

Sonderdruck aus

Der Physikunterricht

Beiträge zu seiner wissenschaftlichen und methodischen Gestaltung



ERNST KLETT VERLAG STUTTGART

Einsatz eines Mikrocomputers im Physikunterricht zur Messung und theoretischen Analyse der Verteilung der Lichtintensität bei der Beugung an Einzel- und Mehrfachspalten

U. Bangert, M. Bormann und H. Haun

Ein Mikrocomputer kann in Verbindung mit einem A/D-Wandler als Meßwerterfassungssystem eingesetzt werden. Als ein Einsatzbeispiel im Physikunterricht wird ein Verfahren zur Messung der Verteilung der Lichtintensität in den Beugungsfiguren von Einzel- und Mehrfachspalten beschrieben. Die Meßanordnung besteht aus einem Fototransistor als Strahlungsdetektor, der mit Hilfe eines vom Computer gesteuerten Plotters durch das Beugungsbild geführt wird. Der Computer registriert das der Lichtintensität proportionale Ausgangssignal des Transistors in Abhängigkeit von dessen Ort. Die so gemessene Intensitätsverteilung läßt sich anschließend mit dem Computer weiter analysieren. Das entwickelte Programmpaket enthält Programmteile, mit denen im Fall Fraunhoferscher Beugung die jeweilige Intensitätsverteilung mit der entsprechenden theoretischen Voraussage verglichen werden kann.

1 Einleitung

Eine vertiefte Behandlung der Wellenoptik in einem Leistungskurs Physik schließt in der Regel die quantitative Erfassung der Verteilung der Lichtintensität ein, die bei der Fraunhoferschen Beugung am Spalt und an Mehrfachspalten in den jeweiligen Beugungsbildern auftritt. Dabei erfolgt die zur theoretischen Ableitung der Intensitätsverteilungen erforderliche phasengerechte Summation von *Huygensschen* Elementarwellen durch entsprechende vektorielle Addition der Wellenamplituden. Zur Messung der Intensitätsverteilung in einem heute üblicherweise mit Laserlicht erzeugten Beugungsbild können Fotodioden, Fototransistoren oder Fotowiderstände mit möglichst kleiner Apertur verwendet werden. Es lassen sich dann Versuchsanordnungen erstellen, in denen der Strahlungsdetektor durch das Beugungsbild hindurchbewegt und die Intensitätsverteilung mit Hilfe eines γ - bzw. xy -Schreibers registriert wird.

Ein genauer quantitativer Vergleich einer gemessenen Intensitätsverteilung mit der entsprechenden theoretischen Voraussage bereitet jedoch im Unterricht nicht unerhebliche Schwierigkeiten und unterbleibt daher oft. Zunächst ist die numerische Berechnung der für die jeweilige Versuchssituation maßgeblich theoretischen Intensitätsverteilung auch bei Verwendung eines Taschenrechners langwierig. Sodann muß durch entsprechende

Vermessung die Zuordnung zwischen der Position des Strahlungsdetektors und dem Beugungswinkel sehr genau ermittelt werden. Schließlich muß die berechnete Verteilung nach geeigneter Normierung mühsam von Hand in die Abbildung der gemessenen Verteilung auf dem Registrierpapier eingezeichnet werden, um einen unmittelbaren Vergleich zu ermöglichen.

Mit Hilfe eines Mikrocomputers, der durch einen A/D-Wandler zur Meßwertaufnahme ergänzt ist und der im übrigen als Peripheriegeräte einen Bildschirm und Plotter besitzt, werden die Untersuchungen wesentlich erleichtert. Der folgende Beitrag beschreibt eine entsprechende Versuchsanordnung unter Verwendung des Mikrocomputers APPLE II-Plus, erläutert das hierfür entwickelte Programmpaket und dokumentiert einige Beispiele der mit dieser Anordnung durchgeführten Analyse von Beugungsphänomenen.

2 Die theoretischen Beziehungen für die Intensitätsverteilungen

Bei der quantitativen Behandlung von Beugungsphänomenen muß sich der Physikunterricht auf den Fall der Fraunhoferschen Beugung beschränken, da die Verhältnisse bei der Fresnelschen Beugung auf elementare Weise nicht mehr erfaßt werden können. Darüber hinaus ist jedoch aus Gründen der in der Schule gegebenen mathematischen Voraussetzungen eine weitere Einschränkung der Betrachtungen auf die Fraunhofersche Beugung an ebenen Spalten und Spaltsystemen erforderlich. Dabei steht aus sachlichen und methodischen Gründen die Beugung am Einzelspalt am Anfang der Erörterung, da das Beugungsbild eines Mehrfachspaltes aus der Überlegung der an den einzelnen Spalten gebeugten Wellen entsteht und das Verfahren der theoretischen Ermittlung von Beugungsintensitäten zunächst am einfachsten Fall der Einzelspaltbeugung überhaupt erst eingeführt werden muß.

Die Fraunhofersche Beugung von Licht an einem Spalt wird für den Fall betrachtet, daß ein paralleles Lichtbündel senkrecht auf die Ebene des Spaltes einfällt. Das gebeugte Licht hinter dem Spalt wird in einer Ebene senkrecht zur Spaltlänge beobachtet. Der Winkel α , den die Beobachtungsrichtung mit der Richtung des einfallenden Lichtes bildet, heißt Beugungswinkel. Um die Intensität $I(\alpha)$ des gebeugten Lichtes unter dem Beugungswinkel α zu ermitteln, müssen in dieser Richtung die kohärenten Elementarwellen, die nach dem *Huygensschen* Prinzip von allen Punkten der bestrahlten Spaltfläche ausgehen, phasengerecht addiert werden. Dabei kann allerdings eine Beschränkung auf die Elementarwellen erfolgen, die ihren Ursprung in der Linie haben, in der die Beobachtungsebene die Spaltebene schneidet. Die phasengerechte Addition der Elementarwellen erfolgt durch entsprechende vektorielle Addition der Wellenamplituden. Das Verfahren ist z.B. in [1]–[3] ausführlich dargestellt. Unter Berücksichtigung der Proportionalität zwischen der Wellenintensität und dem Quadrat der Wellenamplitude ergibt sich schließlich aus der resultierenden Wellenamplitude die Intensität des gebeugten Lichtes. Auf diese Weise erhält man bei der Fraunhoferschen Beugung von Licht der Wellenlänge λ an einem Spalt der Breite d für die Intensität der gebeugten Strahlung in Abhängigkeit vom

Beugungswinkel α die Beziehung

$$I(\alpha) = I_0 \frac{\sin^2(\pi x)}{(\pi x)^2} \text{ mit } x = \frac{d}{\lambda} \sin \alpha \quad (1)$$

Mit einem Mikrocomputer kann diese Funktion leicht berechnet und graphisch dargestellt werden. Ihr Verlauf ist in Abb. 1 wiedergegeben. Die Funktion besitzt Nullstellen bei

