

MODELLVERSUCHE ZUR BEUGUNG VON
RÖNTGENSTRAHLEN

Eine Unterrichtseinheit in Kl.13

Schriftliche Prüfungsarbeit
zur
Pädagogischen Prüfung
für das
Lehramt an Gymnasien

von
Michael Komma
Uhlandstr. 34
741 Reutlingen
1979

Ich versichere, daß die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur verfaßt wurde.

Ich bin damit einverstanden, daß die Arbeit der Zentrale für Information und Arbeitsplanung der Studien-seminare in Flensburg gemeldet wird.

Reutlingen, den 17. Januar 1979

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. <u>Einleitung</u>	1
2. <u>Grundlagen</u>	3
2.1 Gliederung	3
2.2 Unterrichtsform	4
3. <u>Arbeitsblätter</u>	6
3.1 Voraussetzungen	6
3.2 Lineares und ebenes Gitter	10
3.3 Raumgitter	14
3.4 Bragg - Reflexion	17
3.5 Modellversuch	19
3.6 Realexperiment	26
4. <u>Näheres zum Modellversuch</u>	27
4.1 Apparatur	27
4.2 Der Modellversuch als Analogieexperiment	29
4.3 Rechnungen zum Modellversuch	35
5. <u>Zusammenfassung</u>	41
Literaturverzeichnis	42

1. Einleitung

Die Beugung von Röntgenstrahlen am Raumgitter kann unter mehreren Aspekten betrachtet werden: Nachweis der Wellennatur der Röntgenstrahlen, Beugung am Raumgitter, Nachweis der Gitterstruktur von Kristallen, Anwendung in der Spektrometrie, Anwendung in der Strukturforschung. Jeder dieser physikalischen Gesichtspunkte bewirkt eine verschiedene Akzentuierung und damit Methode bei der Behandlung der Röntgenstrahlbeugung im Unterricht. In den letzten Jahren hat sich das Gewicht immer mehr zur Festkörperphysik verschoben. Dies zog um des hohen Zieles willen den Wunsch nach sich, die Behandlung der Bragg-Reflexion für die Schule methodisch neu zu formulieren. Die dazu bisher erschienene Literatur läßt sich deshalb zum größten Teil etwa so apostrophieren: Wie kompakt kann man dem Schüler die Beugung am Raumgitter vermitteln, damit noch genügend Zeit für die Millerschen Indices, das Drehkristallverfahren, das Laue-Verfahren, das Debye-Scherrer-Verfahren, Strukturfaktoren, Formfaktoren und Kristalltemperaturen bleibt? Ich habe mich deshalb bemüht zu zeigen, daß eine gewissenhafte Behandlung der physikalischen Vorgänge am Raumgitter tiefergehende Betrachtungen zur Kristallstrukturanalyse an der Schule zeitlich ausschließt.

Zum Vergleich liegen folgende Arbeiten vor ("Modellversuch" heißt: cm-Wellen werden an Reißnägeln, die auf Styroporplatten gesteckt sind, gebeugt - vgl. die Lehrbücher DORN (1) und KUHN (2)):

K.H. Dünkeloh '72 (3) schlägt einen 12-stündigen Kurs vor, der von der Natur der Röntgenstrahlen über den Welle-Korpuskel-Dualismus, den Modellversuch, die Millerschen Indices, bis hin zur Auswertung von Debye-Scherrer-Aufnahmen reicht. K.Kühn (4) hat 1975 "Einen Kurs über Röntgenphysik als Arbeitsgemeinschaft in der Klasse 13" gehalten.

W. Czech '74 (5) betrachtet Röntgen-, Elektronen- und Neutronenbeugung, der Modellversuch wird durchgeführt, und zur Auswertung von Laue-Diagrammen finden sich Arbeitsblätter (Vektorrechnung vorausgesetzt). T.H. Markl '75 (6) stellt einen 6-stündigen Kurs für interessierte Schüler dar. Für die ausschließlich theoretischen Erörterungen ist die Kenntnis der vektoriellen analytischen Geometrie erforderlich. E. Bundrück und H. Jodl sind mit zwei Artikeln (1975 und 1976) vertreten: In (7) werden in 6 Stunden mit Hilfe des Modellversuchs das Drehkristallverfahren (mit Millerschen Indices) und Gitterstrukturen behandelt. Hier ist der Modellversuch am ausführlichsten wiedergegeben, und die vorliegende Arbeit hält sich, was die Abmessungen anbelangt, an diesen Aufbau. In (8) besteht das Gitter aus in der Wellenwanne senkrecht stehenden Metallhülsen. Die Autoren empfehlen die Reihe zweidimensionales Punktgitter (8), dreidimensionales Punktgitter (7) und Anwendung (5) im Rahmen eines Festkörperphysik-Grundkurses unter dem Thema "Atomare Struktur und mechanische Eigenschaften". S. Danner '76 (9) gibt ein Beispiel zur Beugung von Laserlicht an zweidimensionalen Gittern (einschließlich Struktur- und Atomformfaktor) und betont (S.63), daß "in der letzten Stufe der didaktischen Behandlung noch der Übergang zum dreidimensionalen Gitter vollzogen werden muß". In der zum Ende des Jahres 1978 erschienenen Arbeit "Ein Vorschlag zur theoretischen Behandlung der Bragg-Reflexion im Physikunterricht" von W. Gieseke (10) werden schließlich spezielle Fälle der Röntgenbeugung wiedergegeben.

Die vorliegende Unterrichtseinheit wurde im Dezember 1978 in zwei Parallelklassen des J. Kepler-Gymnasiums in Reutlingen gehalten. Vor allem Aussagen zur benötigten Zeit stützen sich darauf, daß auch nach entsprechender Überarbeitung in der zweiten Klasse keine Zeit eingespart werden konnte.

2. Grundlagen

2.1 Gliederung

Die Theorie der Beugung am dreidimensionalen Gitter entsteht in natürlicher Weise aus den Vorgängen am ein- und zweidimensionalen Gitter. Sie ist z.B. nachzulesen bei A. Sommerfeld I (11), E.W. SchpolSKI I (12) oder Bergmann-Schaefer III (13). Ebenso natürlich ergibt sich aus der sachlogischen Struktur des Stoffes die Gliederung des Kurses:

1. Stunde: Die Voraussetzungen Welle, Elementarwelle, Interferenz und Beugung (Wiederholung mit Betonung der dritten Dimension).
2. Stunde: Lineares Gitter und ebenes Gitter (zwei Laue-Gleichungen).
3. Stunde: Raumgitter (die drei Laue-Gleichungen, Wellenlängenselektion).
4. Stunde: Bragg-Reflexion (räumliche Reflexion im Gegensatz zur gewöhnlichen Oberflächenreflexion), Netzebenen.
5. Stunde: Modellversuch mit Diskussion (Theorie-Experiment, Fehlerquellen).
6. Stunde: Drehkristallverfahren, d.h. Übertragung auf die in der Natur vorkommenden Gitter und Wellen. (Nicht: Bremskontinuum und charakteristische Röntgenstrahlung.)

Dabei erscheint auf den ersten Blick die theoretische Vorbereitung des Modellversuches überbetont, und vom Thema ausgehend würde man vielleicht ein Verhältnis von Theorie zu Experiment wie eins zu eins erwarten. Die vorliegende Arbeit soll jedoch nur Anhaltspunkte für eine Extrapolation liefern, die zu folgendem Ergebnis führt:

Der Modellversuch ist der Bestätigungsversuch zu einer relativ komplexen Theorie (und deshalb sinnlos, wenn diese Theorie nur angedeutet wird).

Ein Ausbau des Modellversuches im Sinne der "Festkörperphysiker" würde noch mehr Theorie erfordern: Millersche Indices, Gittertypen ... (das Verhältnis von Theorie zu Experiment bliebe also gleich).

Die Feinheiten des Modellversuches (insbesondere Kohärenzbetrachtungen) lassen sich im Unterricht ebenfalls nur dann behandeln, wenn weitere Begriffe der Emission und Interferenz von Strahlung mit einiger Sicherheit zur Verfügung stehen (der Kurs wurde vor dem schriftlichen Abitur gehalten).

Da neben dem rein physikalischen Abstraktionsvermögen auch noch das räumliche Vorstellungsvermögen beansprucht wird, kann man die ersten vier Stunden kaum weiter reduzieren. (Der Einsatz von Kegel- Kugel- und Gittermodellen war deshalb eher zur Ermöglichung als zur Beschleunigung der Verständigung gedacht).

2.2 Unterrichtsform

Die Möglichkeit zur Auflockerung durch Versuche bietet sich nach der Behandlung des ebenen Gitters durch das bekannte "Regenschirmexperiment" (Blick durch Seide auf entfernte punktförmige Lichtquelle). "Bei der Herstellung eines Raumgitters für sichtbares Licht läßt uns die Kunst des Mechanikers oder die des Webers im Stich" (A.Sommerfeld (11)). Inzwischen läßt es sich jedoch mit Ultraschall herstellen (Bergmann-Schaefer III(13)) und - für die Schule wesentlich interessanter - aus Latexkügelchen zwischen geschliffenen Glasplatten (W.Gieseke (10)). Leider kann ich mir bis zur Stunde nur vorstellen, wie ein solches Gitter aus dem durch ein Stück Seide entworfenen Beugungsbild einer weißen Lichtquelle einzelne Farben auswählt. Es muß beeindruckend sein, die Bragg-Reflexion zu sehen!

Der theoretische Teil wird in Form von hektographierten Fragen bzw. Aufgaben (einschl. Lösungen) besprochen. Dies

nicht nur wegen der Zeitknappheit, sondern vor allem aus folgenden Gründen:

Ziel ist das Verständnis der Vorgänge am Raumgitter, enger: die Besonderheiten gegenüber ebenen Anordnungen wie Doppelspalt, Gitter und Kreuzgitter. Es könnte freilich die Bragg-Gleichung bekanntgegeben und im Versuch angewendet werden. Dann ist es aber fraglich, ob die charakteristischen Erscheinungen der räumlichen Interferenz erkannt werden. Andererseits ist es - wenn man konstruktiv vorgeht - ein weiter Weg von der Beugung am Doppelspalt über die Laue-Gleichungen zur Bragg-Gleichung. So ist es auch dann, wenn genügend Zeit zur Verfügung steht, nicht sinnvoll, bei jedem Detail stehen zu bleiben. Bei der Besprechung der Fragen und Aufgaben soll dieser Weg deshalb nur skizziert werden. Interessierten Schülern bleibt die Möglichkeit, anhand der Aufgaben die einzelnen Schritte nachzuvollziehen.

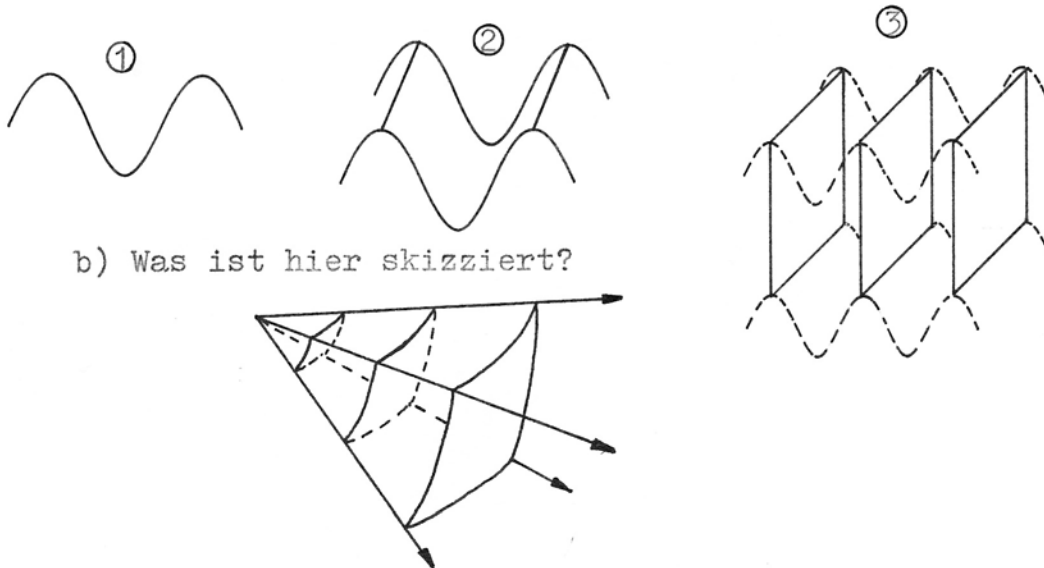
Sofern nötig, sind im nächsten Abschnitt die Aufgaben kurz kommentiert. Dies besonders dann, wenn es sich um die bewußte Verfremdung des Begriffes "Reflexion" handelt. (Zur Oberflächenreflexion und Raumreflexion siehe vor allem A.Sommerfeld (11,202): "Die reflektierte Intensität wird aus dem Inneren des Kristalls herausgeholt.")

