für verschiedene Interferenzphänomene auftauchen. Diese werden mit Hinweis auf die hier zu beschreibende Sitzung zurückgestellt. Auf diese Weise baut sich eine Erwartungshaltung bei den Schülern auf, die stark motivierend wirkt und ihnen den Einstieg in die Pfeiladdition, die ihnen einiges an Konzentration abverlangt, erleichtert.

Vorbereitungen:

- Für das Unterrichtsgespräch anhand der Bildschirmausgabe der Programme von Franz Bader wird wieder ein OVP-Display mit zugehörigem Overheadprojektor bzw. notfalls ein großformatiger Bildschirm (ab 17 Zoll) benötigt. Außerdem braucht man natürlich einen PC mit nicht zu kleinem Arbeitsspeicher (ab 4 MB).
- Außerdem muss die Sitzordnung so gewählt werden, dass alle Kollegiaten eine optimale Sicht auf die Bildschirmausgabe haben. Am besten eignet sich auch hier eine Sitzordnung, bei der sich alle Schüler direkt ins Gesicht sehen können.
- Hinsichtlich der Beleuchtung muss man einen Kompromiss eingehen zwischen geeigneter Helligkeit für ein Unterrichtsgespräch und der geringen Beleuchtung, die für die Benutzung eines OVP-Displays optimal geeignet ist (vorher ausprobieren!).
- Der Lehrer sollte sich vorher genau überlegen, welche Programme er aus der Vielzahl der im Programmpaket von Franz Bader vorhandenen benutzen will, und ob er dort evtl. besondere Einstellungen für wesentlich erachtet. Beim ersten Einstieg in ein Programm mit Schülern empfiehlt es sich, jeweils die voreingestellten Variablen zu übernehmen, um schneller zum Kern der Sache zu kommen. Wenn evtl. von Seiten der Schüler spezielle Fragen kommen, so sollte man diese, soweit möglich, natürlich in der zugehörigen Konfiguration klären. In den nachfolgenden Beschreibungen wird, wenn nicht anders angegeben, jeweils die Grundeinstellung verwendet.

³⁶ vgl. [22]

Der Autor hat sich dafür entschieden, mit folgenden Programmen der Programmgruppe „**Optik**“ des Pakets „**Eine Quantenwelt ohne Dualismus**“ von Franz Bader zu arbeiten:

- Optik a) Einführung der Pfeiladdition
- Optik b) Demonstration der Pfeiladdition am Einzelspalt
- Optik c) Schirmbilder bei Spalt und Gitter
- Optik k) Helligkeitsverteilung an Gittern, Vergleich mit Spalt

Dabei dienen die ersten beiden Programme der Einführung in die Methode der Pfeiladdition, während vor allem das Programm Optik c) dazu benutzt wird, die anstehenden Fragen mit Hilfe der Pfeiladdition anzugehen. Das Programm Optik k) dient dazu, die Unterschiede bei der Interferenz am Spalt und am Gitter herauszuarbeiten. Alle Programme können direkt vom Begrüßungsbildschirm (Aufruf über „**quanten.exe**“) aus gestartet werden. Abbildung 14 zeigt das dort sichtbare Menü. Durch Anklicken des Feldes Optik wird die zugehörige Programmliste (hellblau hinterlegt) geöffnet. Das gewünschte Programm wird durch Anklicken des zugehörigen Programmnamens in der Liste (mit der linken Maustaste) geöffnet.



Abbildung 14: Begrüßungsbildschirm der Programmgruppe „Eine Quantenwelt ohne Dualismus“

Alle Programme sind so angelegt, dass sie gelegentlich anhalten, um z.B. Variablen zu setzen. Will man nichts verändern, so kommt man mit $\langle \downarrow \rangle$ (Return) weiter. Es ist überhaupt so, dass der Programmablauf mit Hilfe der Taste $\langle \downarrow \rangle$ immer einen Schritt weitergeht.

Der Einstieg in die Stunde erfolgt anhand des Programms Optik a). Dort wird zunächst der Unterpunkt 2 „Zeigeraddition bei der Spaltbeugung“ gewählt. Beim Aufrufen erscheint der in Abbildung 15 dargestellte Bildschirm. Hier kann man beobachten, wie eine ebene Wellenfront auf einen Spalt zuläuft (das Tempo ist mit den Tasten $\langle \leftarrow \rangle$ und $\langle \rightarrow \rangle$ einstellbar; der Ablauf kann jederzeit mit der Taste $\langle h \rangle$ angehalten werden; mit $\langle \downarrow \rangle$ wird er fortgesetzt; vgl. Bildschirmfußleiste!). Vom Spalt gehen exemplarisch acht Huygenssche Elementarwellen aus. Die Schüler sind bereits mit dem Konzept vertraut, dass diese Elementarwellen sich ungestört überlagern. Es stellt sich allerdings die Frage (die auch auf dem Bildschirm gestellt wird), wie man diese Elementarwellen für bestimmte Richtungen geeignet addiert.

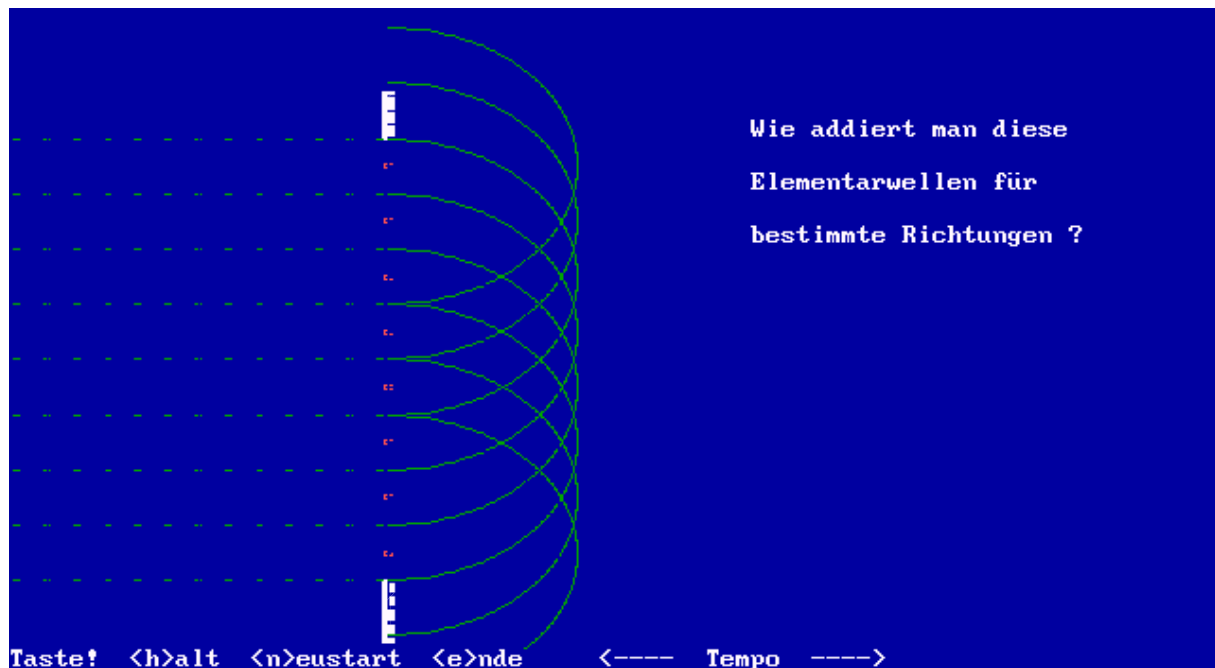


Abbildung 15: Programm „Einführung der Pfeiladdition“; Spalt 1: Elementarwellen

Mit ihren bisherigen Kenntnissen erarbeiten die Schüler, dass die Elongationen³⁷ aller, von den einzelnen Spalt-punkten ausgehenden Elementarwellen (Huygensches Prinzip) in einem interessierenden Punkt jeweils phasenrichtig addiert werden müssen.³⁸ Wenn die Erarbeitung im Unterrichtsgespräch soweit fortgeschritten ist, dann drückt der Lehrer die Return-Taste und es öffnet sich der in Abbildung 16 dargestellte Bildschirm. Hier werden die von der Wellenerregung zurückgelegten Wege mit zugehörigen Elongationen eingezeichnet. Es ergeben sich die charakteristischen „Sinuslinien“. Wird nun gefragt, wie groß in einem Punkt die resultierende Elongation ist, so müssen die hier gelb eingezeichneten Elongationen der Einzelwellen in diesem Punkt addiert werden.