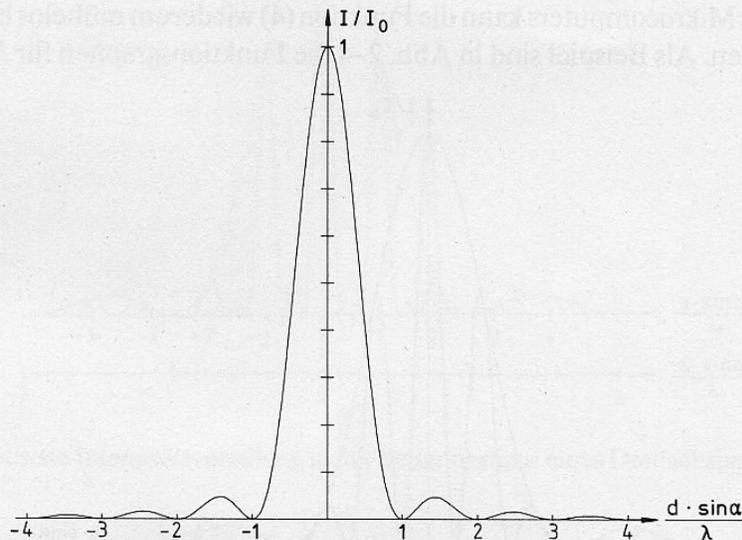


Abb. 1: Theoretische Intensitätsverteilung in der Beugungsfigur eines Einzelspalts.

$x = \pm k$ mit $k = 1, 2, 3, \dots$. Somit treten Intensitätsminima unter Winkeln α auf, für die die Bedingung gilt

$$d \cdot \sin \alpha = \pm k \lambda \text{ mit } k = 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

Zwischen den Minima liegen Maxima stark unterschiedlicher Intensität. Das intensitätsreichste Maximum erscheint unter dem Winkel $\alpha = 0$, es wird Hauptmaximum genannt. Die übrigen wesentlich intensitätsschwächeren Maxima heißen Nebenmaxima. Ihre Winkellage erfüllt in guter Näherung die Bedingung

$$d \cdot \sin \alpha = \pm (2k' + 1) \frac{\lambda}{2} \text{ mit } k' = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

Die Intensität der Nebenmaxima nimmt mit wachsendem k' schnell ab, z.B. berechnet man für die ersten drei Nebenmaxima ($k' = 1, 2$ bzw. 3) Intensitäten von $0,047 I_0$, $0,017 I_0$ bzw. $0,008 I_0$.

Bei der Beugung von Licht an einem System aus mehreren Spalten tritt außer der Beugung an den einzelnen Spalten noch eine Interferenz des von allen Seiten herrührenden gebeugten Lichtes auf. Als Beugungsbild eines solchen Systems ergibt sich das Beugungsbild eines der Spalte, jedoch moduliert mit dem Interferenzbild des an allen Spalten gebeugten Lichtes. Zur Ableitung der Intensitätsverteilung im Beugungsbild muß nunmehr die phasengerechte vektorielle Addition der Amplituden von Elementarwellen aus allen Spalten erfolgen. Für einen Mehrfachspalt mit N äquidistanten Spalten im Abstand g (Gitterkonstante) erhält man im Fall Fraunhoferscher Beugungsart die Beziehung

$$I(\alpha) = I_0 \frac{\sin^2(\pi x)}{(\pi x)^2} \cdot \frac{\sin^2(N\pi z)}{\sin^2(\pi z)} = I_1 \cdot I_2 \quad (4)$$

mit $x = \frac{d}{\lambda} \sin \alpha$ und $z = \frac{g}{\lambda} \sin \alpha$ (vgl. z.B. [3]).

Hierin rührt der Faktor $I_1 = I_0 \sin^2(\pi x)/(\pi x)^2$ von der Lichtbeugung an den Einzelspalten her und der Faktor I_2 von der Interferenz des an allen Spalten gebeugten Lichtes.

Mit Hilfe eines Mikrocomputers kann die Funktion (4) wiederum mühelos berechnet und geplottet werden. Als Beispiel sind in Abb. 2-4 die Funktionsgraphen für $N=2$ (Doppel-

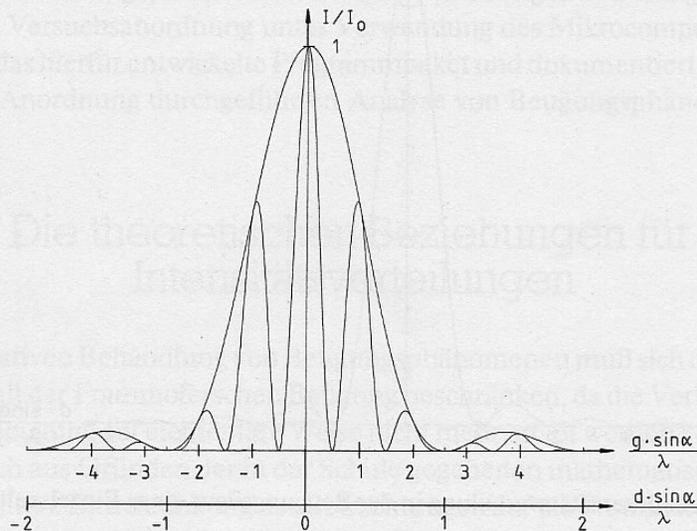


Abb. 2: Theoretische Intensitätsverteilung in der Beugungsfigur eines Doppelspalt (Beispiel für $g/d=2,6$).

spalt), $N=3$ und $N=8$ wiedergegeben. Die Verteilungen sind gekennzeichnet durch Maxima unter Winkel α , für die in guter Näherung die Bedingung gilt

$$g \cdot \sin \alpha = \pm m \lambda \text{ mit } m = 0,1,2,3,\dots \quad (5)$$

Diese Extremwerte werden Hauptmaxima genannt. Sie haben die Intensitätsverteilung eines der Spalte zur Einhüllenden und resultieren aus der Interferenz des an allen N Spalten gebeugten Lichtes. Als Folge hiervon können einzelne Hauptmaxima ausfallen. Dieses ist immer dann der Fall, wenn bei Erfüllung von Bedingung (5) gleichzeitig auch Bedingung (2) erfüllt ist, d.h. in der Intensitätsverteilung des Einzelspaltes ein Minimum vorliegt (aus (2) und (5) folgt, daß dieser Fall nur eintreten kann, wenn d in einem rationalen Verhältnis zu g steht).

Zwischen jeweils zwei aufeinanderfolgenden Hauptmaxima treten $N-1$ Nullstellen der Funktion (4), d.h. $N-1$ Intensitätsminima, auf. Deren Lage ist festgelegt durch die Bedingung

$$g \cdot \sin \alpha = \pm \left(m + \frac{n}{N}\right) \lambda \text{ mit } n=1,2,3,\dots N-1, \quad (6)$$

da hierfür die Funktion I_2 und damit auch $I(\alpha)$ verschwindet.