3. Arbeitsblätter

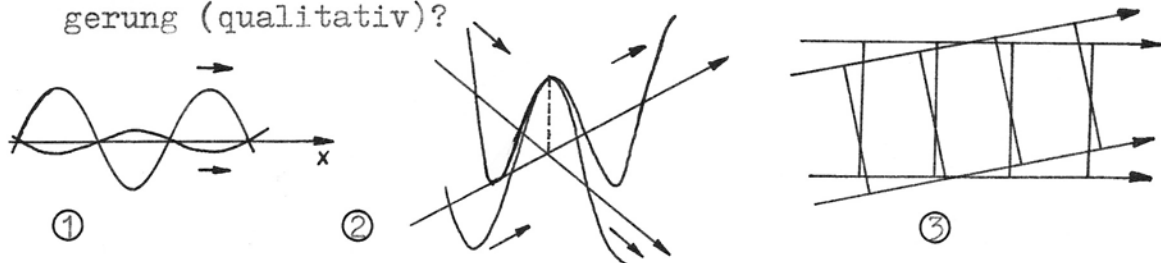
3.1 Voraussetzungen

Frage 1: Welche Erscheinungen sind für (transversale) Wellen charakteristisch?

Frage 2 (Wellenformen): a) wo ist eine ebene Welle skizziert?



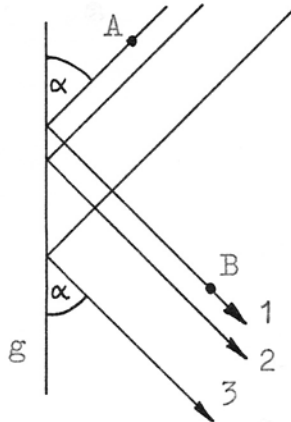
Frage 3 (Interferenz): Welche Gangunterschiede sind gezeigt, welche Phasendifferenzen gehören dazu (gleiche Fortpflanzungsgeschwindigkeiten)? Was geschieht bei der Überlagerung (qualitativ)?



Frage 4 (Beugung): Wie breiten sich die Wellen weiter aus, wie argumentiert man?



Frage 5 (Reflexion): In jedem Punkt der Geraden g denkt man sich ein Elementarzentrum, in großem Abstand zu g einen Sender:



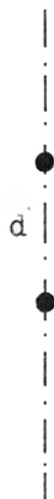
- Welche Wellenfronten gehen durch die Punkte A u. B?
- Wie groß ist der Gangunterschied der Strahlen 1,2,3 (Vom Sender bis zur Front durch B)?
- Fehlt etwas? Was?

Frage 6 (räumliche Ausbreitung): Die Elementarzentren längs g schwingen in Phase. Wie sieht die zugehörige Welle aus? Gibt es einen Zusammenhang mit Frage 5?

g

Frage 7 (Beugung): Zwei Elementarzentren im Abstand d schwingen in Phase. Wo tritt Verstärkung ein? a) Nahzone, b) in großem Abstand, beides qualitativ.

a)



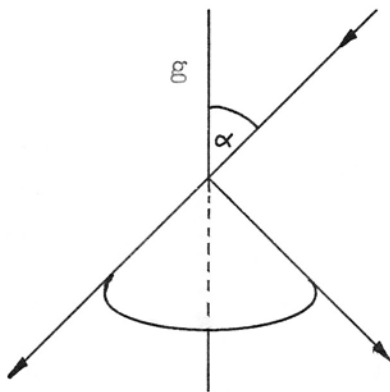
b)



(aus großer Entfernung sehen die beiden Zentren wie ein Punkt aus)

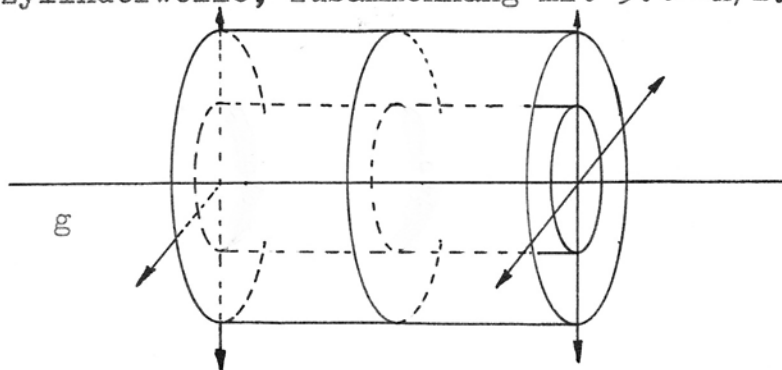
Antworten zu den Fragen 1 bis 7:

1. Interferenz, Beugung, (Polarisation). Umgekehrt erkennt man so Wellen.
2. a) In ③ wegen der ebenen Wellenfronten (andere Einordnung: ein-, zwei-, dreidimensionale Wellen).
b) Ausschnitt aus einer Kugelwelle.
3. ① : $\lambda/2 + k\lambda$ ($\pi + 2k\pi$): Schwächung längs der x-Achse;
② und ③ : $k\lambda$ ($2k\pi$) : Verstärkung in einem Punkt, bzw. in einem Gebiet.
4. Von der geradlinigen Ausbreitung abweichend. Aus der ursprünglichen Wellenfront werden Teile herausgeschnitten. Folge: neue Wellenfronten (neues Interferenzmuster). Dabei ist es für die Beugungsfigur gleichgültig, ob das Herausschneiden durch eine Öffnung oder ein Hindernis geschieht.
5. Fronten immer senkrecht zu den Strahlen, hier Ebenen. Gangunterschied reflektierter Strahlen immer Null.
c) Von den Elementarzentren gehen Kugelwellen aus. Die Strahlen verstärken sich, wenn sie mit g den Winkel α



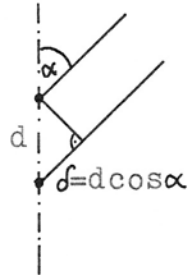
bilden: Rotationssymmetrie um g (auf dem Kegel mit Öffnungswinkel α ist der Gangunterschied 0). Die einfallenden Strahlen enden nicht in der Kegelspitze, sondern laufen auf einer Mantellinie weiter, allerdings fehlt ihnen dort die Intensität der reflektierten Strahlen.

6. Zylinderwelle, Zusammenhang mit 5: $\alpha = \pi/2$.



Antworten zu 1 bis 7, Fortsetzung :

7. Orte der Verstärkung: a) Rotationshyperboloide mit den Elementarzentren als Brennpunkten. Anzahl der Hyperboloide abhängig von d (für $d < \lambda$ nur die Symmetrieebene),



- b) Übergang zu den Asymptoten: es ergeben sich Kegel. Zu betrachten ist der Gangunterschied δ paralleler Strahlen, die z.B. am Ort eines in großer Entfernung aufgestellten Empfängers

interferieren. Verstärkung für $\delta = k\lambda$.

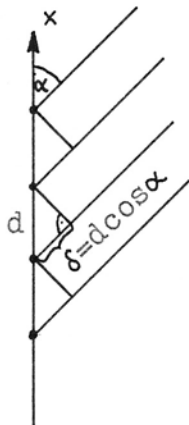
Kommentar:

Die Fragen 1 bis 4 dienen zur Wiederholung bekannter Begriffe. Neu ist die dritte Dimension und in 4 der Poisson'sche Fleck, der aber im regulären Unterricht kurz darauf behandelt wurde. Bei den Fragen 6 und 7 handelt es sich - mit Blick auf das Folgende - um lineare Gitter mit $d \ll \lambda$. Hier ist ebenfalls bekannt, daß bei der Reflexion jeder Punkt als Zentrum einer Kugelwelle angesehen wird. Weiter wird die Interferenz von zwei Kreiswellen in Frage 7 auf Kugelwellen erweitert. Mit diesen Bausteinen ergeben sich dann die in Aufgabe 1 und 2 dargestellten Verhältnisse. Man kann jedoch erst weitergehen, wenn nicht mehr Argumente wie "Die Strahlen können doch garnicht durch die Gerade durch" (Frage 5) auftauchen. Für alles Weitere ist es wesentlich, verstanden zu haben, daß die Elementarzentren - später Streuzentren - Kugelwellen abstrahlen, deren Phasenbeziehungen durch die einfallende Welle hergestellt werden.

3.2 Lineares und ebenes Gitter

Aufgabe 1: In Frage 7 (zwei Elementarzentren in Phase) werden einige Elementarzentren hinzugefügt (jeweils im Abstand $d \approx 2\lambda$, Phasenbeziehung unverändert). In welchen Richtungen liegen die Interferenzmaxima? Wann ergibt sich die Situation von Frage 6?

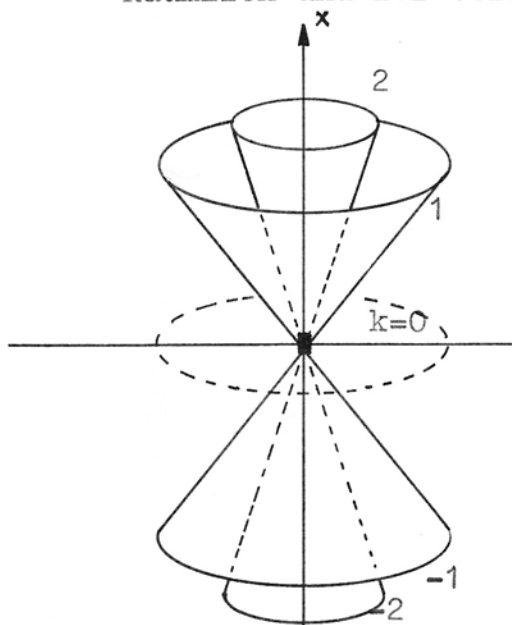
Lösung:



Betrachtung zunächst für zwei Zentren und nur auf einer Seite: Verstärkung für $d \cos \alpha = k \lambda$, also $\cos \alpha = k \lambda / d$.

Für die Strahlen, die von den übrigen Zentren ausgehen, ergibt sich jew. der gleiche Gangunterschied, d.h. sie interferieren in gleicher Weise.

Räumlich und für verschiedene k , ■: lineares Gitter :



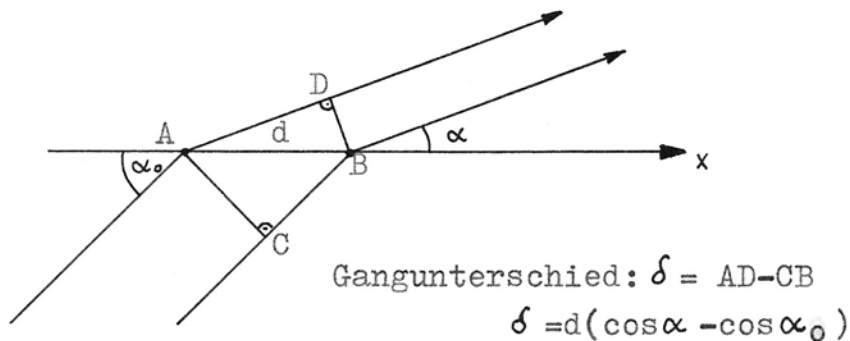
$k=0$ entspricht Frage 6; wenn $d < \lambda$, so ist nur $k=0$ möglich wegen $|\cos \alpha| \leq 1$. Außerdem: $k \in \mathbb{Z}$, $k \leq d/\lambda$. Hier also Symmetrie zu $\alpha = \pi/2$ ($k=0$), die höchste beobachtbare Ordnung $k_{\max}$ hängt von der Wellenlänge und der Gitterkonstanten - von d/λ - ab.

Kommentar: Die Anordnung unterscheidet sich von Frage 7 nur

durch die erhöhte Zahl der Zentren. Da für ein beliebiges Paar jeweils die gleichen Überlegungen bezüglich des Gangunterschiedes gelten, ändert sich α nicht. Erst in der nächsten Aufgabe wird der schräge Einfall eingeführt.