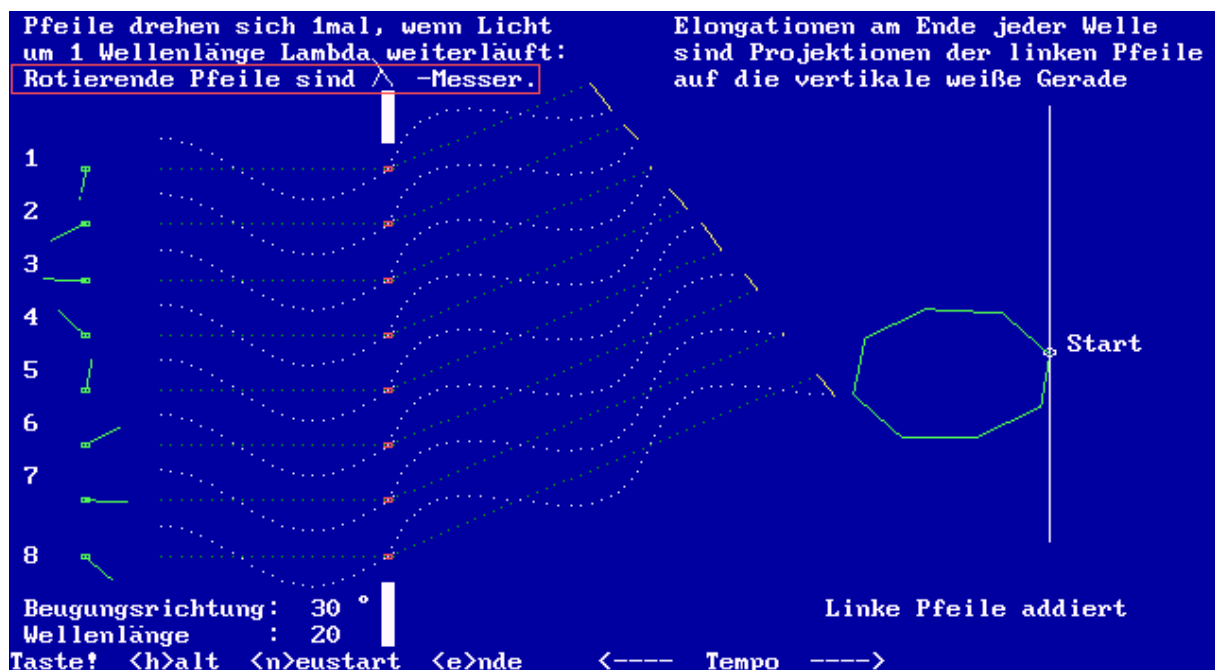


Abbildung 16: Programm „Einführung der Pfeiladdition“; Spalt 2: Pfeiladdition

³⁷ Im Fall der elektromagnetischen Wellen handelt es sich bei der Elongation um die elektrische Feldstärke $E(t)$.

³⁸ Falls die Schüler dies nicht alleine erarbeiten können, genügt erfahrungsgemäß der Hinweis auf „Wellenberg“ und „Wellental“ bzw. vorausgegangene Versuche mit der Wellenwanne.

Wenn die Schüler in ihrem Erkenntnisprozess bis hierhin vorgedrungen sind, dann berichtet ihnen der Lehrer, dass bei der Vielzahl von durchzuführenden Additionen die einfachste Methode die ist, zugehörige Pfeile zu addieren.³⁹ Nachdem er den Kollegiaten den Arbeitsauftrag gegeben hat, die rotierenden Pfeile und den Zusammenhang zwischen ihrer Stellung und der angezeigten Elongation genau zu beachten, lässt der Kursleiter das Programm noch einmal langsam ablaufen. Zwischendurch wird es immer wieder angehalten um die Entsprechungen genauer diskutieren zu können. Dabei sind folgende Details herauszuarbeiten:

- Ein Pfeil (Zeiger) führt genau einen vollen Umlauf durch, wenn die Wellenerregung um eine Wellenlänge⁴⁰ λ fortschreitet. Die rotierenden Pfeile lassen sich also als „ λ -Zähler“ auffassen.
- Die Endstellungen der Pfeile geben die Phasen der Einzelwellen beim Erreichen des Zielpunktes an.
- Die Projektion eines Pfeils auf eine vertikale Gerade liefert die Elongation.⁴¹
- Addiert man die Pfeile vektoriell, so ist der Summenpfeil die resultierende Amplitude A . Deren Projektion auf eine vertikale Gerade ergibt genau die Summe der Elongationen der Teilwellen.
- Zur Angabe der Phase (im Zielpunkt) sind nur die Nachkommastellen der „ λ -Zählung“ von Bedeutung, da ein Fortschreiten um λ bedeutet, dass die Ausgangsphase wieder erreicht wurde.
- Der Lehrer teilt mit, dass das Betragsquadrat $|A|^2$ der Amplitude ein Maß für die Lichtintensität ist.⁴²

Falls die Schüler Schwierigkeiten mit der Zuordnung rotierender Pfeil \leftrightarrow Sinuslinie der Welle haben, bzw. hinsichtlich der Pfeiladdition (vgl. die bekannte Vektoraddition) nicht ganz sattelfest sind, kann man diese Probleme mit Hilfe des ersten Teils des Programms „Einführung in die Pfeiladdition“ (Optik a) beseitigen (vgl. Abbildung 17). Dies sollte gegebenenfalls erst geschehen, wenn die Pfeiladdition auf die oben beschriebene Weise eingeführt wurde. Andernfalls erkennen die Schüler den Sinn dieses Vorgehens nicht und sind deshalb nicht offen genug dafür.

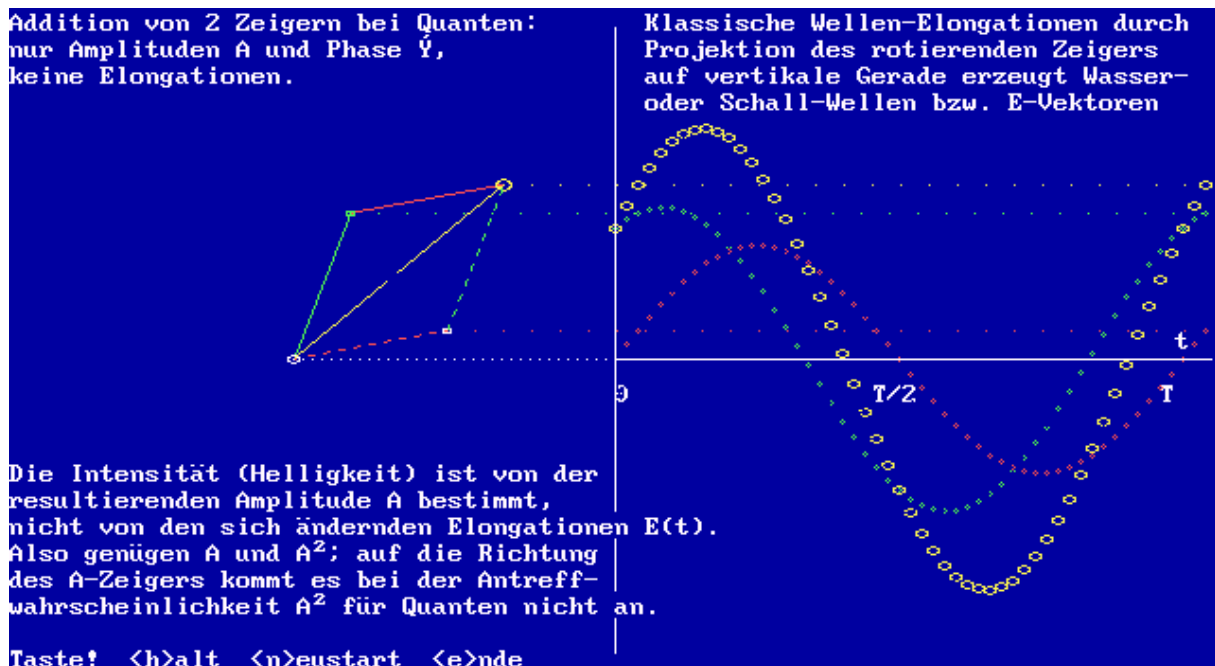


Abbildung 17: Programm „Einführung der Pfeiladdition“

³⁹ Diese rotierenden Pfeile (Zeiger) werden in der Theorie mit komplexen Zahlen in der Form $\exp(ikr - \omega t) = \exp(ikr - \varphi)$ dargestellt. Dies sollte aber im Unterricht (zumindest an dieser Stelle) nicht erwähnt werden und keine Rolle spielen. Aus diesem Grund wird hier nicht näher darauf eingegangen.

⁴⁰ Die Wellenlänge entspricht dem Abstand zweier benachbarter Stellen gleicher (Schwingungs-)Phasen.