Zwischen jeweils zwei aufeinanderfolgenden Minima erreicht die Funktion (4) wieder ein Maximum, so daß zwischen zwei aufeinanderfolgenden Hauptmaxima noch $N-2$ weitere

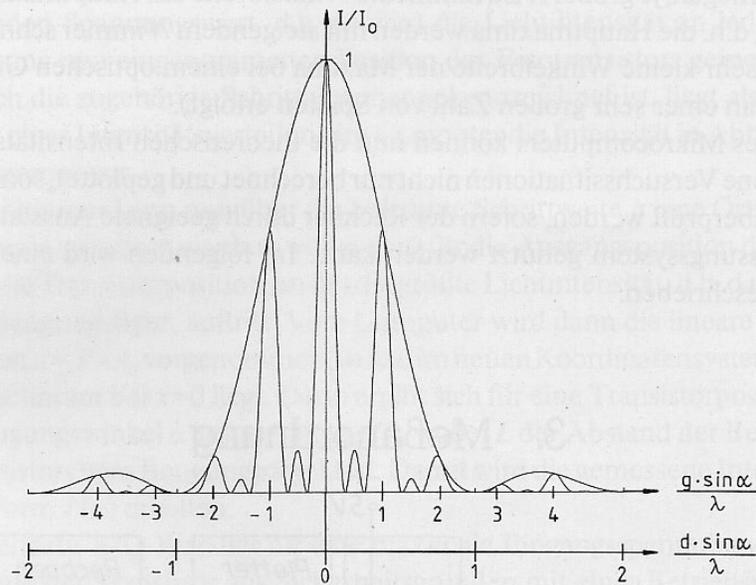


Abb. 3: Theoretische Intensitätsverteilung in der Beugungsfigur eines Dreifachspaltes (Beispiel für $g/d=2,6$).

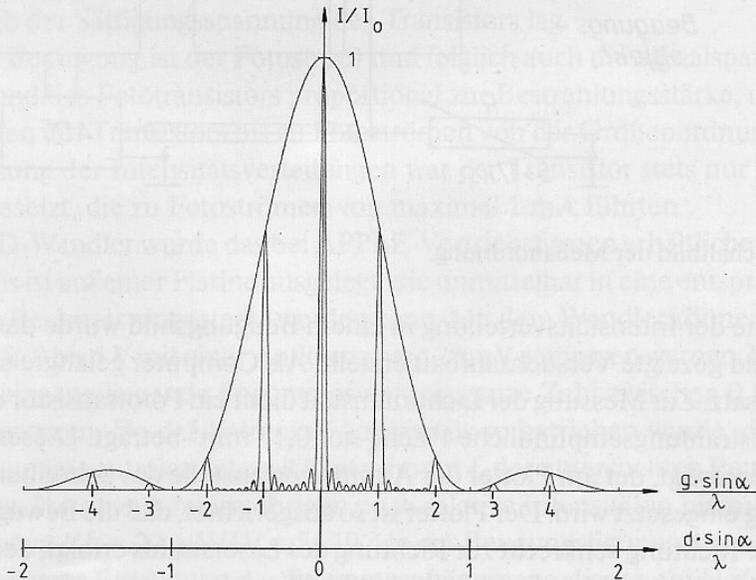


Abb. 4: Theoretische Intensitätsverteilung in der Beugungsfigur eines Mehrfachspaltes mit $N=8$ Spalten (Beispiel für $g/d=2,6$).

Maxima liegen. Diese Extremwerte werden Nebenmaxima genannt, ihre Intensität ist wesentlich kleiner als die der Hauptmaxima und nimmt zudem mit wachsendem N ab. Beim Doppelspalt ist $N-2=0$, d.h. hier treten noch keine Nebenmaxima, sondern nur Hauptmaxima auf, vgl. Abb. 2. Da die ein Hauptmaxima eingrenzenden Minima um so nä-

her an diesem liegen, je größer N ist, nimmt die Winkelbreite der Hauptmaxima mit wachsendem N ab, d.h. die Hauptmaxima werden mit steigendem N immer schmäler (hieraus resultiert die sehr kleine Winkelbreite der Maxima bei einem optischen Gitter, bei dem die Beugung an einer sehr großen Zahl von Spalten erfolgt).

Mit Hilfe eines Mikrocomputers können nun die theoretischen Intensitätsverteilungen für vorgegebene Versuchssituationen nicht nur berechnet und geplottet, sondern auch experimentell überprüft werden, sofern der Rechner durch geeignete Ausstattung auch als Meßwerterfassungssystem genutzt werden kann. Im folgenden wird eine solche Meßanordnung beschrieben.

3. Meßanordnung

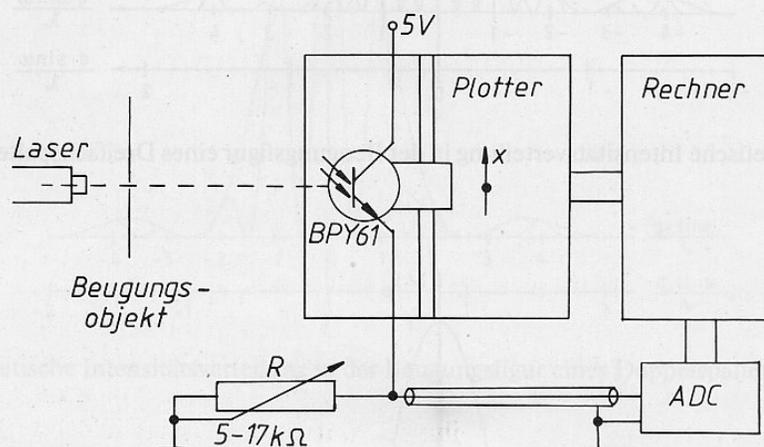


Abb. 5: Blockschaltbild der Meßanordnung.