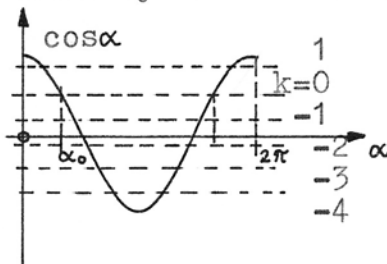
Aufgabe 2: In Frage 5 (Reflexion an einer Geraden) werden die Elementarzentren nicht mehr kontinuierlich, sondern im Abstand $d \geq 2\lambda$ angeordnet. In welchen Richtungen α herrscht Helligkeit? (Einfallswinkel wieder gegen die Gerade gemessen). Was ergibt ein Vergleich mit $\alpha_0 = \pi/2$ (Aufgabe 1)?

Lösung: Zwei Strahlen als Repräsentanten.



Helligkeit für $\delta = k\lambda$: $\cos \alpha = \cos \alpha_0 + k \lambda / d$.

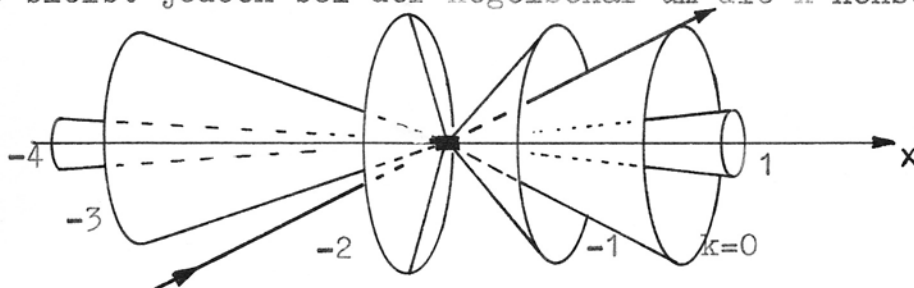
Keine Symmetrie zu $\alpha = \pi/2$, auch nicht zu α_0 .



$\cos(2\pi - \alpha_0) = \cos \alpha_0$ heißt Symmetrie zur x-Achse, bzw. Rotationssymmetrie.

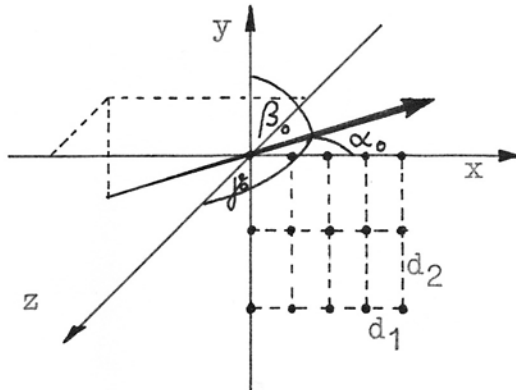
Hier ist z.B. $-4 \leq k \leq 1$, und nicht $-4 \leq k \leq 4$.

Es bleibt jedoch bei der Kegelschar um die x-Achse.



Kommentar: Durch das Auseinanderziehen der Streuzentren entstehen neue Interferenzmaxima ($k \neq 0$). So gelangt man von der Strahlenoptik (Austrittswinkel = Eintrittswinkel) zur Beugung, und die gewöhnliche Reflexion wird zum Spezialfall. Das lineare Gitter ist der wichtigste Baustein. Zu den Laue-Gleichungen führen nun mehr geometrische Überlegungen.

Aufgabe 3 (ebenes Gitter): Die einfallenden Strahlen bilden mit der x- bzw. y-Achse die Winkel α_0 bzw. β_0 .

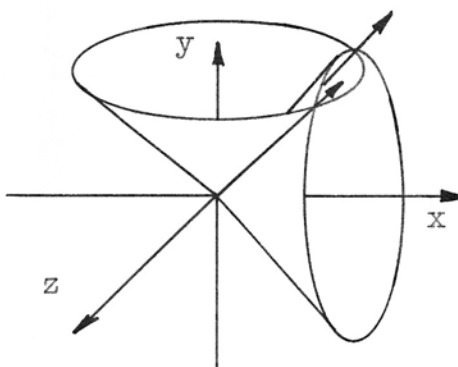


Parallel zu dem linearen Gitter auf der x-Achse (d_1) sind weitere lineare Gitter angeordnet. Es entsteht so ein ebenes Gitter. Wo liegen jetzt die Interferenzmaxima?

Lösung: Für die Gitter mit d_1 gilt wieder:

(1) $\cos \alpha = \cos \alpha_0 + k_1 \lambda / d_1$. Jedoch muß auf den Kegeln (Abstand der Achsen d_2) der Gangunterschied nicht gerade $m\lambda$ ($m \in \mathbb{Z}$) sein. Bsp.: $\beta_0 = 0, \alpha_0 = \pi/2, d = 3/2 \Rightarrow \delta = 3/2 \lambda$. D.h. durch die neu entstandenen, zur y-Achse parallelen linearen Gitter (d_2) können die ursprünglich vorhandenen Maxima wieder ausgelöscht werden. In Analogie zu (1) gilt aber:

(2) $\cos \beta = \cos \beta_0 + k_2 \lambda / d_2$, und es herrscht Helligkeit, wenn beide Bedingungen (1) und (2) erfüllt sind. Die Orte der Interferenzmaxima sind jetzt nicht mehr Kegel, sondern Schnittlinien von Kegeln mit zueinander senkrechten Achsen, also Geraden mit den Richtungen (α, β) .



$$(1) \cos \alpha = \cos \alpha_0 + k_1 \lambda / d_1$$

$$(2) \cos \beta = \cos \beta_0 + k_2 \lambda / d_2$$

Bei geg. (α_0, β_0) hat man zwei Gln. für die Variablen α, β und λ , kann also eine frei wählen ($\lambda \leq d_1, d_2$).

Eine freie Variable heißt insbesondere, daß für jedes $\lambda \leq d_1, d_2$ Interferenzmaxima entstehen.

Kommentar zu Aufgabe 3: Die Aufgabe kann im Wesentlichen durch den Analogieschluß Kegel um x-Achse $\Rightarrow$ Kegel um y-Achse gelöst werden. Dabei ist jedoch wichtig, daß durch die zweite Kegelschar nicht neue Helligkeit entsteht, sondern die Intensität nur anders verteilt wird, nämlich auf die Schnittlinien der Kegel. Es kann sich eine kurze Diskussion des Gleichungspaares anschließen, Schwerpunkt bleibt aber zunächst die Verlagerung der Interferenzmaxima von Flächen auf Geraden.

Hilfsmittel:

Zur Veranschaulichung eignen sich Pappekegel, die ineinandergesteckt werden können (vor ihrer Herstellung unternimmt man einen kleinen Ausflug in die Geometrie auf der Kugel). Am Kegelmodell kann man mit dem Finger entlang der Schnittlinie fahren, und am Kugelmodell (große Styroporkugel) erscheint der Durchstoßpunkt dieser Geraden als Schnittpunkt zweier zueinander senkrechten Breitenkreise.

Es lassen sich nun Vermutungen anstellen, wo Helligkeit entsteht, wenn man die Beugungsfigur mit einem Schirm aufhängt. Das Punktekreuz für $k_i = 0$ ist bald gefunden und wird durch die Punkte für $k_i \neq 0$ aufgefüllt. Als Bestätigungsversuch hält man ein genügend feinmaschiges Drahtnetz in den Laserstrahl. Außerdem können die Schüler den an der weißen Wand reflektierten Strahl durch ausgeteilte Seidestückchen betrachten. Mit einer punktförmig leuchtenden Glühbirne ist auch in den vorderen Bänken die Kohärenzbedingung noch erfüllt, und die Schüler sehen beim Blick durch die Seide die Richtigkeit der abschließenden Bemerkung zu Aufgabe 3.

3.3 Raumgitter

Aufgabe 4: Das ebene Gitter (d_1, d_2) wird durch Hinzufügen weiterer ebener Gitter (parallel im Abstand d_3) zum Raumgitter erweitert. Die Strahlen fallen wieder unter den Winkeln α_0, β_0 ($\gamma_0 \leq \pi/2$) ein. Was geschieht mit den Interferenzmaxima vom ebenen Gitter?

Lösung: Durch die Winkel zu den x- und y-Achsen ist bis auf Symmetrie zur x-y-Ebene auch der Winkel zur z-Achse gegeben: $\cos^2 Z + \cos^2 Y + \cos^2 X = 1$ (X, Y, Z Winkel zu den entsprechenden Achsen). Weiter ist:

$$(3) \cos \gamma = \cos \gamma_0 + k_3 \lambda / d_3 .$$

Da jedoch γ und γ_0 abhängig sind, hat man jetzt nicht drei Gleichungen für die vier Variablen $\alpha, \beta, \gamma, \lambda$, sondern drei Gleichungen für die drei Variablen α, β, λ .

Die Laue-Gleichungen

$$(1) \cos \alpha = \cos \alpha_0 + k_1 \lambda / d_1$$

$$(2) \cos \beta = \cos \beta_0 + k_2 \lambda / d_2$$

$$(3) \cos \gamma = \cos \gamma_0 + k_3 \lambda / d_3$$

beinhalten also:

$$\lambda = d_3 / k_3 (\sqrt{1 - \cos^2 \alpha - \cos^2 \beta} - \sqrt{1 - \cos^2 \alpha_0 - \cos^2 \beta_0}).$$

Schon die Vorgabe der Einfallsrichtung legt den Rest fest. Besitzen die einfallenden Strahlen nicht die passende Wellenlänge, so entstehen keine Interferenzmaxima mit $k_1 \neq 0$. Umgekehrt entstehen bei vorgegebenem λ nur Maxima, wenn man unter dem richtigen Winkel einstrahlt.

Kommentar:

Das zu den vorangehenden Aufgaben analoge Vorgehen liefert die Laue-Gleichungen. Sie können zunächst mathematisch näher betrachtet werden, wobei sich die Abhängigkeit einer Gleichung von den übrigen ergibt. Anschaulich heißt das aber nicht, daß nun die Interferenzmaxima in Punkten (im Raum) zu suchen sind, denn die Kegel haben

gemeinsame Scheitel, sondern daß sich drei Kegel auf einer Geraden schneiden müssen. (Veranschaulichung mit einem dritten steckbaren Kegel bzw. dem richtigen dritten Kreis auf der Kugel). Die Folge ist die Auswahl einer Wellenlänge, wodurch die Beugung am Raumgitter charakterisiert ist. Dies ist so grundlegend für alles Folgende, daß ich an dieser Stelle die Besprechung des Kursverlaufes durch einige Bemerkungen zu der Arbeit von W.Gieseke (10) unterbrechen möchte:

In zwei Punkten wird die vorliegende Arbeit bestätigt:

1. Die häufig angewendete formale Herleitung der Braggschen Bedingung kann eine Reihe von Fragen nicht befriedigend beantworten (283,284). Es ist deshalb angebracht, vor der Bragg-Reflexion die Laue-Gleichungen zu behandeln.
2. Arbeitsblätter sind empfehlenswert (289), wohl auch bei Gieseke z.T. wegen des Zeitmangels.

Es sind jedoch folgende Unterschiede hervorzuheben:

1. Auch Gieseke macht - wie die von ihm selbst kritisierten Autoren - erhebliche Zugeständnisse an die Strukturanalyse: "... wird die Braggsche Reflexionsbedingung benötigt" (283), "Eine Erprobung im Unterricht ergab, daß eine intellektuellbefriedigende Herleitung der Braggschen Reflexionsbedingung in der Schule mit mäßigem Aufwand möglich und sinnvoll ist." (289). Ich halte dagegen die Frage "Spektroskopie oder Strukturanalyse" für eine echte Alternative. Entscheidet man sich für das letztere, so muß man sich mit der Bekanntgabe der Braggschen Bedingung zufriedengeben.
2. Auch Gieseke "quadriert und addiert zunächst" (287) - wie die von ihm selbst kritisierten Autoren - zwei der Laue-Gleichungen, um eine "Braggsche Bedingung" zu erhalten. Gerade dieser Formalismus erscheint mir intellektuell unbefriedigend, und wie sich der mäßige Aufwand auswirkt, wird im dritten Punkt deutlich.