⁴¹ Aus der Unterrichtseinheit über Dipolstrahlung können die Schüler diese Elongation im Wellenbild mit der el. Feldstärke E identifizieren.

⁴² Unterstützend kann man erarbeiten, daß „positive“ und „negative“ Elongationen desselben Betrags, dieselbe Intensität ergeben müssen. Im Leistungskurs kann man evtl. bzgl. der quadratischen Abhängigkeit zusätzlich auf die el. Feldenergiedichte $\rho = \epsilon_0 \cdot E \cdot D = \epsilon_0 \cdot E^2$ verweisen.

Diese oben knapp umrissene Einführung, zu der man ca. 20 Minuten Zeit einplanen muss, stellt das „Handwerkszeug“ bereit. In der verbleibenden Zeit wird anhand einiger der offenen Fragen exemplarisch erarbeitet, dass prinzipiell alle Erscheinungen im Zusammenhang mit der Interferenz durch die Pfeiladdition erklärt werden können.

Die ersten Entdeckungen werden direkt mit dem oben beschriebenen Programm „Einführung in die Pfeiladdition“ (vgl. Abbildung 16) gemacht. Nacheinander werden bei der Variablendefinition für den „Beugungswinkel PH“ im Programm die Winkelgrößen 30° (1. Minimum), 20° (Zwischenwert) und 0° (nulltes Maximum) eingegeben. Beim Programmablauf lässt sich gut feststellen, dass sich ein Intensitätsminimum ergibt, wenn sich bei der Pfeiladdition das Diagramm schließt, also das Ende (die Spitze) des letzten Pfeils mit dem Anfang (dem Fuß) des ersten Pfeils zusammenfällt. Das Betragsquadrat $|A|^2$ der resultierenden Amplitude und damit die Intensität werden maximal, wenn alle Einzelpfeile die gleiche Richtung haben (vgl. Abbildung 18). In anderen Fällen ergibt sich eine Zwischenstellung.

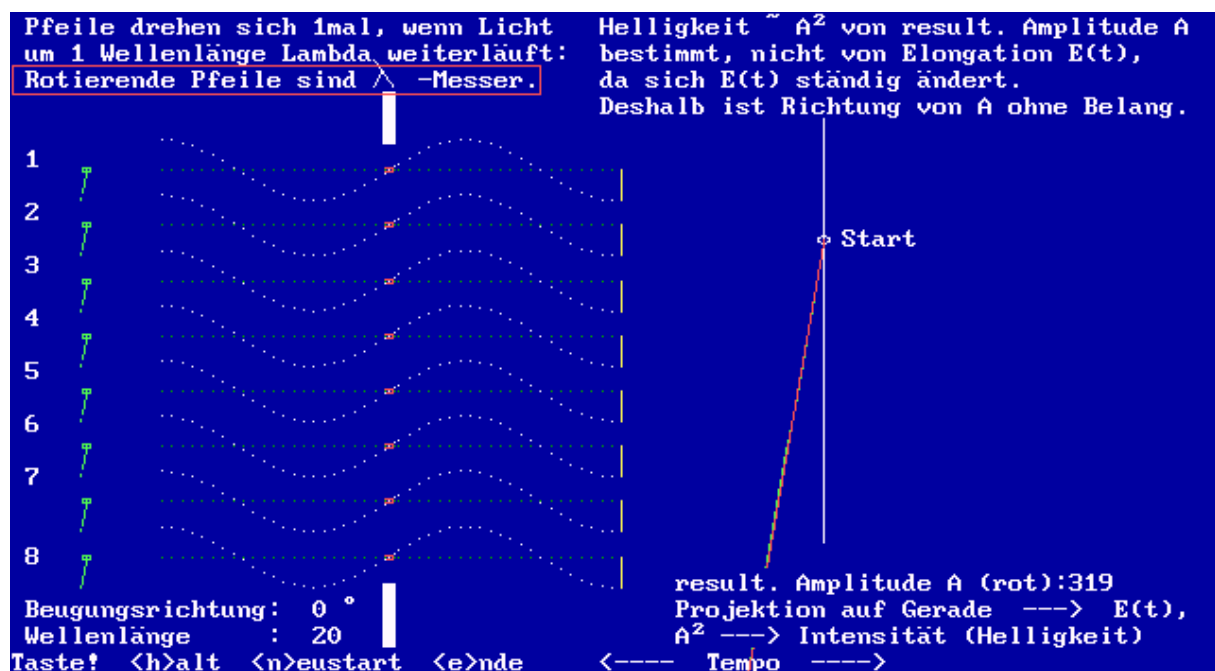


Abbildung 18: Programm „Einführung der Pfeiladdition“; Spalt 2: Pfeiladdition; Beugungswinkel $\phi = 0^\circ$

Mit Hilfe des Programms „Demonstration der Pfeiladdition am Einzelspalt“ und dem dortigen Unterpunkt 2 quantitative Simulation werden die bisherigen Erkenntnisse noch einmal vertieft. Hier läuft, wie in Abbildung 19 links oben im roten Kasten ersichtlich, ein Zähler („Periodenzahl“) mit, der anzeigt, wie oft die Wellenlänge λ (eine Periode) in der zurückgelegten Wegstrecke enthalten ist. Die Endstellung (-phase) des zugehörigen Zeigers ergibt sich, indem man die Dezimalen der „Periodenzahl“ mit dem Vollwinkel 360° multipliziert. Im Beispiel der Abbildung 19 ergibt sich:

$$\begin{aligned}\text{Periodenzahl: } & 29,58 \\ \text{Dezimale: } & 29,58 - 29 = 0,58 \\ \text{Phasenwinkel: } & \phi = 0,58 \cdot 360^\circ = 208,8\end{aligned}$$

Die Abweichung des eben berechneten Phasenwinkels ϕ von der auf dem Bildschirm angegebenen Endphase (210°) liegt daran, dass das Programm intern natürlich mit mehr als zwei Dezimalen rechnet! Diese Tatsache wird von manchen Kollegiaten auf Nachfrage genannt, bedeutet für sie also keine Schwierigkeit. Anderen Schülern kann sie leicht vermittelt werden.

Der Vollständigkeit halber sei hier noch erwähnt, dass man mit diesem Programm bei Bedarf auch das Fermat-Prinzip der kürzesten Laufzeit verifizieren kann. Dies sollte aber in der hier vorgestellten Unterrichtsstunde nicht geschehen.