Zur Aufnahme der Intensitätsverteilung in einem Beugungsbild wurde der in Abb. 5 im Blockschaltbild gezeigte Versuchsaufbau erstellt. Als Computer gelangte ein APPLE II-Plus zum Einsatz. Zur Messung der Lichtintensität dient ein Fototransistor des Typs BPY 61, dessen bestrahlungsempfindliche Fläche nur $0,17 \text{ mm}^2$ beträgt. Dieser ist an einem kurzen Stab befestigt, der am Plotter der Anordnung anstelle des Schreiberstiftes in dessen Halterung eingesetzt wird. Der Plotter ist so ausgerichtet, daß die Bewegung der Stifthalterung in x -Richtung senkrecht zur Richtung des Laserstrahls erfolgt, der auf das Beugungsobjekt (Spalt bzw. Mehrfachspalt) einfällt. Diese Bewegung wird vom Computer gesteuert; sie führt den Fototransistor durch das Beugungsbild (hinsichtlich dieses Verfahrens vgl. auch [4]). Bei dem verwendeten Plotter (Marke HILOT von der Firma *Houston Instruments*) erfolgt der Transport des Transistors über dessen gesamten Aussteuerungsbereich in x -Richtung in 2640 Schritten vom Abstand $a=0,1 \text{ mm}$. Diese Schrittfolge ist durch den die Stifthalterung transportierenden Schrittmotor des Plotters vorgegeben. Die am Arbeitswiderstand R des Fototransistors abfallende Spannung ist der Lichtintensität am Ort des Transistors proportional. Über einen A/D-Wandler wird die Spannung dem

Computer zugeführt. Dieser registriert nach jedem Schritt der Stifthalterung des Plotters den anliegenden Spannungswert, d.h. es wird die Lichtintensität an jeder nach einer Schrittbewegung neu eingenommenen Position des Fototransistors gemessen. Da jede Position durch die zugehörige Schrittnummer gekennzeichnet ist, liegt als Rohergebnis der Messung einer Intensitätsverteilung im Computer die Intensität in Abhängigkeit von der Schrittnummer vor.

Jeder Schrittnummer kann nun über die bekannte Schrittweite a eine Ortskoordinate x' des Transistors zugeordnet werden, wobei $x'=0$ für die Ausgangsposition des Transistors gilt. Es sei x_0 die Transistorposition, an der die größte Lichtintensität, d.h. das zentrale Maximum der Beugungsfigur, auftritt. Vom Computer wird dann die lineare Koordinatentransformation $x = x' - x_0$ vorgenommen, so daß im neuen Koordinatensystem das zentrale Intensitätsmaximum bei $x=0$ liegt. Dann ergibt sich für eine Transistorposition x der zugehörige Beugungswinkel α aus $\alpha = \arctg x/L$, wobei L der Abstand der Bestrahlungsfläche des Transistors vom Beugungsobjekt ist. Damit wird die gemessene Intensitätsverteilung in der Form $I(\alpha)$ erhalten.

Da der verwendete A/D-Wandler für eine maximale Eingangsspannung von 5 V ausgelegt war, wurde der Transistor aus Sicherheitsgründen mit einer Betriebsspannung von $U_0=5V$ betrieben. Der variable Arbeitswiderstand wurde jeweils so gewählt, daß an ihm eine Spannung von 4 V abfiel, wenn sich der Transistor im zentralen Intensitätsmaximum der untersuchten Beugungsfigur befand. Hierdurch wurde sichergestellt, daß bei der Messung der Intensitätsverteilung die Kollektor-Emitter-Spannung $U_{CE} \geq 1 V$ war und damit stets oberhalb der Sättigungsspannung des Transistors lag.

Unter dieser Bedingung ist der Fotostrom und folglich auch die Signalspannung am Arbeitswiderstand des Fototransistors proportional zur Bestrahlungsstärke, und zwar nach den Kenndaten des Transistors bis zu Fotostromen von der Größenordnung 10 mA. Bei der Ausmessung der Intensitätsverteilungen war der Transistor stets nur Bestrahlungsstärken ausgesetzt, die zu Fotostromen von maximal 1 mA führten.

Als 8-Bit-A/D-Wandler wurde das bei APPLE-Vertriebsfirmen erhältliche System AI-02 verwendet. Es ist auf einer Platine ausgelegt, die unmittelbar in eine entsprechende Kontaktleiste des Rechners eingesteckt werden kann. Mit dem Wandler können Spannungen im Bereich von 0 bis 5 V mit einer Auflösung von 20 mV gemessen werden. Dabei wird der am Wandlereingang liegende Spannungswert als ganze Zahl zwischen 0 bis 255 in den Rechner übertragen. Da der Fototransistor jeweils so betrieben wurde, daß seine Ausgangsspannung im zentralen Intensitätsmaximum I_0 der untersuchten Beugungsfigur etwa 4 V betrug, konnten dann im übrigen noch relative Intensitäten bis zu einer unteren Grenze von etwa $I/I_0 = 20 \text{ mV}/4V = 5 \cdot 10^{-3}$ in der Beugungsfigur nachgewiesen werden. Als Lichtquelle zur Erzeugung der Beugungsphänomene diente ein He/Ne-Laser ($\lambda = 632,8 \text{ nm}$) mit einer Strahlungsleistung von 1 mW. Die Beugungsobjekte wurden in einem Abstand von etwa 1 m von der Laseröffnung angeordnet. Der Abstand L der Beugungsobjekte vom Fototransistor lag zwischen 2 und 4 m; er wurde jeweils so gewählt, daß sich der noch ausmeßbare Teil der Beugungsfigur über den gesamten Bewegungsbereich des Fototransistors erstreckte. Um zu erreichen, daß der Transistor in jeder Position in Richtung auf das Beugungsobjekt ausgerichtet war, wurde der Transistor drehbar um die Achse des Halterungsstabes befestigt und mit einer Kombination aus Faden und gespannter Schrau-

benfeder mit einem Punkt in der Nähe des Zentrums des Beugungsobjektes verbunden. Zur visuellen Beobachtung der Beugungsfigur bei der Ausrichtung der Meßapparatur diente ein unmittelbar hinter dem Plotter aufgestellter Schirm. Abb. 6 zeigt die Anordnung aus Plotter mit aufgestecktem Fototransistor und Beobachtungsschirm im Original.

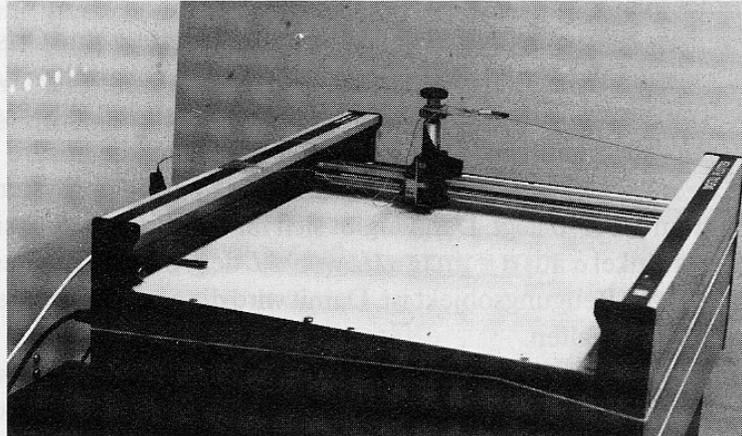


Abb. 6: Plotter mit aufgestecktem Fototransistor zur Messung der Intensitätsverteilung in der Beugungsfigur.