3. Es gibt keine "Theorie der Bragg-Reflexion in zwei Dimensionen" (Überschrift auf Seite 284), denn es gibt keine eindimensionale Ebene (allerdings hat sich die Sprechweise "lineares Gitter..." eingebürgert, und Bundrück und Jodl (8) meinen auf Seite 33 wohl auch Gitter, wenn sie in der Tabelle von ein- zwei- oder dreidimensionalen Netzebenen sprechen).

Daß die "Vorgänge in zwei Dimensionen denen in drei Dimensionen entsprechen" (284), trifft nicht zu, weil erst beim Raumgitter die λ -Selektion auftritt. Die Herleitung enthält also unzulässige Einschränkungen der Allgemeinheit (im Gegensatz zu Seite 284).

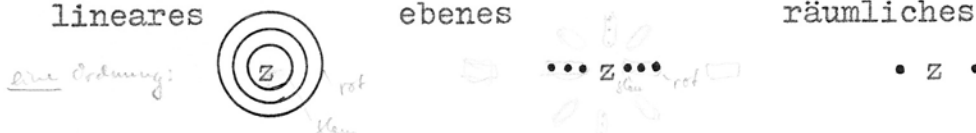
Es ist für die Problematik der Behandlung der Beugung am Raumgitter an der Schule wohl kennzeichnend, daß ausgerechnet in einer Arbeit, die sich die Verdeutlichung des Sachverhaltes zum Ziel gesetzt hat, folgender Fehler unterläuft:

Durch die Beschränkung auf zwei Dimensionen werden in den Laue-Gleichungen von vornherein die Austrittswinkel (ebenso die Eintrittswinkel) gekoppelt (285), sodaß schon in den Gleichungen (2) und (3) eine Abhängigkeit von λ von β vorgetäuscht wird. Dann ergibt sich mit dem üblichen Verfahren natürlich eine formal richtige "Bragg-sche Bedingung". Im Falle des "zweidimensionalen quadratischen Punktgitters" (284) erhält man in Wirklichkeit aber Laue-Flecke für alle zulässigen Wellenlängen, nur liegen sie außerhalb der hier vorgegebenen Ebene. Eine echte "Erweiterung auf drei Dimensionen" (289) würde also sehr wohl einen "prinzipiellen Unterschied" (289) liefern.

Dieses Charakteristikum des Raumgitters wurde deshalb, um auf den Kurs zurückzukommen, in einer Wiederholung der durchlaufenen Stufen so veranschaulicht (farbig);

z.B. z-Achse als Blickrichtung und bestimmte Laue-Flecke:

lineares ebenes räumliches Gitter

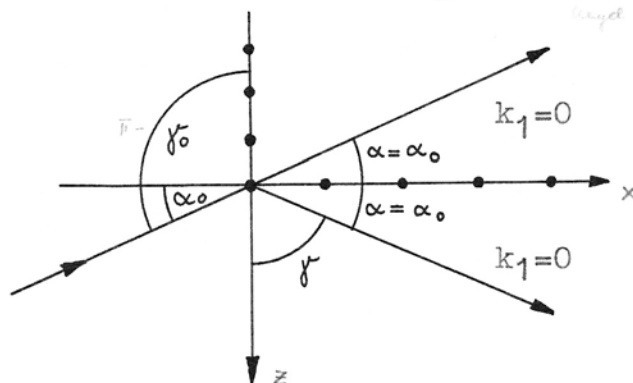
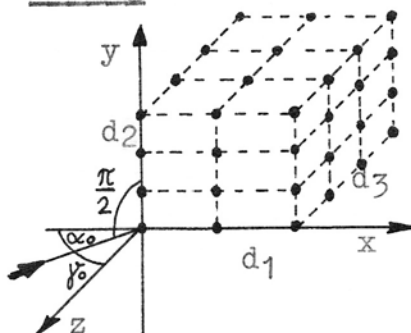


3.4 Bragg-Reflexion

Der korrekte Beweis, daß sich jeder durch ein Raumgitter erzeugte Laue-Fleck als Bragg-Reflex auffassen läßt, ist etwas umfangreicher, als der von Gieseke vorgeschlagene ("zur Verallgemeinerung ist dann λ durch $z\lambda$ zu ersetzen", 288) und findet sich z.B. bei Sommerfeld (11, S.203). Er käme auf der Schule nur in Frage, wenn man auch noch die Millerschen Indices einführen wollte. Unter Verwendung des bereits Vorhandenen wird deshalb die in der nächsten Aufgabe gegebene Hinführung vorgeschlagen.

Aufgabe 5: Parallele Strahlen fallen parallel zur x-z-Ebene ein. Man beobachtet in der x-z-Ebene. Was ergibt sich aus den Laue-Gleichungen für $k_1 = 0$?

Lösung:



bei Beob. i. d. x-z-Ebene
um was geht die x-z-Ebene
beobachtet, also
wird also $k_2 = 0$
sein u.
dann ist
auch nur
Reflexion
möglich!
 $k_2 = 0$ ist
Reflexionsbed.
?

Strahlen parallel zur x-z-Ebene und Beobachtung in dieser Ebene heißt $\beta_0 = 0$ und $\beta = 0$, also $k_2 = 0$.

$k_1 = 0$ legt in der x-z-Ebene zwei Winkel γ fest:

a) $\gamma = \gamma_0$: Primärstrahl mit $k_1 = k_2 = k_3 = 0$, wobei
 $\gamma = \pi/2 + \alpha_0$.

b) $\gamma = \pi/2 - \alpha_0$: Reflexion mit k_3 ungleich 0:

$$\cos \gamma = \cos \gamma_0 + k_3 \lambda / d_3$$

$$\cos(\pi/2 - \alpha_0) = \cos(\pi/2 + \alpha_0) + k_3 \lambda / d_3$$

$$\sin \alpha_0 = -\sin \alpha_0 + k_3 \lambda / d_3$$

$$2 \sin \alpha_0 = k_3 \lambda / d_3$$

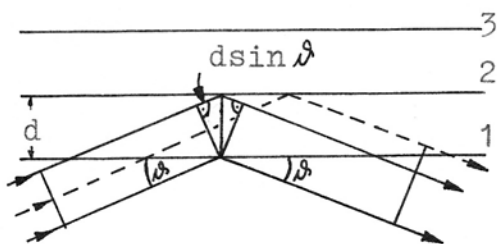
In der allgemeineren Form heißt die Gleichung

$$2 \sin \vartheta = k \lambda / d \quad \text{Braggsche Reflexionsbedingung.}$$

ϑ wird gegen die im Abstand d angeordneten ebenen Gitter gemessen und heißt Glanzwinkel.

Diskussion der Braggschen Bedingung (letztes Hektogramm):

Die Situation in Aufgabe 5 ist dadurch gekennzeichnet, daß $\alpha = \alpha_0$ ist. Jedoch handelt es sich hier nicht um eine gewöhnliche Reflexion an einer Oberfläche, sondern um eine Reflexion, die durch das Zusammenwirken mehrerer im Raum angeordneter Ebenen zustandekommt. Bei der Oberflächenreflexion ist der Gangunterschied aller Strahlen 0. Aus der Bragg-Gleichung liest man einen Gangunterschied von $2d\sin\vartheta$ ab (Verstärkung). Wie kommt er zustande?



Die an der Ebene 2 reflektierten Strahlen haben gegenüber den an der Ebene 1 reflektierten Strahlen den Gangunterschied $2d\sin\vartheta$.

Alle Strahlen, die an einer beliebigen Stelle einer Ebene reflektiert werden, haben keinen Gangunterschied zueinander. Deshalb tauchen in der Braggschen Bedingung auch d_1 , d_2 und d_3 nicht mehr auf; es kommt nur noch auf den Abstand der Ebenen an, auf denen die Streuzentren - für diese eine Reflexion - beliebig angeordnet sein dürfen. Sind die Streuzentren auf den bisher betrachteten Ebenen regelmäßig angeordnet, so ergeben sich neue Ebenen mit einem anderen Abstand (Projektion des NaCl-Modells); man bezeichnet sie als Netzebenen des Kristalls. Eine Schar paralleler Netzebenen, und damit der Abstand von Ebene zu Ebene, kann durch die Angabe der Lage einer Netzebene gekennzeichnet werden. (Skizze auf kariertem Papier).

Vergleich mit der gewöhnlichen Reflexion:

$$\left. \begin{array}{l} \vartheta = \vartheta_0 \\ 2d\sin\vartheta = k\lambda \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Reflexion} \\ \text{Bragg-Reflexion} \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} \text{ } \\ \text{ } \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{ } \\ \text{ } \end{array}$$

hier ist auch, also d.h. ist möglich (bzw.)

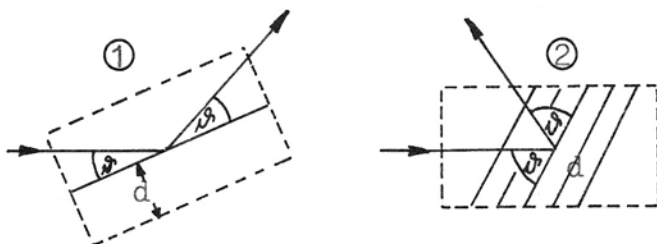
D.h. vom Raumgitter mit $d \geq \lambda$ werden nur noch Wellen mit der richtigen Wellenlänge λ unter dem Winkel $\vartheta = \vartheta_0$ reflektiert. Anwendung: a) λ -Messung (Spektrometrie) b) d-Messung (Kristallanalyse). ϑ gut meßbar!

3.5 Modellversuch

Der Versuchsaufbau wurde erläutert (hier im Abschnitt 4), wobei aus Zeitmangel das Phänomen der elektromagnetischen Wellen zurückgestellt wurde. Dies läßt sich verantworten, wenn man bedenkt, daß die Beugung eine Erscheinung ist, die allen Wellen gemeinsam ist. Man geht also davon aus, daß den Sender Wellen verlassen, die an den regelmäßig angeordneten Reißnägeln in der oben besprochenen Weise gebeugt werden.

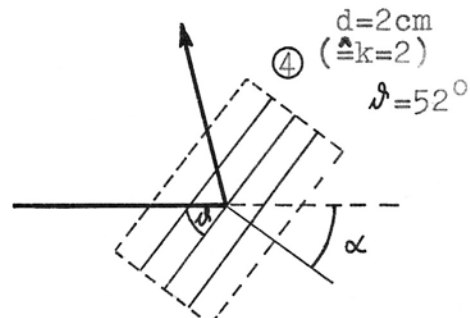
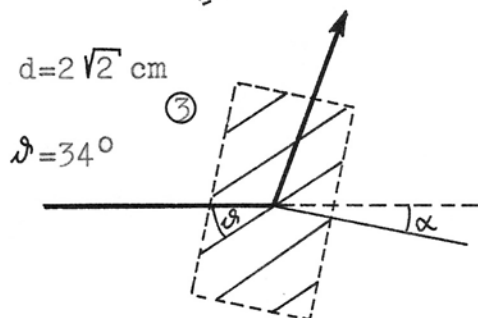
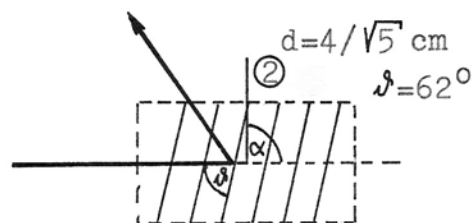
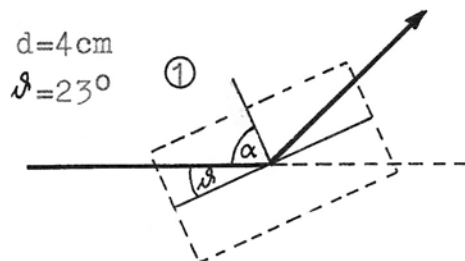
Mit dem Begriff der Netzebenen und der Bragg-Gleichung kann vor der Durchführung der Versuche die Lage der Interferenzmaxima im Intensitäts-Glanzwinkeldiagramm abgeschätzt werden. (Vereinfachende Sprechweise: "Spiegel, die bei vorgegebenem λ nur unter einem Winkel ($k=1$) reflektieren".)