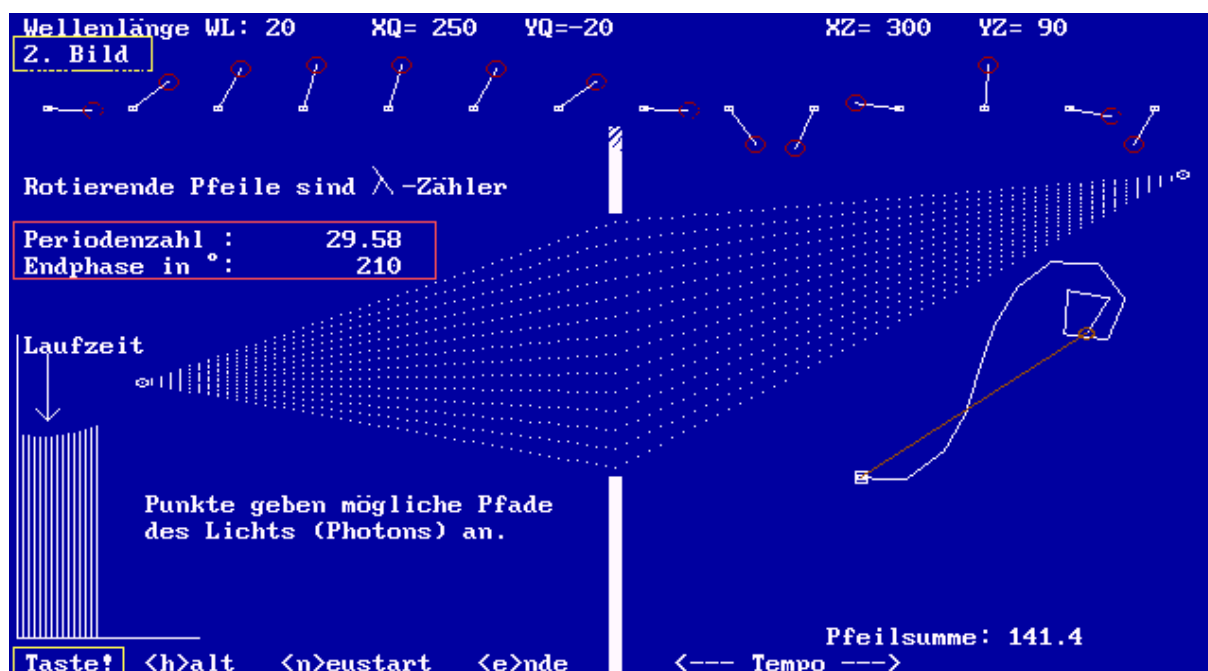
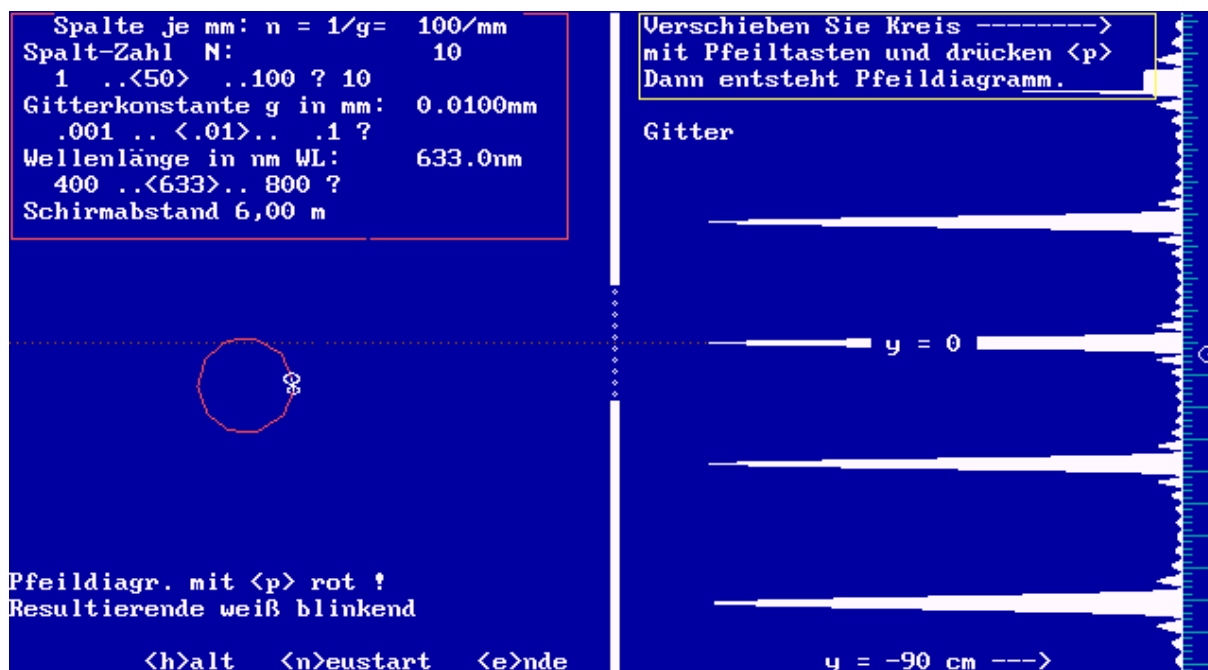


Abbildung 19: Programm „Demonstration der Pfeiladdition am Einzelspalt“; quantitative Simulation

Nachdem nun das Konzept der Pfeiladdition vertieft ist, kann man im Unterricht zum Programm Optik c) „Schirmbilder bei Spalt und Gitter“ übergehen (vgl. Abbildung 20). Damit ist es möglich, sich für jeden Punkt einer Intensitätsverteilung die zugehörige Pfeiladdition darstellen zu lassen.

Beim Durchlaufen des Eingangsmenüs muss man zunächst angeben, ob man einen Spalt $<s>$ oder ein Gitter $<g>$ betrachten möchte. Die Wahl wird wie immer mit $<\downarrow>$ bestätigt. Dann muss man sich für Licht $<l>$ bzw. eine beliebige Welle $$ entscheiden⁴³ und schließlich angeben, ob berücksichtigt werden soll, dass die Lichtintensität vom zurückgelegten Weg und nach dem Lambertischen Gesetz von der Richtung abhängt. Hier wird man nein $<n>$ angeben.⁴⁴ Im letzten Menüpunkt werden die Spalt-Zahl N ($1 \leq N \leq 100$), die Gitterkonstante g ($0,001\text{ mm} \leq g \leq 1\text{ mm}$) und die Wellenlänge λ ($400\text{ nm} \leq \lambda \leq 800$) angegeben.

Abbildung 20: Programm „Schirmbilder bei Spalt und Gitter“; Gitter mit Gitterkonstante $d = 0,01\text{ mm}$

⁴³ Hier wird man im gegebenen Zusammenhang natürlich $<l>$ wählen.

⁴⁴ Einerseits fallen diese Abhängigkeiten bei der hier vorliegenden quantitativen Simulation kaum ins Gewicht, andererseits ist hier auch nicht die geeignete Stelle, um derartige Fragen zu diskutieren.

Man lässt die Kollegiaten verschiedene Konstellationen vorschlagen und bespricht mit ihnen, wie die jeweiligen (Haupt- und Neben-)Maxima und Minima sich aus der Addition der einzelnen Pfeile ergeben. Dabei ist es wichtig, darauf zu achten, dass die Schüler immer konsequent mitdenken. Dies erreicht man am leichtesten dadurch, dass man immer wieder andere Kollegiaten auffordert, genau zu erklären, wie die Intensität an einem bestimmten Punkt zustande kommt.

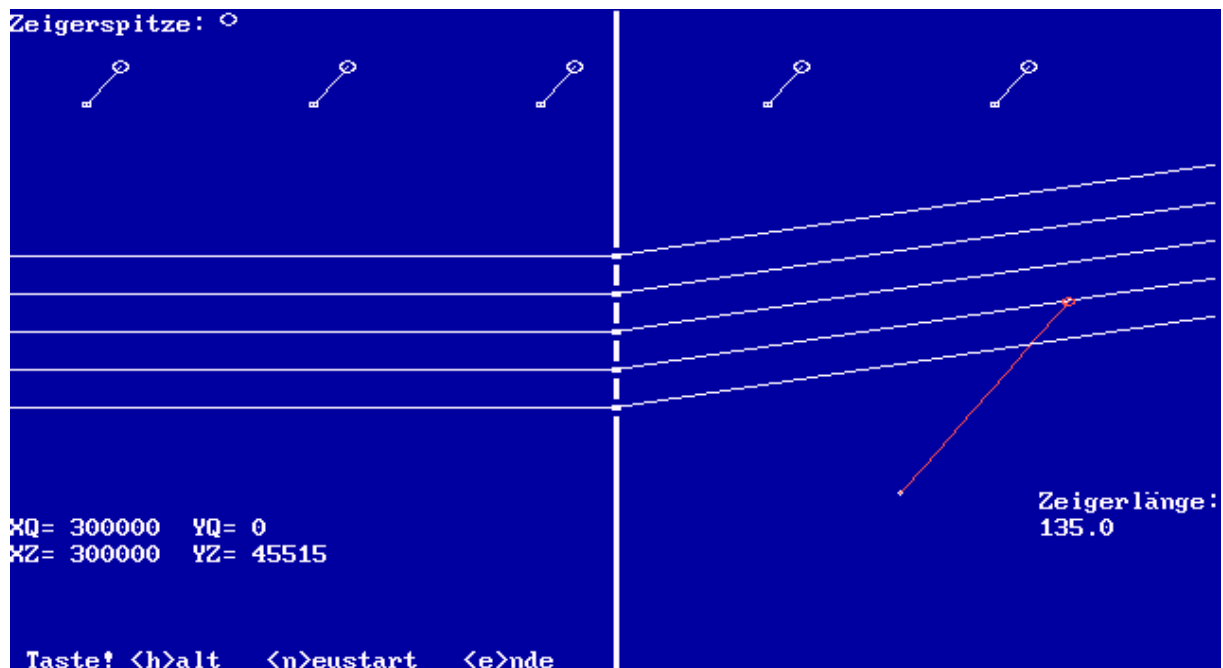


Abbildung 21: Programm „Helligkeitsverteilung an Gittern, Vergleich mit Spalt“; Gitter