4 Programmpaket

4.1 Hardware des Computersystems

Das entwickelte Programmpaket ist ausgelegt für ein Computersystem mit folgender Hardware:

- Mikrocomputer APPLE II-Plus mit 48 kByte
- 16-kByte-Erweiterungskarte
- Disk II mit Controller
- A/D-Wandlerkarte (8 Bit)
- Videomonitor oder modifiziertes Fernsehgerät
- Plotter mit Interfacekarte
- Drucker mit Interfacekarte

Die Wahl des A/D-Wandlers ist unkritisch, solange es sich um ein 8-Bit-System handelt. Da das UCSD-Betriebssystem derartige Systeme ohnehin nicht als „Volumes“ erkennt, ist es auf jeden Fall notwendig, eine Assembleroutine zu schreiben, die den Datentransfer vom A/D-Wandler in den Rechner vornimmt. Die Routine muß natürlich unter Berücksichtigung der Eigenschaften des jeweiligen Wandlers erstellt werden. Wie in Abschnitt 3 bereits erwähnt, fand im Rahmen dieser Arbeit der käufliche A/D-Wandler AI-02 Anwendung.

Hinsichtlich der Wahl des Plotters und Druckers besteht lediglich die Bedingung, daß diese Geräte über eine standardisierte Schnittstelle verfügen müssen (gleichgültig, ob paral-

lel oder seriell). Interfacekarten, die es dem APPLE II-Plus ermöglichen, mit diesen Schnittstellen zu kommunizieren, bieten zahlreiche Hersteller an. Es ist allerdings zu bedenken, daß damit nur eine elektronische Kompatibilität garantiert wird, sich jedoch verschiedene Plotter und Drucker in der Art der Steuerbefehle unterscheiden können, die ihnen über die Schnittstellen zugeführt werden müssen. Die Programmierung der Steueranweisung muß daher auf den jeweils benutzten Plotter bzw. Drucker zugeschnitten sein. Wie in Abschnitt 3 schon ausgeführt, stand uns der Plotter HILOT des Herstellers *Houston Instruments* zur Verfügung. Bei dem verwendeten Drucker handelte es sich um das Gerät 8023 b der Firma *Nippon Electronic Comp.*

4.2 Programmbeschreibung

Aufgrund des Umfangs bzw. der Komplexität der zu bewältigenden Problemstellungen erfolgte die Programmerstellung in der strukturierten Programmiersprache PASCAL. Die in Verbindung mit Mikrocomputern noch meist benutzte Programmiersprache BASIC eignet sich eher zur schnelleren Behandlung „kleinerer“ Probleme. Der Text des hier entwickelten Programmpakets umfaßt insgesamt etwa 1250 Zeilen, die untergliedert sind in 9 Segmente, 37 Prozeduren und 7 Funktionen. Der Aufbau des Programms läßt sich gut überblicken, eventuelle Änderungen wirken sich immer nur auf einzelne Programmteile aus.

Das Programm ist durchgängig „Menü- bzw. Dialog-gesteuert“, so daß keine besonderen Kenntnisse in der Bedienung des UCSD-Betriebssystems notwendig sind. Alle Benutzereingaben sind gegen Fehlbedienung abgesichert. Die Programmteile sind untereinander durch *Boole'sche* Variablen so verriegelt, daß keine Unterprogramme gewählt werden können, deren Abarbeitung nach Stand der Dinge nicht möglich oder sinnvoll sind.

Das Starten des Programms erfolgt durch Einlegen der Diskette und Anschalten des Rechners. Es erscheint ein Menü auf dem Bildschirm mit folgenden Wahlmöglichkeiten:

1. Eingabe der Versuchsparameter
2. Anzeige des momentanen Meßwertes
3. Messung der Intensitätsverteilung
4. Daten speichern
5. Daten lesen
6. Theoretische Intensitätsverteilung
7. Least Squares Fit
8. Graphik-Ausgabe auf dem Bildschirm
9. Graphik-Ausgabe auf dem Plotter
10. Daten-Ausgabe auf dem Drucker

Zu 1.: Es werden abgefragt: die Zahl N der Spalte des Beugungsobjektes, die Spaltbreite d , der Spaltabstand g und der Abstand L zwischen Beugungsobjekt und Fototransistor. Die Wellenlänge λ des einfallenden Lichtes ist am Programmanfang als Konstante definiert (Wellenlänge des He/Ne-Lasers).

Zu 2.: Dieser Programmteil ist bei der Einstellung des Arbeitswiderstandes des Fototransistors und bei der Justierung der Meßapparatur vor der eigentlichen Messung einer In-

tenitätsverteilung zu wählen. Auf dem Bildschirm wird fortlaufend in Abständen von ca. 0,5 s der momentane Meßwert angezeigt.

Zu 3.: Mit diesem Programmteil kann die Messung einer Intensitätsverteilung durchgeführt werden. Der vom Rechner angesteuerte Plotter führt den aufgesteckten Fototransistor in 2640 Schritten durch das Beugungsbild. In der kurzzeitigen Ruheposition des Transistors nach jedem Schritt werden vom Rechner 10 Meßwerte aufgenommen und deren Mittelwert festgehalten. Diese Art der Messung wurde vorgesehen, um kurzzeitige Schwankungen der Meßwerte zu mitteln. Solche Fluktuationen traten mit einem relativen Ausmaß von bis zu 10% auf. Sie haben ihre Ursache hauptsächlich in entsprechenden Schwankungen der Lichtemission des Lasers, die wiederum auf Instabilitäten in dessen Betriebsbedingungen zurückzuführen sind. Der Transistor wird etwa in einer Minute über den gesamten Aussteuerungsbereich des Plotters in x -Richtung bewegt.

Zu 4.: Programmteil zum Abspeichern von Daten auf der Diskette.

Zu 5.: Programmteil zum Einlesen von Daten von der Diskette in den Rechner.

Zu 6.: Dieser Programmteil berechnet die theoretische Intensitätsverteilung für die eingegebenen Versuchsparameter. Zunächst schätzt das Programm aus der relativen Lage und Intensität des größten und zweitgrößten Maximums in der gemessenen Verteilung selbst die Spaltbreite d und den Spaltabstand g ab. Diese Prozedur ist hilfreich, wenn nur relativ unsichere Informationen über diese Versuchsparameter vorliegen. Sodann ist endgültig zu entscheiden, für welche Parameterwerte die theoretische Intensitätsverteilung berechnet werden soll. Zum Vergleich dieser mit der gemessenen Verteilung werden beide im zentralen Maximum auf 1 normiert und übereinandergelegt. In dieser Form können beide Verteilungen gleichzeitig entweder graphisch oder tabellarisch ausgegeben werden; natürlich ist aber auch eine getrennte Ausgabe möglich.