Auf Folie mit verschiedenen Farben - hier verschiedenen Nummern - für verschiedene Ebenen:

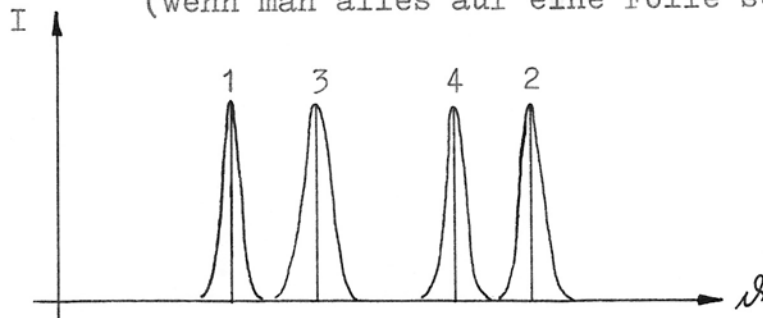


"Kleines d -
großes β ."

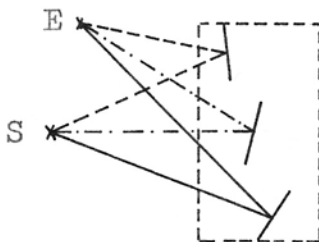
Im Modellkristall werden hauptsächlich diese Ebenen eine Rolle spielen (siehe Tabelle S.34):



Vermutung in den entsprechenden Farben an die Tafel:
(wenn man alles auf eine Folie schreibt)

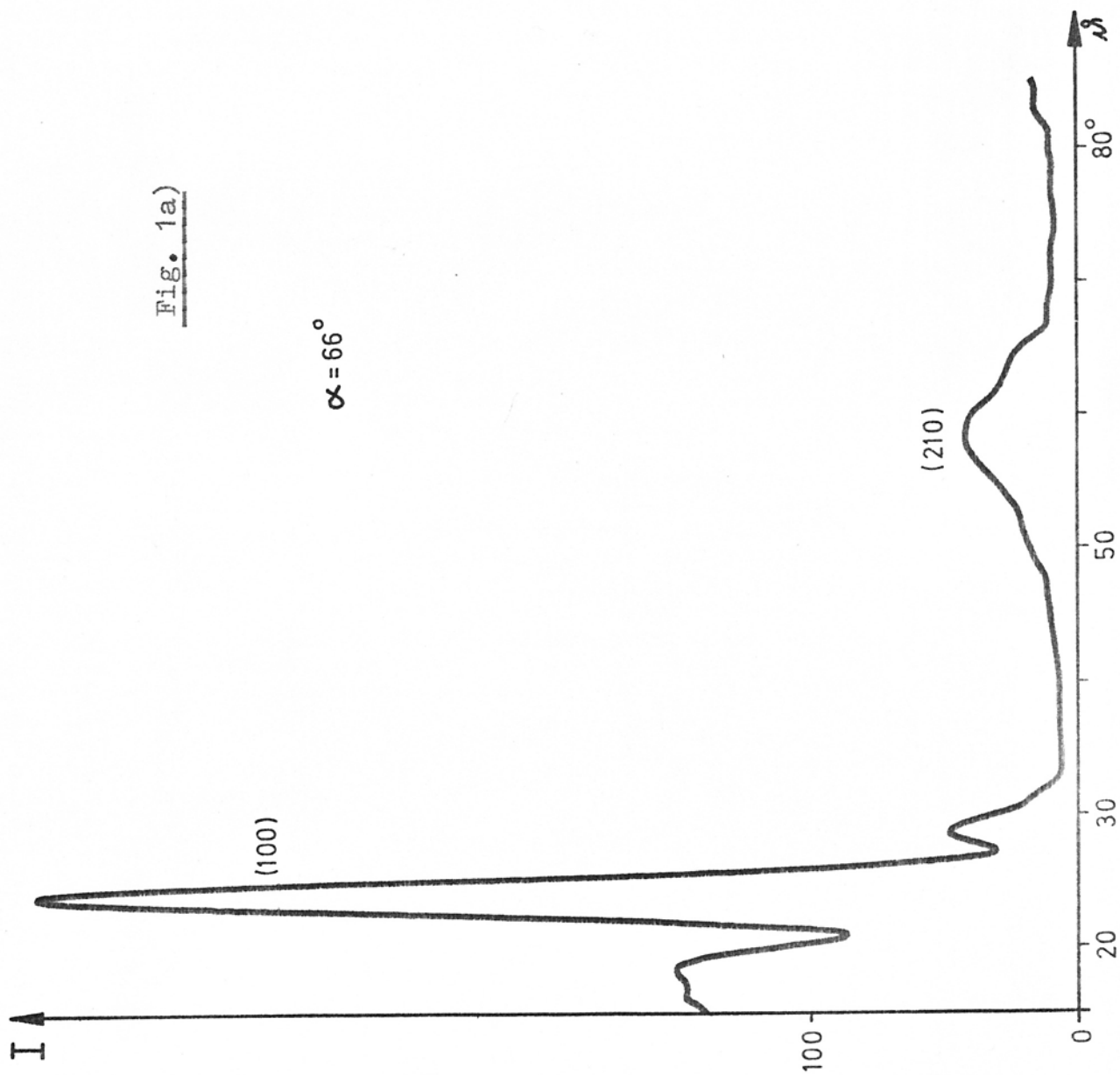


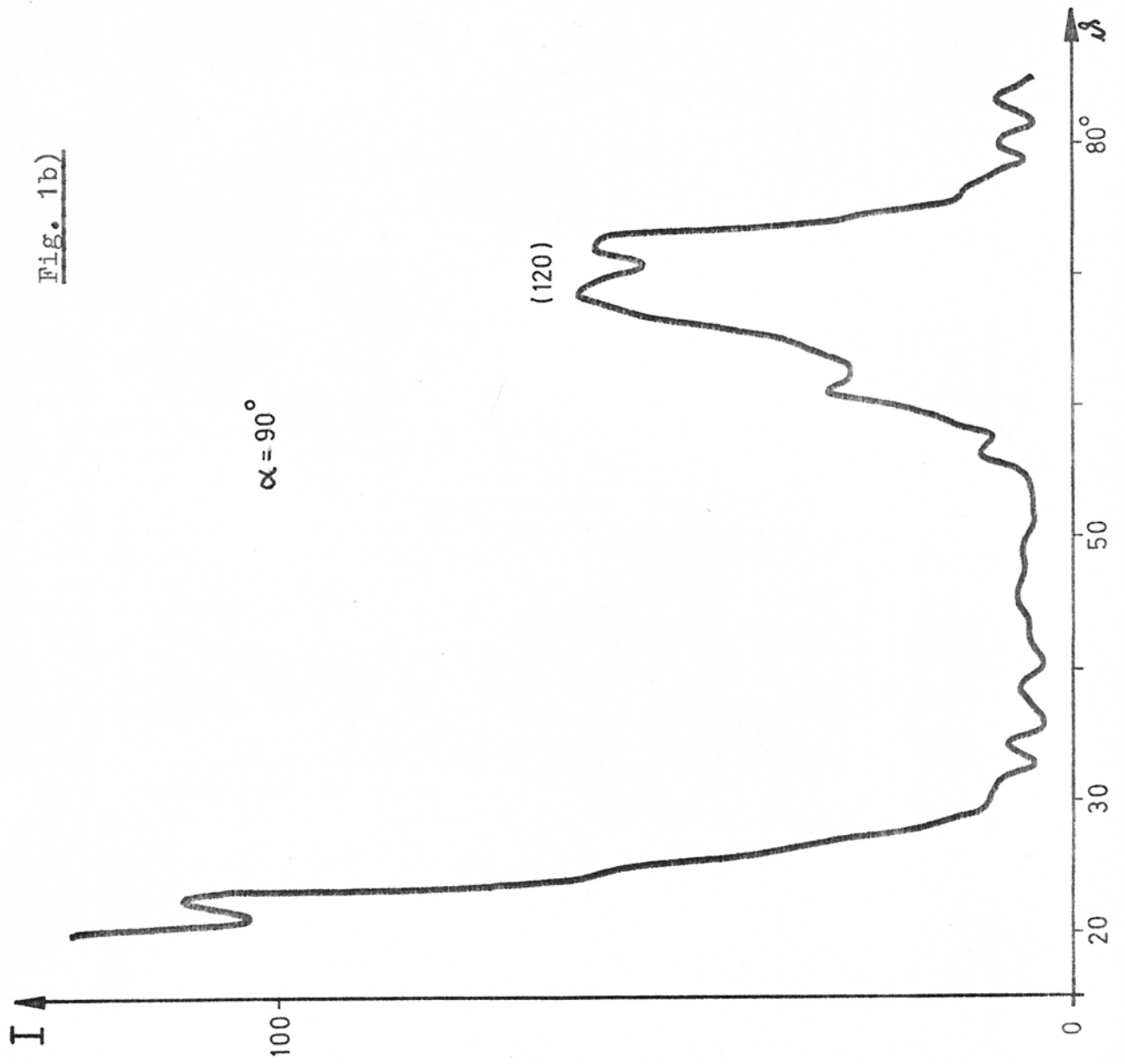
In den Figuren 1a) - 1e) sind die bei den wichtigsten Kristallstellungen aufgenommen Winkelverteilungen wiedergegeben (willk. Einh. auf der Ordinate). Eine tabellarische Zusammenstellung und eingehendere Erörterungen sind in Abschnitt 4 zu finden. Für die Diskussion im Unterricht eignen sich am besten die Winkel $\alpha = 66^\circ, 90^\circ, 5^\circ, 37^\circ$, wenn sich, wie im vorliegenden Fall, der Reflex an den (100)-Ebenen gut reproduzierbar einstellen läßt und deutlich stärker ist als der (210)-Reflex. Sonst beginnt man besser mit $\alpha = 90^\circ$, wo man es nur mit dem (120)-Reflex zu tun hat. Die Reihenfolge $90^\circ - 5^\circ - 37^\circ$ empfiehlt sich wegen: ein Maximum - zwei Maxima - ein Maximum 2.Ordnung. Der Winkel $\alpha = 55^\circ$ (Fig. 1e)) ist hier nur als Beispiel für die mögliche Mehrdeutigkeit dargestellt. Für die Schüler werden, wie oben erwähnt, die Ebenen nicht mit den Millerschen Indices, sondern mit "rot, grün, ..." bezeichnet, wobei dann (210), (120), ... wegen des gleichen Ebenenabstandes die gleiche Farbe bekommen. Das Erscheinen von mehr als einem Maximum wird qualitativ so erklärt:

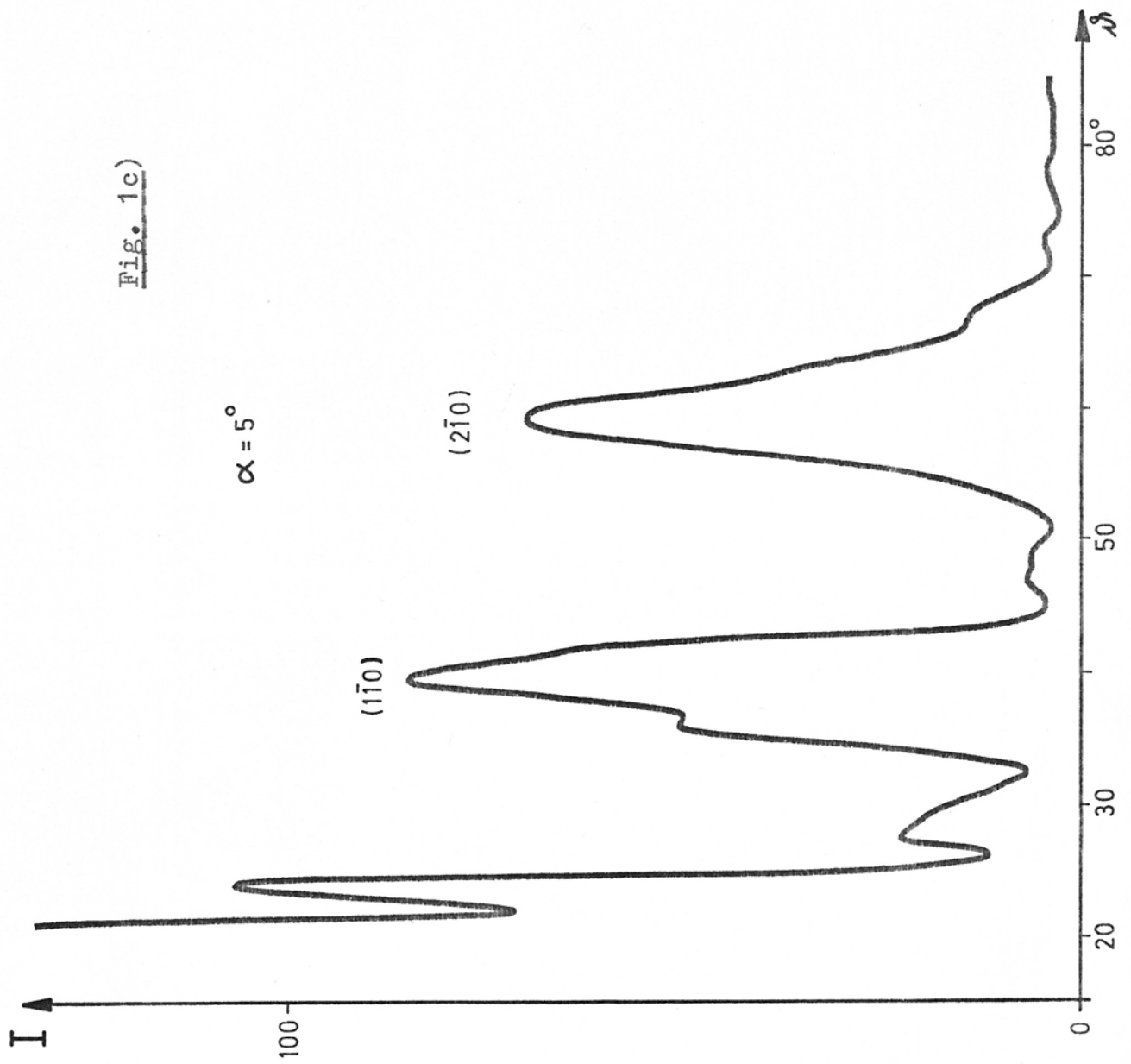


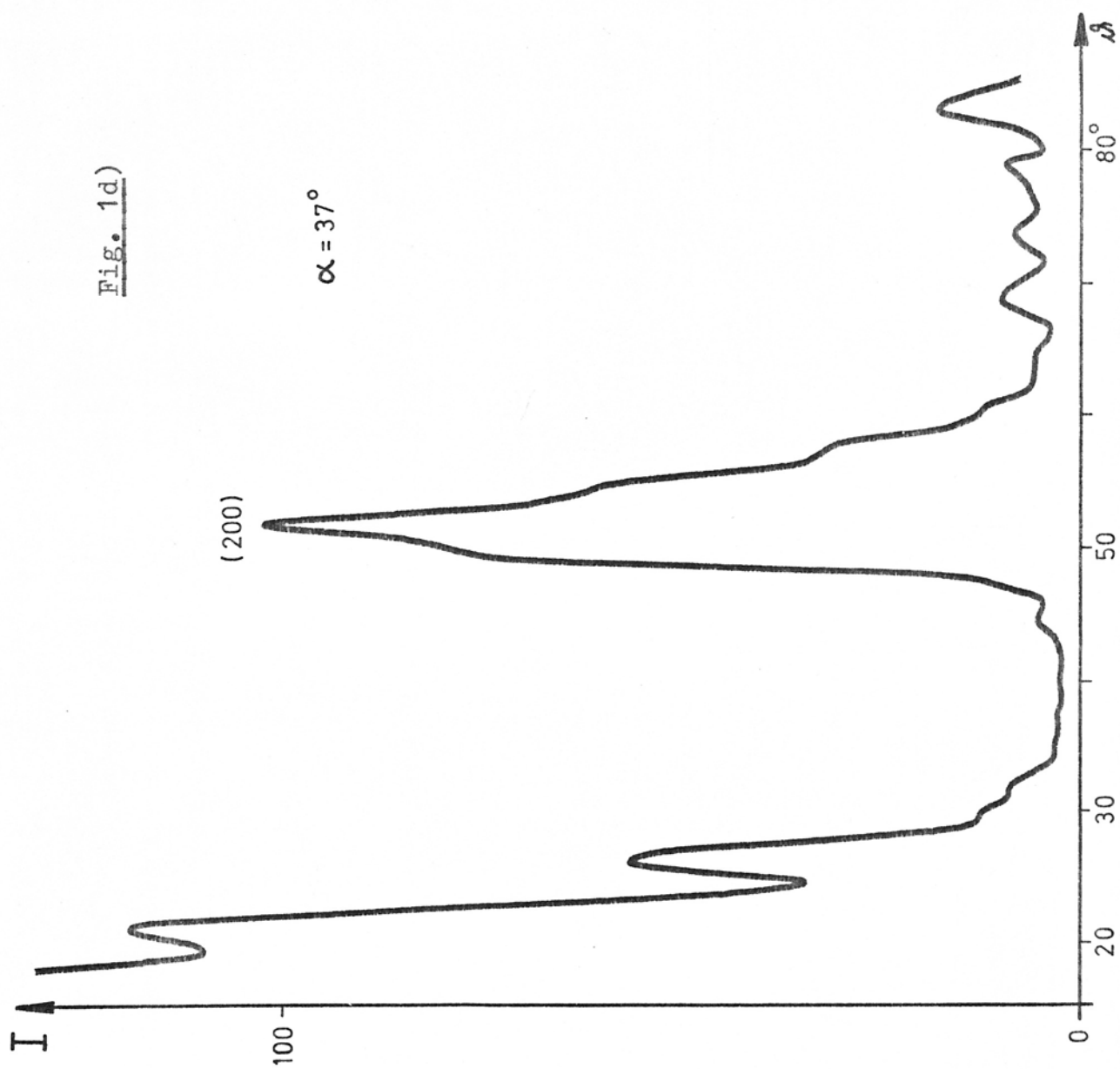
"Es können zufällig mehrere passende Spiegel vorhanden sein."

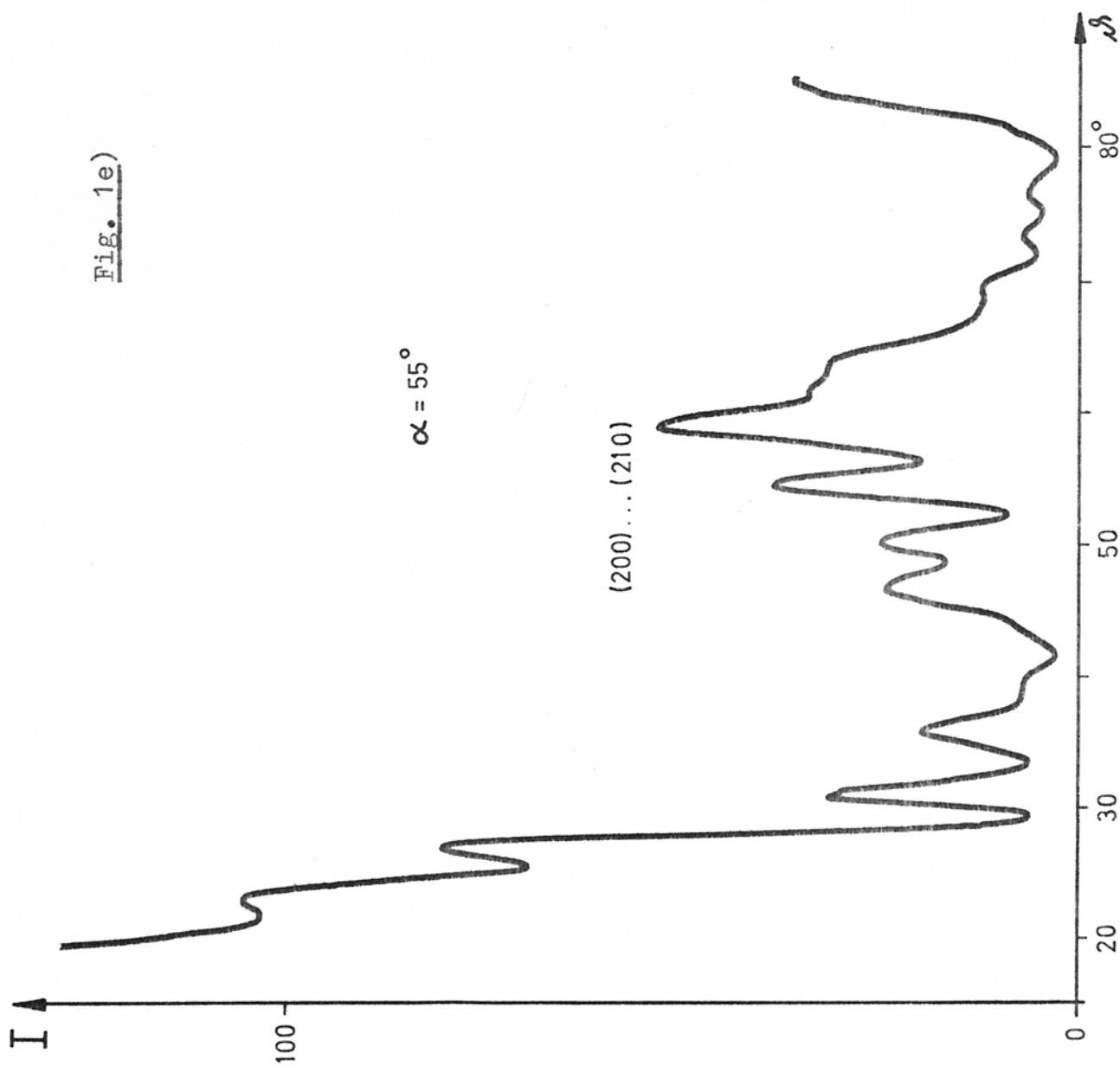
Ansonsten wird die divergente Strahlung nicht problematisiert.











3.6 Realexperiment

In der letzten Stunde wurde mit dem Leybold-Röntgen-
gerät die Bragg-Reflexion an NaCl gemessen. Abgesehen
von den grundlegenden physikalischen Unterschieden zum
Modellversuch (s.u.) sollte darauf aufmerksam gemacht
werden, daß man es jetzt mit einer Ebenenschar (200) zu
tun hat, und die Interferenzmaxima erster, zweiter und
dritter Ordnung nachweist. Außerdem bietet sich noch-
einmal die Gelegenheit, auf das Drehkristallverfahren
einzugehen.

Zur Abrundung wurde die Verwandtschaft von cm-Wellen
und Röntgenstrahlen, sprich das elektromagnetische Spek-
trum, erwähnt. Dabei wird man durch Schülerfragen bald
auf das Problem der Absorption geführt ("Warum durchdrin-
gen cm-Wellen Styropor, Licht nicht, Röntgenstrahlen aber
auch Menschen?")

Und dann sollte man noch einmal 6 Stunden zur Ver-
fügung haben, denn schließlich gibt es mehr zukünftige
Mediziner als Kristallographen.