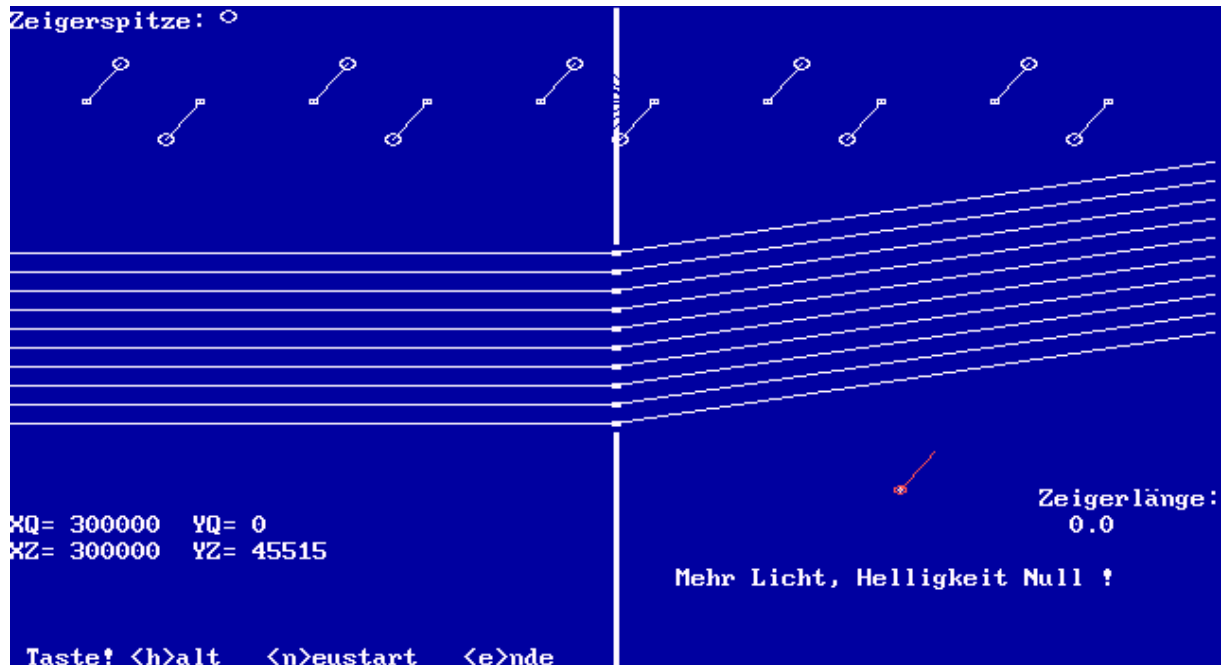


Abbildung 22: Programm „Helligkeitsverteilung an Gittern, Vergleich mit Spalt“; Spalt

Den Abschluss der Stunde bildet ein Vergleich der Helligkeitsverteilung an Gitter und Spalt mit dem zugehörigen Programm Optik k) Unterpunkt 2 (vgl. Abbildungen 21 und 22). Hier wird zunächst ein Gitter $<g>$ mit Strichen (Spalten) ausgewählt. Die Standardeinstellung führt zum ersten Hauptmaximum. Die Kollegiaten werden nun mit der Frage konfrontiert, wie hell die Interferenzfigur am selben Punkt hinter einem Spalt ist, der so breit ist, wie der Abstand der beiden äußersten Striche des Gitters. In aller Regel nehmen die Kollegiaten trotz ihrer Erfahrungen mit Interferenz zunächst an, dass durch den Spalt mehr Licht tritt, also die Helligkeit dahinter

auch größer ist. Umso erstaunter sind die Schüler zunächst, wenn beim Spalt $< s >$ an derselben Stelle, an der beim Gitter das Hauptmaximum war, ein Minimum auftritt (vgl. Abbildung 21). Allerdings wird ihnen bei der Betrachtung der Pfeilendstände sehr schnell klar, wie dies zustande kommt. Die von je zwei benachbarten, im Spalt eingezeichneten Punkten ausgehenden Elementarwellen, haben einen gegenseitigen Gangunterschied von $\Delta s = \frac{1}{2}\lambda$, d.h. der zurückgelegte Weg ist um $\frac{1}{2}\lambda$ länger (bzw. kürzer). Zwei benachbarte Elementarwellen überlagern sich also gerade destruktiv. Wenn man weitere Elementarwellenzentren im Spalt berücksichtigen würde, so würde man zu jedem eine Elementarwelle finden, die im Bezug zu ihm gerade den Gangunterschied $\Delta s = \frac{1}{2}\lambda$ aufweist.

Im Grundkurs ist die Unterrichtseinheit hiermit abgeschlossen, während man im Leistungskurs noch die Minimumsbedingung für die Beugung und Interferenz am Spalt herleitet.

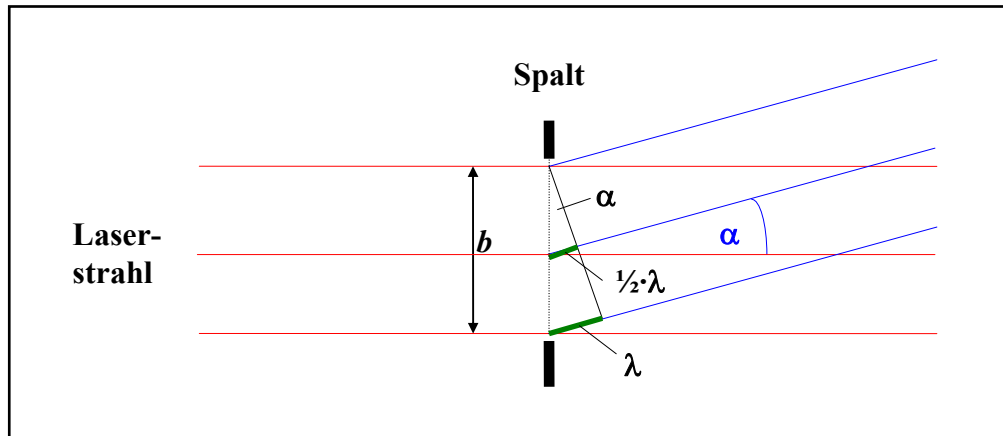


Abbildung 23: Herleitungsskizze zur Minimumsbedingung beim Einfachspalt

Die Gleichung für 1. Minimum beim Einfachspalt ergibt sich zu:

$$\lambda = b \cdot \sin \alpha$$

b : Spaltbreite

Denkt man sich den Spalt halbiert, dann ergibt sich, wenn obige Gleichung erfüllt ist, ein Gangunterschied zwischen dem oberen „Randstrahl“ und dem „Mittelstrahl“ von $\Delta s = \frac{1}{2}\lambda$. Die zugehörigen Elementarwellen interferieren also destruktiv. So findet man zu jedem Elementarwellenzentrum in der oberen Hälfte des Spalts eines in der unteren Hälfte, von denen Elementarwellen mit einem gegenseitigen Gangunterschied $\Delta s = \frac{1}{2}\lambda$ ausgehen. Es ergibt sich also für alle Elementarwellen destruktive Interferenz.

Allgemein gilt für Minima beim Einfachspalt:

$$k \cdot \lambda = b \cdot \sin \alpha$$

6 Fragebogen zur Lernzielkontrolle

Als Lernzielkontrolle für die hier dargestellte Unterrichtseinheit hat der Autor den auf der folgenden Seite abgedruckten Test mit zugehörigem Lösungsblatt (vgl. übernächste Seite) entworfen. Dabei ist eine Prüfung der erlangten Kenntnisse über die Interferenzphänomene unproblematisch. Interessanter ist dagegen die Frage, inwieweit das Konzept der Feynman-Pfeiladdition von den Schülern verstanden wurde und wie dieses Verständnis überprüft werden kann. Ein möglicher Weg könnte darin bestehen, die Kollegiaten die Vorgehensweise bei der Pfeiladdition und das zugrunde liegende Konzept beschreiben zu lassen. Hier besteht allerdings das Problem, dass es sehr umständlich und zeitaufwendig ist, einen im Wesentlichen visuell aufgenommenen und verstandenen Sachverhalt sprachlich umzusetzen. Dazu bedürfte es sinnvollerweise vieler Skizzen⁴⁵. Hier wurde ein anderer Weg gewählt. Die Kollegiaten sollen am einfachen Beispiel eines konkreten, idealen Doppelspalts⁴⁶ ihre Kenntnisse über die Feynman-Pfeiladdition anwenden. Die rotierenden Pfeile werden dabei als Wellenlängenmesser (λ -Messer)⁴⁷ betrachtet. Die Endstellung des rotierenden Pfeiles hängt nicht davon ab, wie oft die Wellenlänge ganz in die Wegstrecke „passt“, sondern davon, wie groß der Bruchteil der Wellenlänge ist, der beim Teilen der Wegstrecke durch die Wellenlänge übrigbleibt. Die Addition von nur jeweils zwei Pfeilen beschränkt den Aufwand. Zur Lösung muss aber auch für diesen einfachen Fall das ganze zugrunde liegende Konzept verstanden worden sein.