Zu 7.: Dieser Teil des Programmpakets nimmt, ausgehend von den eingegebenen Versuchsparametern, eine Anpassung der theoretischen an die gemessene Intensitätsverteilung unter Variation der Spaltbreite d und des Spaltabstandes g vor. Als „beste“ Anpassung wird diejenige gesucht, bei der die Summe der Quadrate der Abweichungen der Meßwerte von den jeweils entsprechenden theoretischen Werten ein Minimum ist. Dabei sind die gemessene Verteilung und die nacheinander berechneten theoretischen Verteilungen im zentralen Maximum jeweils auf 1 normiert. Abhängig von der Art des Beugungsobjektes und dem Satz der Startparameter dauert eine solche Anpassungsprozedur etwa eine halbe bis mehrere Stunden; sie wird sich daher in einer Unterrichtsstunde nur selten durchführen lassen.

Zu 8.: Programmteil zur graphischen Darstellung von Daten auf dem Bildschirm. Jede gemessene oder berechnete Intensitätsverteilung liegt im Rechner zunächst in Form von 2640 Wertepaaren vor. Da der benutzte Rechner Apple II-Plus jedoch nur eine Bildschirmauflösung von 280 x 192 Bildpunkten besitzt, wird die darzustellende Verteilung durch Bildung des Mittelwerts von jeweils 10 Meßwerten auf 264 Datenpaare reduziert. Diese Verteilung wird im zentralen Maximum auf 1 normiert und unter Ausnutzung der gesamten Bildschirmhöhe abgebildet.

Zu 9.: Dieser Programmteil dient zur graphischen Darstellung von Daten auf dem Plotter. Die Abbildung einer Intensitätsverteilung erfolgt in der gleichen Weise, wie zu Programmteil 8 erläutert, und zwar unter Ausnutzung der gesamten Zeichenfläche des Plotters.

Zu 10.: Dieser Programmteil ermöglicht die Ausgabe von Daten in tabellarischer Form.

5 Untersuchungsbeispiele

Im folgenden werden einige Ergebnisse der Untersuchung von Beugungsphänomenen mit den beschriebenen Hilfsmitteln wiedergegeben. Als Beugungsobjekte wurden ein verstellbarer Spalt sowie die Mehrfachspalte auf der Blende 08577.01 und das Gitter 08540.00 (10 Striche/mm) der Firma *Phywe* verwendet. Die Blende besteht aus einer Glasplatte, auf der die Spaltsysteme durch geeignete Beschichtung erzeugt sind. Bei dem Gitter handelt es sich um eine fotografische Gitterkopie auf einem Diapositiv. Mit Hilfe einer unmittelbar vor das Gitter gesetzten verstellbaren Spaltblende wurden Spaltsysteme mit verschiedener Spaltenzahl N ausgeblendet. Darüber hinaus wurde auch mit fotografischen Mehrfachspalt- und Gitterkopien experimentiert, die von *G. Koppelman* an der Technischen Universität Berlin hergestellt worden sind [5].

Beugungsobjekte lassen sich nur in mehr oder weniger guter Näherung mit den in der Beugungstheorie vorausgesetzten idealen Eigenschaften herstellen. Weder verschwindet die Lichttransmission durch die Spaltöffnungen an den Spaltkanten ideal sprunghaft, noch sind Spaltsysteme mit streng periodischen Konturen verfügbar. Insbesondere mit den nicht sehr hochwertigen fotografischen Kopien von Spaltsystemen, wie sie meist in der Schule zur Verfügung stehen, treten in erheblichem Maße Abweichungen von diesen idealen Voraussetzungen auf. Man kann sich davon durch Betrachtung der Beugungsobjekte unter einem Mikroskop geeigneter Vergrößerung leicht überzeugen.

Es hängt daher von der Qualität der Beugungsobjekte ab, inwieweit die erzeugten Beugungsbilder sich noch in Übereinstimmung mit der unter idealen Voraussetzungen aufgestellten Beugungstheorie erweisen. Insbesondere bei Mehrfachspalten kann der reale Verlauf der Lichttransparenz in den sich abwechselnden Spalten und Stegen zu Intensitäten in den Beugungsmaxima führen, die von den theoretischen Erwartungen abweichen [5]. Je nach Beugungsobjekt nimmt beim Übergang von Spaltöffnung zu einem Steg die Lichttransparenz in einem mehr oder weniger breiten Grenzbereich stetig ab. Daher lassen sich auch mit Hilfe eines Mikroskops mit kalibriertem Meßokular die für die Struktur der Beugungsbilder maßgebenden „effektiven“ Spaltbreiten bzw. Spaltabstände der Beugungsobjekte nur näherungsweise bestimmen. Entsprechend zeigte sich, daß mit den auf diese Weise für die verwendeten Spalte und Mehrfachspalte ermittelten Parameterwerten meist nur eine grobe Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Intensitätsverteilungen der jeweiligen Beugungsbilder erhalten wurde.

Durch versuchsweise Abwandlung der Parameterwerte unter Orientierung an den diesbezüglichen Abschätzungen, die vom Programmteil 6 anhand der Meßwerte vorgenommen werden, konnten dann jedoch im allgemeinen schnell Parametersätze gefunden wer-

den, die zu einer wesentlich besseren Übereinstimmung zwischen Experiment und Theorie führten. Die Übereinstimmung ließ sich schließlich mit dem Programmteil 7 noch weiter systematisch optimieren. Diese letztere Prozedur wird sich allerdings im Unterricht aus Zeitgründen nicht immer durchführen lassen; für sie besteht aber auch nicht unbedingt eine sachliche Notwendigkeit, da man schon in der vorgenannten Weise zu ausreichend überzeugenden Ergebnissen gelangt.

In den Abb. 7-10 sind als Beispiele gemessene Intensitätsverteilungen für die Beugung an einem Einzel-, Doppel- und Dreifachspalt sowie an einem Spaltsystem mit $N=6$ Spalten

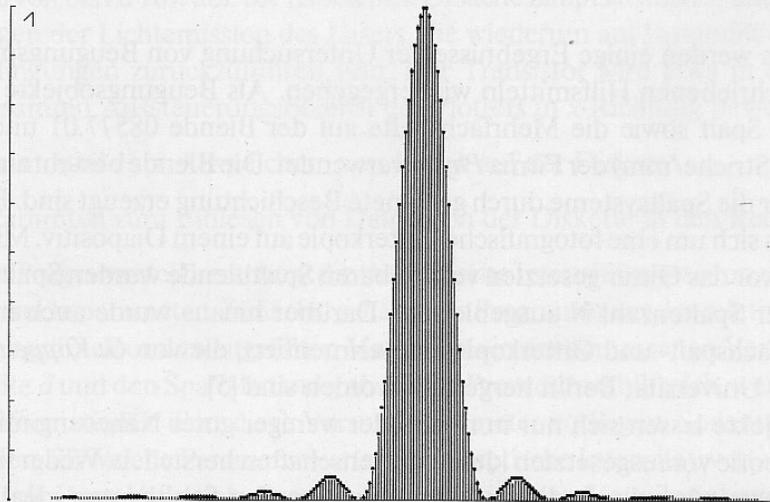


Abb. 7: Gemessene (ausgezogene Strecken) und angepaßte theoretische (Punkte) Intensitätsverteilung in der Beugungsfigur eines verstellbaren Spaltes. Die Entfernung des Fototransistors vom Spalt betrug $L=2,11$ m. Die Anpassung der theoretischen Verteilung ergab eine Spaltbreite von $d=60,3$ μm .