4. Näheres zum Modellversuch

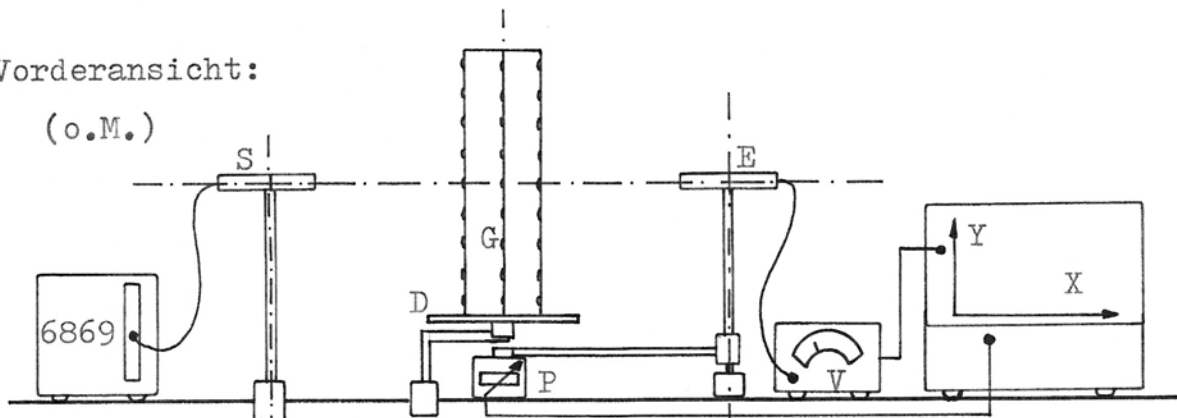
4.1 Apparatur

Es wurden folgende Geräte verwendet:

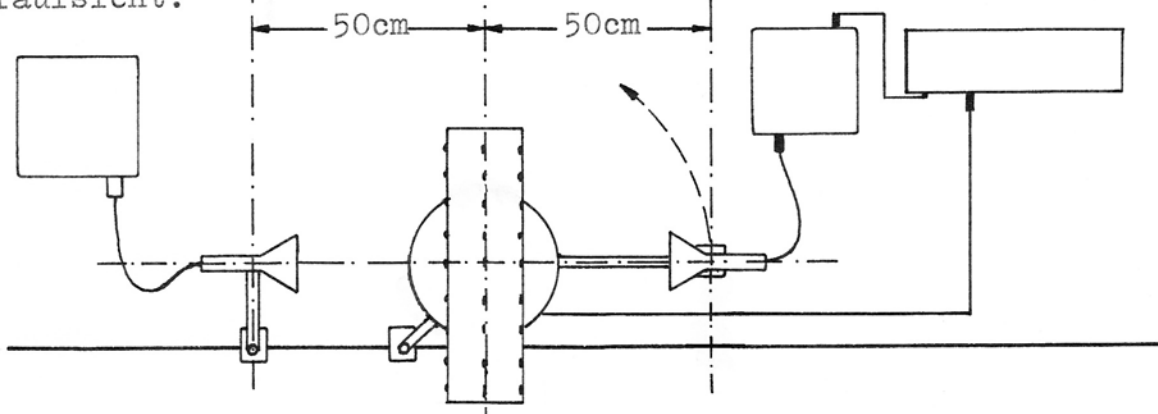
- S,E: Mikrowellensender und -empfänger von Phywe
(6860,6861, Zusatzgerät 6869), Wellenlänge: 3,17cm,
Richtungscharakteristik: ca. 30° volle Halbwertsbreite.
- V: DC-NULL-Voltmeter 419a, Hewlett-Packard als Verstärker.
- P: 100Ω - Potentiometer (linear, Kohleschicht), 2x2V-Akku (Sonnenschein) für winkelpportionale Spannung (mit Empfänger gekoppelt).
- XY: Schreiber, Linseis L800
- D: optische Scheibe mit Gradeinteilung als Drehtisch für das Gitter (Einstellung des Winkels α).
- G: Gitter, bestehend aus 3 bis 5 Styroporplatten (400x400x40) mit je 81 Reißnägeln im Abstand von 4cm. (Ab 3 Platten ändern sich Höhe und Breite der Peaks nicht mehr wesentlich.)

Vorderansicht:

(o.M.)



Draufsicht:



Da die metallenen Stativstangen und die optische Scheibe die Winkelverteilungen nicht meßbar stören, können sie beim Versuchsaufbau verwendet werden. Beschränkt man sich auf einen Abstand von 50cm (Sender-Gitter, Gitter-Empfänger), so kann die Anordnung auf einem einzigen Tisch untergebracht werden. Auch am hochkant gestellten Schreiber tritt keine Reflexion auf, solange dieser nicht unter zu kleinen Winkeln steht. Im Gegensatz zu Bundrück/Jodl (7) (im Folgenden B/J) wurde nicht ein XT- sondern ein XY-Schreiber verwendet, und die X-Richtung mit dem Spannungsteiler P angesteuert. Es entfallen so Synchronisationsprobleme und man kann - z.B. bei mehrfacher Registrierung - an beliebiger Stelle unterbrechen und die Feder anheben oder wechseln. Die Kurven werden je Kristallstellung in verschiedenen Farben auf Folie geschrieben und sind schon auf dem Schreiber auch von den hinteren Plätzen gut sichtbar; zur ausführlicheren Diskussion können sie dann projiziert werden. Die große Zeitkonstante des Voltmeters (lt. Hersteller Anzeige von 95% nach 1s) führt zu einem glatten Kurvenverlauf, siehe die Fign. 1 und 2 und im Gegensatz dazu B/J. Es ist jedoch - besonders bei hohen Peaks - angebracht, den Empfänger nicht zu schnell zu bewegen und so eine Verschiebung der Maxima zu größeren Winkeln zu vermeiden.

Für mehr Durchsichtigkeit kann ein Gitter aus leitenden Kugeln auf Perlonschnüren hergestellt werden, was aber in keinem Verhältnis zum Aufwand steht, zumal ein NaCl-Modell immer in Reichweite sein sollte. Allerdings wären dann die Streuzentren den Atomen ähnlicher, und die Brechung der cm-Wellen an den Styroporplatten würde entfallen. (Eine Styroporplatte in Längsrichtung zwischen Sender und Empfänger gestellt bewirkt eine Signalanhebung bis zu 20%.)

4.2 Der Modellversuch als Analogieexperiment

Schon vor der Durchführung des Versuches läßt sich eine ganze Reihe von Umständen aufzählen, die den Bedingungen beim Realexperiment der Röntgenstrahlbeugung widersprechen. Sofern die Voraussetzungen im LK 13₂ dafür vorhanden sind, lohnt es sich auch, dies zu erwähnen. In keinem Fall ist es richtig, die Schüler in dem Glauben zu lassen, es handele sich - wie von B/J abschließend bemerkt - "um ein Realexperiment, bei dem lediglich die Wellenlänge und die Streuzentren skalentransformiert sind". Es erscheint im Gegenteil der Hinweis wichtig, daß der Modellversuch nicht so durchführbar wäre, wenn cm-Wellen alle Eigenschaften von Röntgenstrahlen hätten. Hier die Unterschiede:

Strahlung: Abgesehen von der Wellenlänge unterscheidet sich die Röntgenbremsstrahlung von den cm-Wellen so, wie sich natürliches Licht von Laserlicht unterscheidet. Weil man es mit kohärenter Strahlung zu tun hat, kann man sich die Abmessungen des Modellversuches erlauben. (Weil man es mit polarisierter Strahlung zu tun hat, kann man sich eine Drehung des Senders/Empfängers um die Ausbreitungsrichtung nicht erlauben.)

Streuzentren: Im Gegensatz zur Atomhülle sind Reißnägelflächenhafte Gebilde, die überdies noch alle die gleiche Orientierung besitzen. Sie bieten der einfallenden Strahlung je Kristallstellung eine verschieden große Fläche und streuen schon deshalb in Vorzugsrichtungen und polarisiert. Im Gegensatz zum Festkörper befindet sich zwischen den Streuzentren noch ein Medium mit $n = 1$. Diese weniger kritischen Punkte ließen sich durch das oben erwähnte Modell verbessern. Die Überlegung zeigt aber auch, daß solche Feinheiten wie der von B/J im Modellversuch untersuchte Atomformfaktor nicht unbedingt auf die Änderung des Durchmessers der Streuzentren zurückzuführen sind. (Siehe auch S.Danner (9), S.65,67 zur klaren Tren-

nung von Strukturfaktor und Atomformfaktor.)

Geometrie: Die durch die verschiedene Entstehung der Strahlungen bedingten physikalischen Unterschiede haben ihre Folgen in den Versuchsergebnissen und somit auch in der Methode.

Im theoretischen Teil wurde die Bragg-Reflexion als Fraunhofer-Beugung behandelt, im Modellversuch wird Fresnel-Beugung praktiziert. Bei der Diskussion der registrierten Kurven muß also mindestens erwähnt werden, daß sich durch die divergente Strahlung die Lage und die Breite der Interferenzmaxima ändern kann. Wie sich das auswirkt, zeigen die Fig. 2a) bis 2c). (Diese Details sind natürlich nicht für den Unterricht gedacht.) Zunächst erkennt man das Wandern der Peaks mit der Gitterstellung α : in der $\alpha - \delta$ - Ebene müssen die Maxima auf einer Geraden mit der Steigung -1 liegen. Man sieht, daß es sich keinesfalls um diskrete Winkel handelt, wie man es vielleicht von der Braggschen Gleichung ausgehend erwarten würde. Vielmehr macht sich die endliche Zahl der Streuzentren und die einlaufende Kugelwelle in einer kontinuierlichen Verteilung mit nur schwach ausgeprägten Maxima bemerkbar.

Fig. 2a)

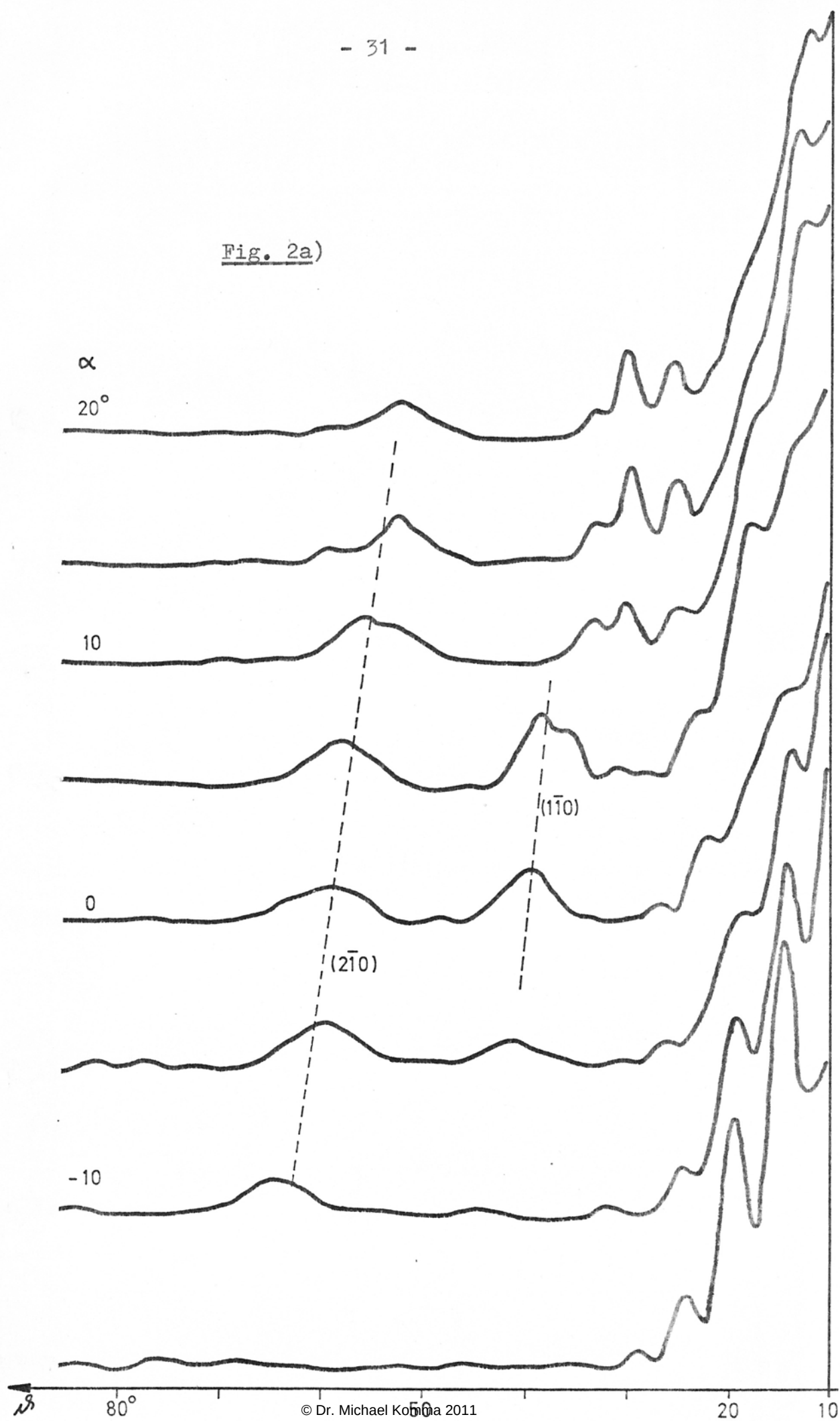


Fig. 2b)