Es sind zunächst zwei sinnvolle Einsatzmöglichkeiten des hier vorgestellten „Tests“ denkbar. Eine wäre der Einsatz als wirklicher Abschlusstest in der auf die Unterrichtseinheit folgenden Unterrichtsstunde mit anschließender Besprechung zur Sicherung des Lernerfolgs. Eine weitere Möglichkeit, die im Rahmen dieser Arbeit gewählt wurde, ist die Verwendung als Hausaufgabenstellung. Dabei werden nach der dritten Unterrichtsstunde (Zusammentragen der gewonnenen Ergebnisse) die Aufgaben 1 bis 4 aufgegeben und nach der letzten Stunde die Aufgabe 5 zur Feynman-Pfeiladdition. Dabei sind alle Fragen schriftlich zu beantworten. Dies dient dazu, die Schüler zu einer intensiveren häuslichen Auseinandersetzung mit den erarbeiteten Phänomenen zu bewegen. Letzteres ist zur Vertiefung des Verständnisses ungemein wichtig. Die Besprechung der Hausaufgaben erfolgt dann im Ganzen zu Beginn der auf die letzte Stunde der Unterrichtseinheit folgenden Sitzung.

Anmerkungen:

- Es ist nicht damit getan, den Schülern das Lösungsblatt nur auszuteilen! Als zusätzliche Sicherung und Überprüfung des Lernerfolgs ist eine Besprechung der Aufgaben im Unterrichtsgespräch unbedingt zu empfehlen.
- Bei Aufgabe 5 sind auch Lösungen zu akzeptieren, die auf Messfehler bei der Entfernungsmessung in der Skizze zurückzuführen sind. In diesem Zusammenhang empfiehlt sich der Hinweis beim Austeilen (bzw. beim Stellen der entsprechenden Hausaufgabe), dass die Linien in den Spalten jeweils an dem Punkt beginnen, an dem die grünen Linien ansetzen.
- Die Länge der Amplituden auf dem Lösungsblatt entspricht aus Platzgründen nicht den vorgegebenen 1,5cm.

⁴⁵ Selbst Richard P. Feynman, der berühmte Physikdozent, hat in seinem Buch *QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie*, 2. Auflage, Piper, München, 1989, eine Unmenge von Abbildungen benötigt, um seine Pfeiladdition zu erklären.

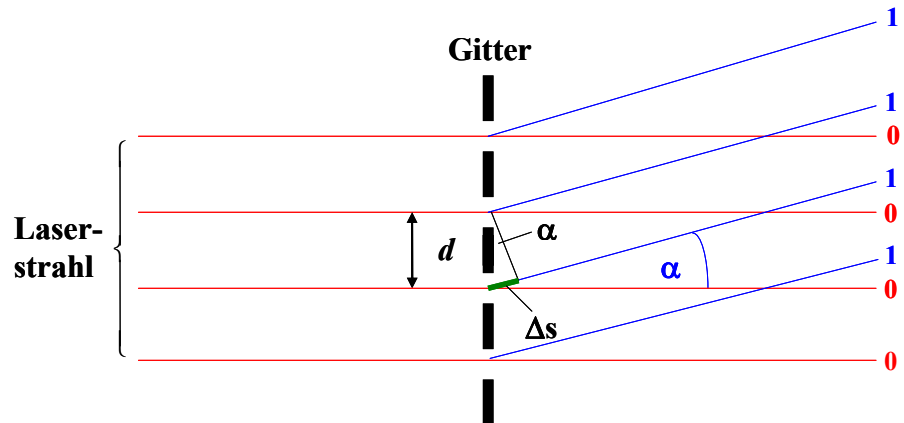
⁴⁶ Ideales Gitter mit zwei Spalten

⁴⁷ Eine Umdrehung entspricht einer Wellenlänge.

TEST: „Beugung und Interferenz bei sichtbarem Licht“

1. Bedingungsgleichung für Hauptmaxima

Leiten Sie mit Hilfe der nebenstehenden Skizze die Bedingungsgleichung für Hauptmaxima her.



2. Gitterkonstante, Anzahl der Spalte, Spaltbreite und Wellenlänge

Geben Sie in allen Teilaufgaben jeweils an, welche Auswirkung eine Vergrößerung der angegebenen Variablen auf den gegenseitigen Abstand, die Intensität und die Breite der Maxima hat.

- | | |
|--------------------------|-------------------------------------|
| a) Gitterkonstante d | c) Wellenlänge λ |
| b) Anzahl der Spalte N | d) Spaltbreite b beim Einzelspalt |

3. Nebenmaxima

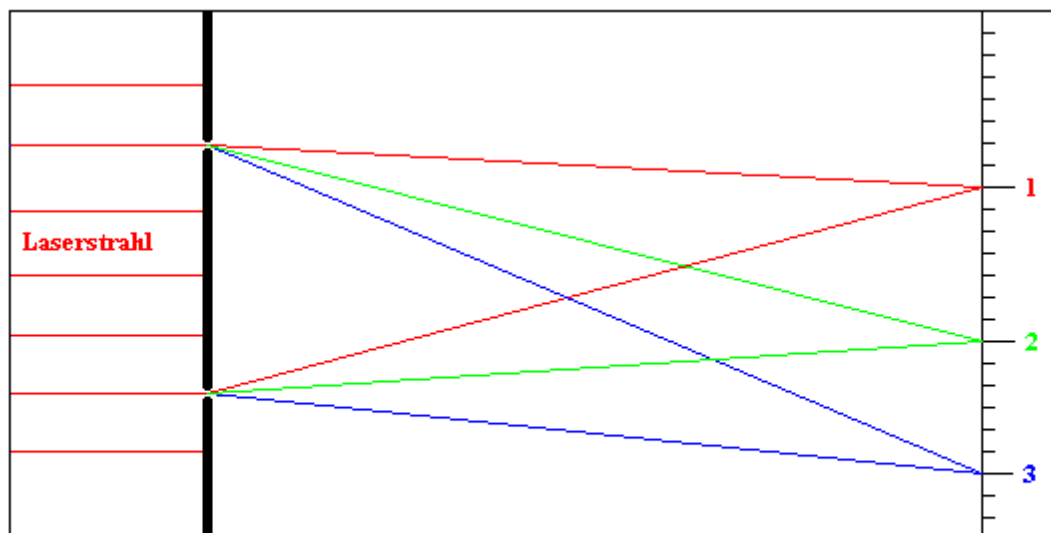
Geben sie an, wie viele Nebenmaxima und Minima bei der Beugung an N Spalten zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Hauptmaxima auftreten.

4. Intensitätsverteilung beim realen Gitter

Erläutern sie kurz, wie die Intensitätsverteilung des realen Gitters zustande kommt.

5. Feynman-Pfeiladdition

- a) Die folgende Abbildung ist eine maßstabsgetreue Skizze des Durchgangs eines Laserstrahls $\lambda_{\text{Laser}} = 640 \text{ nm}$ durch ein ideales Gitter (Anzahl der Spalte: 2). Bestimmen Sie für jeden der drei eingezeichneten Punkte 1, 2 und 3 die resultierende Amplitude mit Hilfe der Feynman-Pfeiladdition. Die Länge der einzelnen Amplituden sei mit jeweils $1,5 \text{ cm}$ vorgegeben. Geben Sie gegebenenfalls an, ob es sich beim jeweiligen Punkt um ein Intensitätsmaximum oder -minimum handelt.



Hinweis: Messen Sie mit einem Lineal den Abstand der einzelnen Spalte zum jeweiligen Punkt auf $0,05 \text{ cm}$ genau und stellen Sie fest, wie oft die Wellenlänge λ_{Laser} darin enthalten ist.

- b) Geben sie an, wie man aus der resultierenden Amplitude in einem Punkt ein Maß für die Intensität an dieser Stelle berechnet.

Lösungsblatt zum Test „Beugung und Interferenz bei Licht“

1. Bedingungsgleichung für Hauptmaxima

Aus der Skizze kann man für den Gangunterschied Δs zweier benachbarter Wellenzüge ablesen:

$$\sin \alpha = \frac{\Delta s}{d} \Rightarrow \Delta s = d \cdot \sin \alpha$$

Für ein Hauptmaximum müssen alle von den einzelnen Spalten des Gitters kommenden Wellenzüge konstruktiv interferieren. Für den Gangunterschied zweier benachbarter Wellenzüge folgt also:

$$\Delta s = m\lambda \quad \text{mit} \quad m \in \mathbb{N}$$

Daraus ergibt sich die **Bedingungsgleichung für Hauptmaxima**:

$$m\lambda = d \cdot \sin \alpha$$

2. Gitterkonstante, Anzahl der Spalte, Spaltbreite und Wellenlänge

- Je größer die Gitterkonstante (=Spaltmittenabstand) ist, desto näher liegen die Maxima beieinander und desto schmaler sind sie folglich auch. Auf die Intensität der Maxima hat die Gitterkonstante (fast) keinen Einfluss.
- Mit zunehmender Anzahl der Spalte wächst die Intensität der Hauptmaxima, während ihre Breite abnimmt. Auf den gegenseitigen Abstand der Hauptmaxima hat die Anzahl der Spalte keinen Einfluss.
- Je größer die Wellenlänge des verwendeten Lichts ist, desto weiter liegen die Maxima auseinander und desto breiter werden sie auch. Auf die Intensität der Maxima hat die Wellenlänge keinen Einfluss.
- Je größer die Spaltbreite bei der Beugung am Einzelspalt wird, desto schmaler werden die Maxima und desto näher liegen sie auch beieinander. Auf die Intensität der Maxima hat die Spaltbreite hier keinen Einfluss.