wiedergegeben und auch die entsprechenden theoretischen Verteilungen eingetragen. Die gemessenen Werte wurden durch Strecken senkrecht zur x -Achse dargestellt, die theoretischen Werte als Punkte. Letztere wurden jeweils mit den in den Legenden der Abbildungen angegebenen Parameterwerten berechnet. Diese ergaben sich aus der Anpassung mit Hilfe des Programmteils 7, folgten aber bis auf wenige Prozent Abweichung auch schon aus der Analyse der Meßwerte mit dem Programmteil 6. Im übrigen sind diese Parameterwerte auch verträglich mit den entsprechenden Daten, die bei Untersuchung der jeweiligen Beugungsobjekte mit dem Meßmikroskop abgeschätzt wurden.

Die Abbildungen zeigen, daß infolge der begrenzten Intensitätsauflösung der Meßapparatur die Untersuchungsmöglichkeiten beschränkt sind auf Bereiche der Beugungsbilder mit relativ niedriger Beugungsordnung. Hier wird allerdings eine gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment erzielt. Im Bereich höherer Beugungsordnungen reicht die Intensitätsauflösung nicht mehr aus, um die intensitätsschwachen Maxima noch maßstabgetreu bzw. überhaupt noch registrieren zu können. Bei Mehrfachspalten mit größerer Spaltenzahl gilt dies auch für die jeweils zwischen den Hauptmaxima gelegenen intensitätsschwachen Nebenmaxima. Darüber hinaus ist hier auch die durch die end-

liche Apertur des Fototransistors gegebene Ortsauflösung nicht mehr ausreichend, um die Nebenmaxima noch räumlich aufzulösen, vgl. Abb. 10.

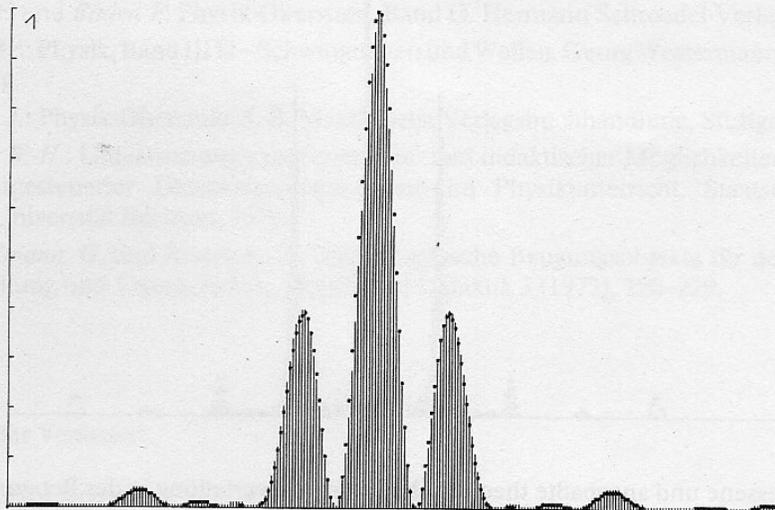


Abb. 8: Gemessene und angepaßte theoretische Intensitätsverteilung in der Beugungsfigur eines Doppelspalt. Die Beugungsfigur wurde mit dem durch die Parameterwerte „ $d=0,05$ mm, $g=0,1$ mm“ gekennzeichneten Doppelspalt auf der Blende mit Mehrfachspalten 08577.01 der Firma *Phywe* erzeugt. Die Entfernung des Fototransistors vom Doppelspalt betrug $L=4,27$ m. Die Anpassung der theoretischen Verteilung ergab für die Spaltbreite $d=53,0$ μm und für den Spaltabstand $g=98,9$ μm .

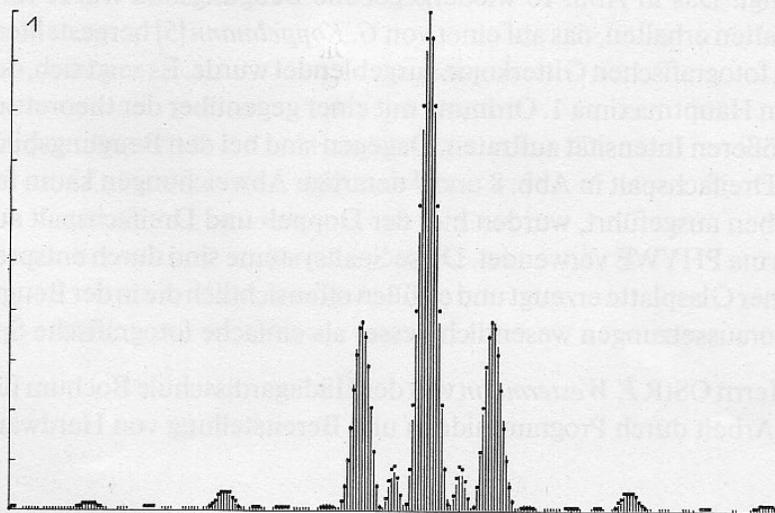


Abb. 9: Gemessene und angepaßte theoretische Intensitätsverteilung in der Beugungsfigur eines Dreifachspalt. Die Beugungsfigur wurde mit dem durch die Parameterwerte „ $d=0,05$ mm, $g=0,1$ mm“ gekennzeichneten Dreifachspalt auf der Blende mit Mehrfachspalten 08577.01 der Firma *Phywe* erzeugt. Die Entfernung des Fototransistors vom Beugungsobjekt betrug $L=3,60$ m. Die Anpassung der theoretischen Verteilung ergab für die Spaltbreite $d=52,2$ μm und für den Spaltabstand $g=98,8$ μm .

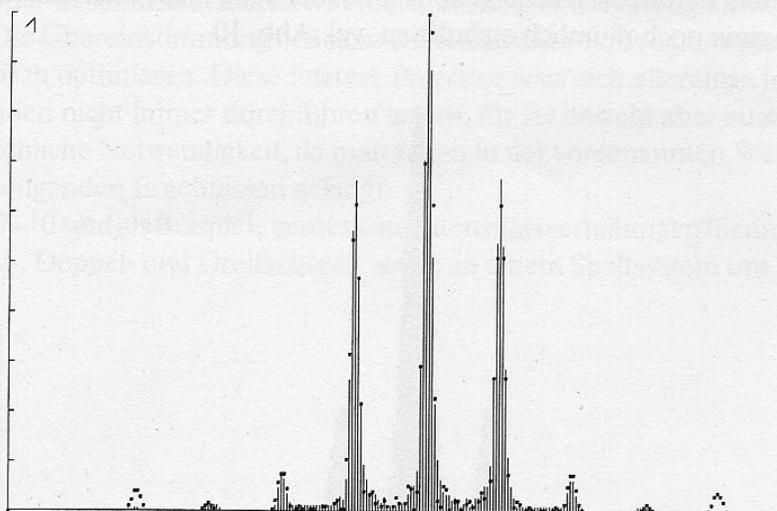


Abb. 10: Gemessene und angepaßte theoretische Intensitätsverteilung in der Beugungsfigur eines Mehrfachspaltes mit $N=6$ Spalten. Das Spaltensystem wurde auf einer von *G. Koppelman*[5] hergestellten fotografischen Gitterkopie ausgeblendet ($d \approx 50 \mu\text{m}$, $g \approx 100 \mu\text{m}$). Die Entfernung des Fototransistors vom Beugungsobjekt betrug $L=3,56 \text{ m}$. Die Anpassung der theoretischen Verteilung ergab für die Spaltbreite $d=35,0 \mu\text{m}$ und für den Spaltabstand $g=91,2 \mu\text{m}$.

Die Abb. 8–10 lassen schließlich erkennen, daß die erreichbare Übereinstimmung zwischen Theorie und Experiment von der Qualität der zur Verfügung stehenden Beugungsobjekte abhängt. Das in Abb. 10 wiedergegebene Beugungsbild wurde mit einem System aus 6 Spalten erhalten, das auf einer von *G. Koppelman* [5] hergestellten, nicht sehr hochwertigen fotografischen Gitterkopie ausgeblendet wurde. Es zeigt sich, daß in diesem Fall die beiden Hauptmaxima 1. Ordnung mit einer gegenüber der theoretischen Erwartung etwas größeren Intensität auftraten. Dagegen sind bei den Beugungsbildern für den Doppel- und Dreifachspalt in Abb. 8 und 9 derartige Abweichungen kaum festzustellen. Wie bereits oben ausgeführt, wurden hier der Doppel- und Dreifachspalt auf der Spaltblende der Firma PHYWE verwendet. Diese Spaltsysteme sind durch entsprechende Beschichtung einer Glasplatte erzeugt und erfüllen offensichtlich die in der Beugungstheorie gemachten Voraussetzungen wesentlich besser als einfache fotografische Spaltkopien.

Wir danken Herrn OStR *F. Westermann* von der Hildegardisschule Bochum für die Unterstützung der Arbeit durch Programmideen und Bereitstellung von Hardware.

Literaturangaben

- [1] *Dorn, F. und Bader, F.*: Physik-Oberstufe, Band O. Hermann Schroedel Verlag, Hannover.
- [2] *Kuhn, W.*: Physik, Band III D - Schwingungen und Wellen. Georg Westermann Verlag, Braunschweig.
- [3] *Grehn, J.*: Physik-Oberstufe. J. B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- [4] *Brand, K.-H.*: Untersuchung experimenteller und didaktischer Möglichkeiten des Einsatzes rechnergesteuerter Datenerfassungssysteme im Physikunterricht. Staatsexamensarbeit, Ruhr-Universität Bochum, 1979.
- [5] *Koppelman, G. und Rudolph, H.*: Photographische Beugungsobjekte für den Unterricht - Herstellung und Eigenschaften, Physik und Didaktik 3 (1977), 220-229.

Anschriften der Verfasser:

Prof. Dr. Manfred Bormann
Ulrich Bangert
Ruhr-Universität Bochum
Abtg. Physik und Astronomie
Universitätsstraße 150
4630 Bochum

OStRn Helene Haun
Hildegardisschule Bochum
Klinikstraße 1
4630 Bochum

Einfache Versuche zur Steuerung und Regelung mit dem Mikrocomputer

Heiner Schwarze

Anhand einführender Beispiele wird der Einsatz des Mikrocomputers bei Versuchen zur Steuerung und Regelung gezeigt. Durch diese Versuche soll der Schüler mit bekannten elektronischen Bauelementen aus schulüblichen Lehrsystemen in Verbindung mit einem Mikrocomputer Möglichkeiten der Datenaus- und -eingabe kennenlernen. Am Beispiel der Temperaturregelung wird ein Aufbau zur Eingabe analoger Meßwerte und zur Ansteuerung geschalteter Verbraucher entwickelt.

1. Der Mikrocomputer im Physikunterricht

Mit dem Vorhandensein der Mikrocomputer in der Schule entwickelten sich langsam auch Anwendungen im naturwissenschaftlichen Unterricht der anfangs vorwiegend für den Einsatz im Mathematik- oder Informatikunterricht angeschafften Geräte. Speziell im Physikunterricht ergaben sich mehrere Anwendungsbereiche: einmal durch die Simulation physikalischer Experimente auf dem Bildschirm, dann durch den Einsatz der Geräte als Meß- und Registriersysteme, sei es als Ersatz für andere Geräte oder zur Erweiterung der vorhandenen Meßmöglichkeiten [1]. Eine weitere Anwendung ist die mit der Entwicklung der Mikrocomputer eng in Verbindung stehende programmierte Steuerung und Regelung, die zum außerschulischen Erfahrungsbereich der Schüler eine recht enge Beziehung hat. Die Schüler wissen auf der einen Seite vom Einsatz eines Mikroprozessors in manchen Haushaltsgeräten, im Telefon und in der Autoelektronik. Auf der anderen Seite vermittelt der Computer in der Schule sowohl vom Äußeren wie von den Einsatzbereichen ein völlig anderes Bild. Der in der Sicht der Schüler mit Bildschirm und Tastatur ausgestattete Computer läßt sich nur schwer mit einem Elektroniksystem zur Steuerung einer Verkehrsampel oder einer Heizungsanlage vergleichen. Aus diesem Grund zielen die folgenden Überlegungen darauf hin, Schüler auf einer elementarisierten Ebene eine Einführung in die Arbeitsweise und die Anwendungen des Computers bei der Steuerung, Regelung und Nachrichtenübertragung zu geben.

Eine Einbindung dieser Ziele in den Physikunterricht führt zu weiteren Forderungen bei der Auswahl der Unterrichtsthemen. So sollen die Vorkenntnisse der Schüler über die Eigenschaften elektrischer und elektronischer Bauelemente aufgenommen und bei den Problemlösungen angewendet werden. Neben anderen methodischen Aspekten bei der Themenauswahl kann in vielen Fällen nur in einem eng begrenzten zeitlichen Rahmen ein derartiges Thema behandelt werden. Dies führt zu weiteren thematischen Einschränk-