3. Nebenmaxima

Bei der Beugung an N Spalten treten zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Hauptmaxima jeweils $N - 1$ Minima und $N - 2$ Nebenmaxima auf.

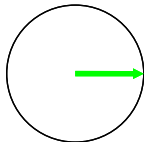
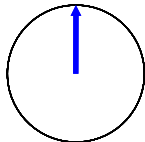
4. Intensitätsverteilung beim realen Gitter

Die Intensität hinter einem realen Gitter setzt sich an jedem Punkt zusammen aus dem Produkt der Intensität, die sich an diesem Punkt hinter einem idealen Gitter derselben Spaltzahl ergeben würde, und der Intensität die sich an diesem Punkt hinter einem Spalt mit der Spaltbreite des realen Gitters ergeben würde. Ein ideales Gitter ist eines, bei dem die Spalte unendlich schmal sind, also von jedem Spalt nur genau eine Elementarwelle ausgehen kann.

5. Feynman-Pfeiladdition

- a) (1) Wegstrecke oberer Spalt zum Punkt 1: $s_1 = 10,25 \text{ cm} = 160156,25 \cdot 640 \text{ nm} = 160156,25 \cdot \lambda_{\text{Laser}}$
 \Rightarrow Endstand des Pfeils: $0,25 \cdot 360^\circ = 90^\circ$

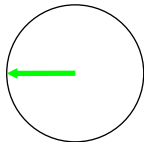
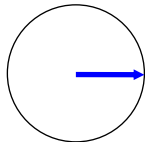
Wegstrecke unterer Spalt zum Punkt 1: $s_2 = 10,60 \text{ cm} = 165625 \cdot 640 \text{ nm} = 165625 \cdot \lambda_{\text{Laser}}$
 \Rightarrow Endstand des Pfeils: $0 \cdot 360^\circ = 0^\circ$



Resultierende Amplitude:



- (2) $s_1 = 10,60 \text{ cm} = 165625 \cdot 640 \text{ nm} = 165625 \cdot \lambda_{\text{Laser}} \Rightarrow$ Endstand des Pfeils: $0 \cdot 360^\circ = 0^\circ$
 $s_2 = 10,30 \text{ cm} = 160937,5 \cdot 640 \text{ nm} = 160937,5 \cdot \lambda_{\text{Laser}} \Rightarrow$ Endstand des Pfeils: $0,5 \cdot 360^\circ = 180^\circ$

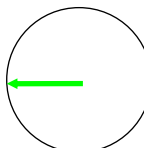
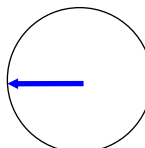


Resultierende Amplitude:



Es handelt sich hier um ein Minimum.

- (3) $s_1 = 11,10 \text{ cm} = 173437,5 \cdot 640 \text{ nm} = 173437,5 \cdot \lambda_{\text{Laser}} \Rightarrow$ Endstand des Pfeils: $0,5 \cdot 360^\circ = 180^\circ$
 $s_2 = 10,30 \text{ cm} = 160937,5 \cdot 640 \text{ nm} = 160937,5 \cdot \lambda_{\text{Laser}} \Rightarrow$ Endstand des Pfeils: $0,5 \cdot 360^\circ = 180^\circ$



Resultierende Amplitude:



Es handelt sich hier um ein Maximum.

- b) Das Quadrat der resultierenden Amplitude ist ein Maß für die Intensität.

7 Erfahrungen und Ausblick

Die hier vorgestellte Unterrichtseinheit wurde mit einem Physik-Grundkurs im Ausbildungsabschnitt 12/2 durchgeführt. Dabei wurden Erfahrungen gemacht, die sich in weiten Bereichen mit denen decken, die der Autor bereits anderweitig sammeln konnte. Es hat sich in der ersten Stunde wieder einmal gezeigt, dass den Kollegiaten Analogieschlüsse dann sehr leicht fallen, wenn sie wie hier offensichtlich, bzw. naheliegend sind. Dies hat den Vorteil, dass die „neuen“ Erkenntnisse sehr gut mit den vorhandenen Wissensstrukturen vernetzt werden. Es ergibt sich aber auch der Nachteil, dass derart gewonnene Einsichten selten hinterfragt werden. Um dem vorzubeugen, ist es notwendig, gelegentlich auf mögliche Widersprüche hinzuweisen. So ist z.B. bei einem Gitter nicht nur dort ein Intensitätsminimum, wo sich gerade je zwei Elementarwellen destruktiv überlagern. Es ist darauf hinzuwirken, dass Erkenntnisse beim Doppelspalt nicht einfach für den Mehrfachspalt (das Gitter) übernommen werden können, sondern die Folgerungen, wie bei allen Analogieschlüssen, auf ihre Tragfähigkeit hin überprüft werden müssen.

Beim Computerpraktikum hat sich wieder gezeigt, wie wichtig die bereits oben genannten Kriterien (vgl. S. 15) für eine geeignete und sinnvolle Durchführung sind. Eine Reihe von Schülern hatte noch nie mit einem Computer gearbeitet. Sie hatten aber, Aufgrund der kurzen, schrittweise dargestellten Einführung in die Bedienung des Programms, offensichtlich trotzdem keine Schwierigkeiten mit dem Einstieg und dem Umgang mit dem Programm. Die Schüler haben auf Nachfrage übereinstimmend erklärt, dass der Umgang mit dem Programm ihnen keinerlei Schwierigkeiten bereitet hat. Allerdings fiel es einigen Kollegiaten schwer, ihre Beobachtungen adäquat schriftlich zu formulieren. Der Kursleiter muss deshalb beim Rundgang durch die Praktikumsgruppen auf die Art der schriftlichen Bearbeitungen achten und die jeweilige Gruppe gegebenenfalls darauf hinweisen, dass es notwendig ist, die Erkenntnisse genau zu formulieren. Es hat sich gezeigt, dass die Praktikumsgruppen, die ihre Ergebnisse genauer formuliert haben, auch im Unterrichtsgespräch inhaltlich bessere Beiträge lieferten. Dies legt nahe, dass der vom Autor unterstellte Zusammenhang zwischen schriftlicher Fixierung und kognitiver Auseinandersetzung mit den Erkenntnissen in der Tat besteht.

Die Behandlung der Feynman-Pfeiladdition hat gezeigt, dass es notwendig ist, die Grundlagen dieses Konzeptes sehr intensiv zu erarbeiten. In diesem Bereich ist es besonders wichtig, sehr kleinschrittig vorzugehen, um keine Schüler zu verlieren. Gerade in dieser Phase ist es wichtig, die Schüler, deren Aussagen, aber auch deren Mimik zu verfolgen, und beim kleinsten Anzeichen von Unverständnis an der entsprechenden Stelle noch einmal nachzuhaken. Andernfalls kann es sehr leicht passieren, dass einige Kollegiaten kognitiv „aussteigen“ und nichts mehr mitbekommen. In diesem Zusammenhang hat es sich als äußerst hilfreich herausgestellt, immer wieder Verständniskontrollen in das Unterrichtsgespräch einzubauen. Dies lässt sich z. B. dadurch bewerkstelligen, dass man verschiedene Schüler unterschiedliche Beispiele immer wieder mit dem Konzept erklären lässt.⁴⁸ Sind die Grundlagen erst einmal verstanden, so fallen den Kollegiaten (dies zeigt der durchgeführte Unterricht) Erklärungen mit diesem Konzept relativ leicht.

Aufgrund der im Lehrplan [29] vorgesehenen Zeit von im Grundkurs maximal vier Unterrichtsstunden für das Thema Lichtinterferenz ist es nötig Schwerpunkte zu setzen. Eine Möglichkeit dies zu tun wurde hier vom Autor vorgestellt. Je nach Intention und eigenen Interessen (Begeisterte Lehrer motivieren besser!), können auch andere Inhalte intensiver bearbeitet werden. Unabhängig von dieser Entscheidung sind aber die hier vorgestellten Unterrichtsbausteine

- Computerausgewertete Realexperimente
- Computerpraktikum an einem Simulationsprogramm
- Feynmansche Pfeiladdition dargestellt durch Computeranimation

einzeln, oder alle zusammen, in diesem Themenbereich gewinnbringend einsetzbar.

Wie bereits in der Einführung und im Kapitel 5 ausgeführt, dient die Feynman-Pfeiladdition letztlich dazu, die Quantentheorie zu veranschaulichen. Wenn man, wie hier geschehen, die Grundlagen gelegt hat, dann sollte man auch unbedingt bei der Besprechung des „Welle-Teilchen-Dualismus“ darauf zurückgreifen und die Pfeile im Sinne der Quantenmechanik zu Wahrscheinlichkeitsamplituden umdeuten. Da die Kollegiaten dann schon mit der Pfeiladdition vertraut sind, sollte es leichter fallen als mit anderen Methoden, den Schülern eine mögliche Auflösung des „Dualismus“ zu vermitteln. Der Autor jedenfalls wird die hier angedeutete Fortsetzung der Unterrichtseinheit mit seinem nächsten Kollegstufenkurs Physik erproben.

⁴⁸ Einige gute Schüler kann man in dieser Zeit kognitiv bei der Stange halten, indem man sie immer wieder einen Schritt weiterdenken lässt. Man kann sie z. B. damit beauftragen, sich zu überlegen, wie die Intensität mit der resultierenden Amplitude zusammenhängen könnte.

8 Literaturverzeichnis

Lehrbücher der Experimentalphysik

- [1] Demtröder, Wolfgang: Experimentalphysik 2, Elektrizität und Optik, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1995
- [2] Feynman, Richard P.: Feynman Vorlesungen über Physik, Band I: Mechanik, Strahlung, Wärme, R. Oldenbourg Verlag, München, 1987
- [3] Feynman, Richard P.: Feynman Vorlesungen über Physik, Band III: Quantenmechanik, 2. Auflage, korrigierter Nachdruck, R. Oldenbourg Verlag, München, 1992
- [4] Frauenfelder, Huber: Einführung in die Physik, II. Band, Elektrizitätslehre, Wellenlehre, Akustik, Optik, 2., verbesserte Auflage, Ernst Reinhardt Verlag, Basel, 1967
- [5] Gobrecht, Heinrich (Hrsg.): Bergmann-Schäfer Lehrbuch der Experimentalphysik, Band III, Optik, 6., völlig neue Auflage, Walter de Gruyter, Berlin, 1974
- [6] Zinth, Körner: Physik III, Optik, Quantenphänomene und Aufbau der Atome, R. Oldenbourg Verlag, München, 1994

Physikalische Nachschlagewerke

- [7] Gerthsen, Kneser, Vogel: Physik, 16. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1989
- [8] Hering, Martin, Stohrer: Physik für Ingenieure, 3., verbesserte Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989

Schulbücher

- [9] Bader, Dorn (Hrsg.): Physik Oberstufe Gesamtband 12/13, Schroedel Schulbuchverlag, Hannover, 1986
- [10] Bredthauer, Wilhelm u.a.: Groß-Berhag, Schwingungen und Wellen, 1. Auflage, Ernst Klett Schulbuchverlag, Stuttgart, 1986
- [11] Grehn, Joachim (Hrsg.): Metzler Physik, Gesamtband, 2., durchgesehene Auflage, Schroedel Schulbuchverlag, Hannover, 1992
- [12] Hammer, Himpfel: Physik Oberstufe, Lehr- und Arbeitsbuch, Band 1, 2. Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München, 1969
- [13] Hammer, Knauth, Kühnel: Physik Oberstufe Elektrizitätslehre, Lehr- und Arbeitsbuch, Band 2, 4., durchgesehene Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München, 1974
- [14] Kuhn, Wilfried (Hrsg.): Physik, Band II, 2. Teil: Klasse 12/13, 1. Auflage, Westermann Schulbuchverlag, Braunschweig, 1990
- [15] Müller, Leitner, Dilg, Mráz: Physik, Leistungskurs, 2. Semester, Elektromagnetische Schwingungen und Wellen, Wellenoptik, Relativitätstheorie, 8., neubearbeitete Auflage, Ehrenwirth Verlag, München, 1990
- [16] Wittmann, Jena, Mettenleiter: Physik, Wellenlehre, Optik, 1. Auflage, Bayerischer Schulbuch-Verlag, München, 1987

Lehrerbände

- [17] Bader, Dorn (Hrsg.): Physik Oberstufe Gesamtband 12/13, Lehrerband mit Aufgabenlösungen und Zusatzaufgaben, Schroedel Schulbuchverlag, Hannover, 1988
- [18] Bader, Franz: Eine Quantenwelt — ohne Dualismus, Schroedel Schulbuchverlag, Hannover, 1996
- [19] Grehn, Joachim (Hrsg.): Metzler Physik, Lehrerband, 2., durchgesehene Auflage, Metzler Schulbuchverlag, Hannover, 1993
- [20] Teichmann, Schreier, Segre: Experimente die Geschichte machten, 1. Auflage, Bayerischer Schulbuch-Verlag, München, 1995

Populärwissenschaftliche Werke

- [21] Brachner, Fichtner: Quantenmechanik für Lehrer und Studenten, Hermann Schroedel Verlag, Hannover, 1977
- [22] Feynman, Richard P.: QED – Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie, 2. Auflage, Piper, München, 1989
- [23] Wolf, Fred Alan: Der Quantensprung ist keine Hexerei, Die neue Physik für Einsteiger, Birkhäuser Verlag, Basel, 1986

Artikel aus Fachzeitschriften

- [24] Bader, Franz: Feynmans Pfeiladdition oder Dualismus Welle – Teilchen?, in: Physik in der Schule, Jahrgang 33, Heft 9, Pädagogischer Zeitschriftenverlag, Berlin, 1995, S. 290 – 295
- [25] Bader, Franz: Optik und Quantenphysik nach Feynmans QED, in: Physik in der Schule, Jahrgang 32, Heft 7/8, Pädagogischer Zeitschriftenverlag, Berlin, 1994, S. 250 – 256
- [26] Heuer, Dieter: Konzepte für Systemsoftware zum Physikverstehen, in: Praxis der Naturwissenschaften Physik, Jahrgang 45, Heft 4, Aulis Verlag Deubner & Co KG, Köln, 1996, S. 2 – 11
- [27] Kuhn, Wilfried: Quantenphysik in der Schule?, in: Physik in der Schule, Jahrgang 32, Heft 7/8, Pädagogischer Zeitschriftenverlag, Berlin, 1994, S. 257 – 261
- [28] Wörlen, Friedrich: Die Laserdiode als Lichtquelle – Ausgewählte Experimente für die S II, in: Praxis der Naturwissenschaften Physik, Jahrgang 44, Heft 4, Aulis Verlag Deubner & Co KG, Köln, 1995, S. 10 – 20

Lehrplan

- [29] Kultusministerium (Hrsg.): Lehrplan für das bayerische Gymnasium, Fachlehrplan für Physik, in: Amtsblatt des Bayerischen Staatsministeriums für Unterricht, Kultus, Wissenschaft und Kunst, Jahrgang 1991, Sondernummer 9, München, 29. November 1991

Verwendete Programme

- [30] Bader, Franz: Programmpaket **Eine Quantenwelt ohne Dualismus**, Schroedel Schulbuchverlag, Hannover, 1996
- [31] Heuer, Dieter: **Pakma**, Entwicklung des Lehrstuhls für Didaktik der Physik der Julius-Maximilians-Universität Würzburg unter der Leitung von Prof. Dr. Dieter Heuer; Programmierungsumgebung, die nahezu jede im Physikunterricht denkbare Computeranwendung unterstützt.
- [32] Roth, Jürgen: **Interferenzverteilung**, Programm für die Programmierungsumgebung Pakma zur Messung und Auswertung von Interferenzverteilungen
- [33] Wüllenweber, M.: Interferenz am Gitter, Simulationsprogramm zum Thema aus dem Programmpaket **ALBERT[®]**
M. Wüllenweber: **ALBERT[®]**, Physik Interaktiv, 1. Mechanik und Wellenlehre, Optik, Version 1.1, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1996

9 Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit in allen Teilen selbständig gefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Ich versichere ferner, dass ich diese schriftliche Hausarbeit nicht schon als Doktor-, Magister- oder Diplomarbeit bei einer Hochschule oder als schriftliche Hausarbeit bei einer anderen Staatsprüfung für ein Lehramt eingereicht habe.

Würzburg, 07.12.1996

Jürgen Roth