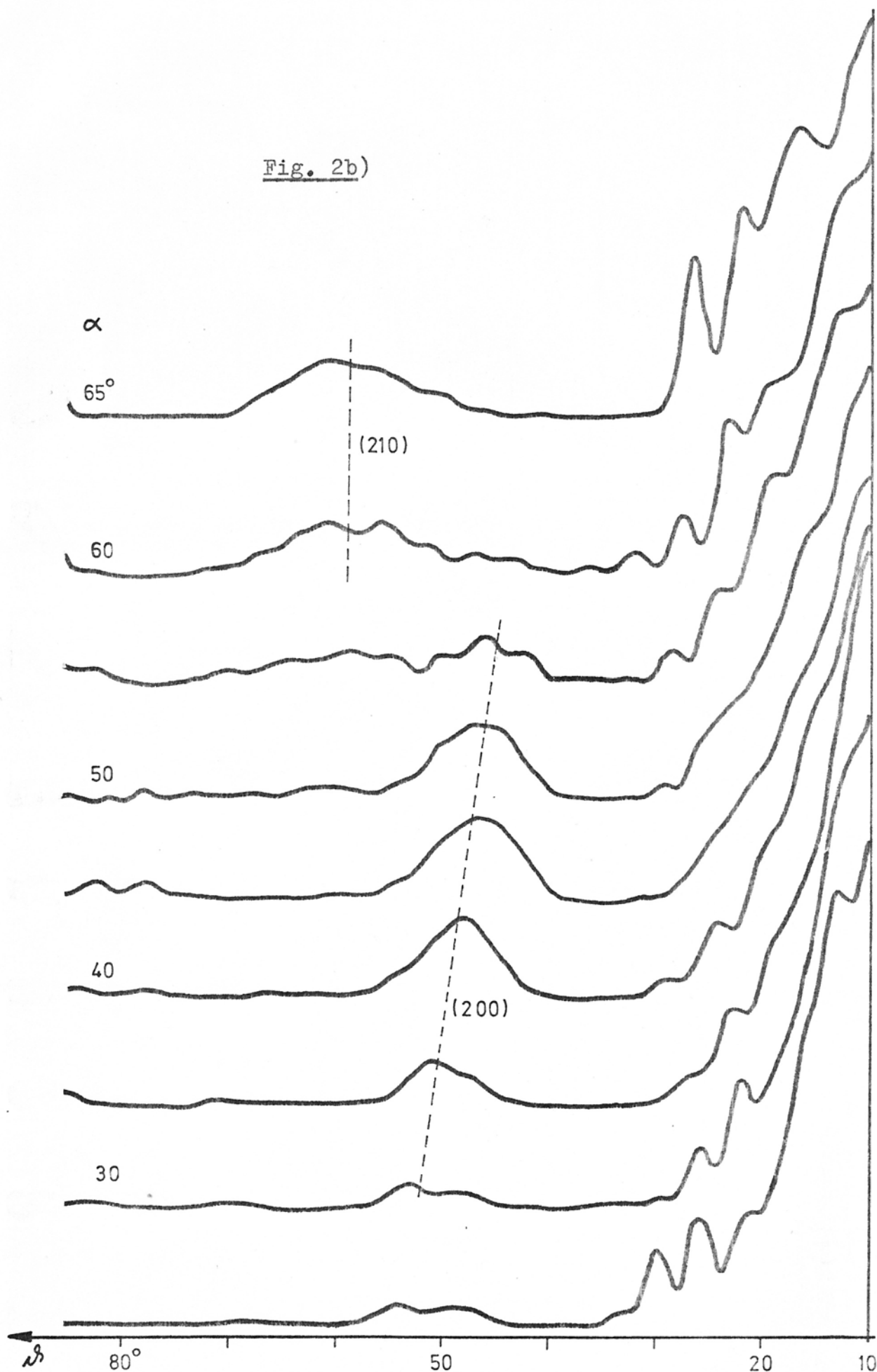
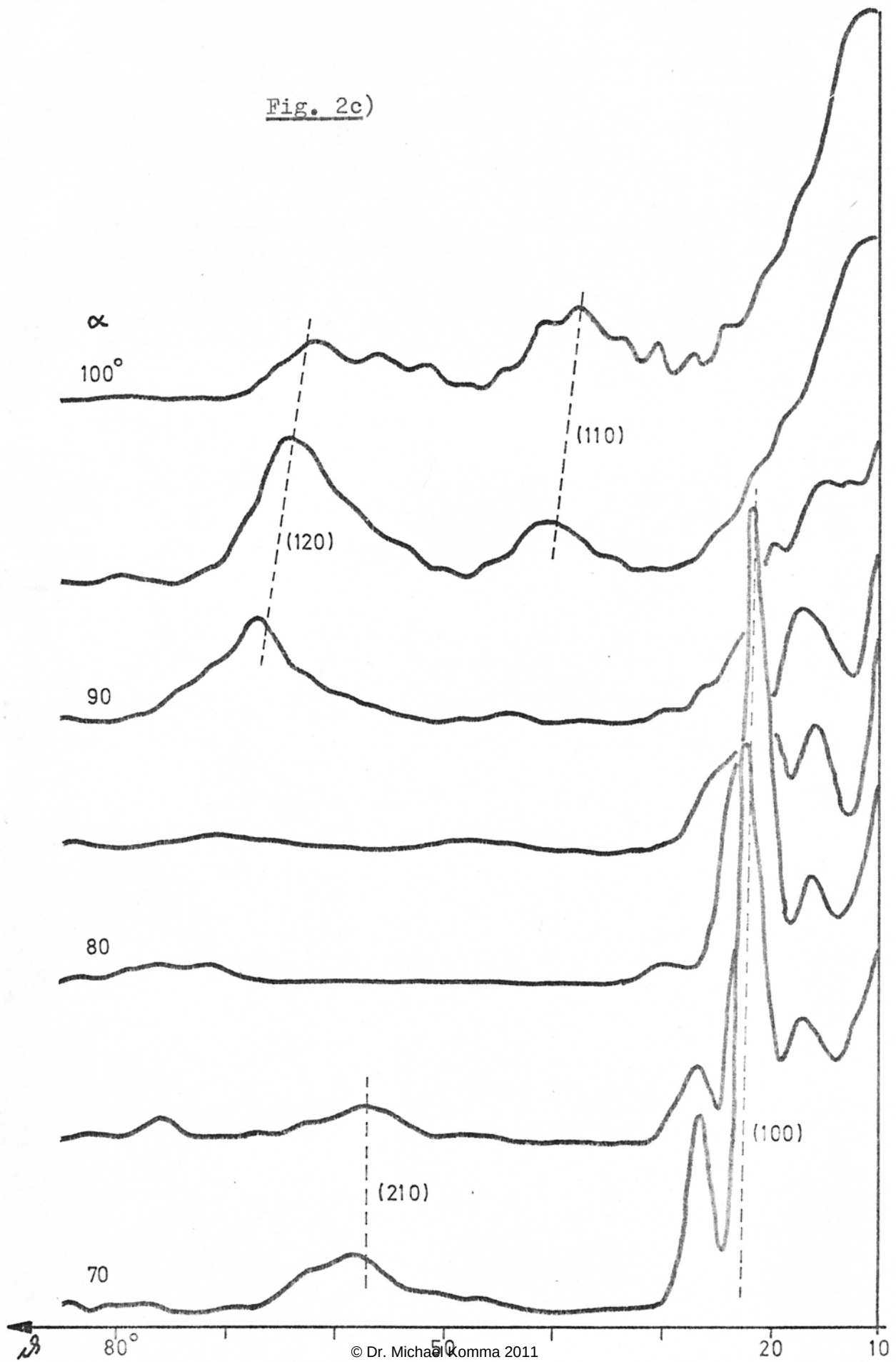


Fig. 2c)



Ebenen	(100)	(110)	(110)	(110)	(200)	(210)	(210)
$\lambda, (\lambda 500)$	23 (24)	34 (35)	34 (35)	52 (52)	62 (63)	62 (65)	62 (65)
$\alpha, (\alpha 500)$	67 (69)	11 (11)	101 (100)	38 (38)	1 (1)	54 (53)	91 (89)
$\lambda 50$	20...25	30...40	30...40	45...55	50...65	55...65	60...70
$\alpha 50$	60...80	-5...5	90...110	25...55	-10...20	55...75	85...100

Tabelle der Glanzwinkel und Gitterstellungen. Winkel in Grad; $\lambda 500$, bzw. $\lambda 50$ heißt:
 Abstand Sender-Gitter, Empfänger-Gitter jew. $s=500\text{cm}$, bzw. $s=50\text{cm}$; zu $s=500\text{cm}$ s.4.3.
 (Die Zahlenwerte für $s=500\text{cm}$ sind den in dieser Arbeit nicht wiedergegebenen umfangreichen Ausdrücken entnommen und nicht der graphischen Darstellung in den Fign. 3.)

4.3 Rechnungen zum Modellversuch

Um illustrieren zu können, ab welchen Abständen s (Sender-Gitter-Empfänger) man von Bragg-Reflexion sprechen kann, d.h. ab wann wenigstens die Geometrie des Modellversuches in die Nähe des Realexperimentes rückt, wurde die zugehörige Vielstrahlinterferenz berechnet[§] (Fig. 3a) bis 3d)).

Die Rechnung stimmt mit dem Experiment gut überein. Ebenso erscheinen für größere Abstände s die Bragg-Reflexe an den richtigen Stellen (α, λ). Es ist deshalb gerechtfertigt festzustellen, daß bei einem Abstand von ca. 2m die Divergenz der Strahlen keine große Rolle mehr spielt (vgl. Fig. 3c)). Beabsichtigt man also, mit dem Experiment möglichst nahe an der theoretischen Herleitung zu bleiben, so muß man wegen der entsprechend kleineren Raumwinkel die Senderleistung vergrößern, bzw. Störsignale sorgfältiger beachten.

Die Figuren zeigen auch, daß es Bereiche gibt, die man bei der Durchführung im Unterricht besser meiden und solche, die man bevorzugen wird. Wenn man sich nämlich bei der Diskussion der Braggschen Gleichung bemüht hat darzustellen, daß bei gegebenem λ und d Verstärkung nur bei einem λ eintritt, würde man zwangsläufig Verwirrung stiften, wenn man etwa mit $\alpha = 55^\circ$ beginnt, wo wegen der starken Verbreiterung der Peaks fast überall Verstärkung auftritt. Unter diesem Aspekt sei auch die Frage erlaubt, ob sich - wie bei B/J - eine Winkelverteilung, in der nach der Braggschen Gleichung nur ein Maximum erscheinen dürfte,

§ Für eventuelle weitergehende Untersuchungen, etwa eine größere Zahl der Zentren, andere Gittertypen, oder einfach ein anderes λ/d stehen die Fortran-Programme zur Verfügung. Sie wurden auf der PDP 11-45 des Physikalischen Instituts der Universität Tübingen erstellt.

im Experiment aber ein weiteres registriert wird, dazu eignet, das Drehkristallverfahren einzuführen.

Überhaupt liegt wohl hier die größte Verständnis-schwierigkeit: Beim Drehkristallverfahren bewegt man sich in der α - δ -Ebene auf der Winkelhalbierenden $\delta = \alpha$. Man kann somit nur die Reflexe an einer Ebenenschar beobachten (in verschiedenen Ordnungen). Dies auch nur dann, wenn man das gut kollimierte Strahlenbündel sorgfältig justiert hat.

Im Modellversuch bewegt man sich in der α - δ -Ebene auf einer Parallelen zur δ -Achse. In diesem Fall ist also die Beobachtung mehrerer Maxima möglich, sei es durch die Lage der Netzebenen an sich, oder durch die starke Verbreiterung der Peaks. (Zu vergleichen mit B/J S.191: "Das Meßverfahren entspricht dem Drehkristallverfahren beim Realexperiment", und S.193 "... jeweils feste Senderstellungen".)

In der Spektroskopie schließlich sucht man nicht d sondern λ , und gibt sich deshalb die Netzebenen vor.

Angeichts der Vielfalt der Parameter und Meßverfahren sollte deshalb an der Schule die Strukturforschung nicht zu stark betont werden. Es erscheint eher angebracht, sich auf die Verwendung des Drehkristallverfahrens in der Spektroskopie zu beschränken, und das Meßprinzip "Wellenlängenmessung durch Winkelmessung" in den Vordergrund zu stellen. Dann kommt auch - vergleichend mit den Gitterspektren der Optik - die Selektion einer Wellenlänge als besondere Eigenschaft des Raunggitters überhaupt erst zur Geltung.

Fig. 3a) $s=50\text{cm}$

Bei den Fign. 3a)-d) in der unteren Darstellung doppelter Maßstab für die Intensität I , und Schnitt bei $I=0,1$, damit die verdeckten Peaks sichtbar werden. (Orientierung der Achsen aus perspektivischen und programmier-technischen Gründen.)

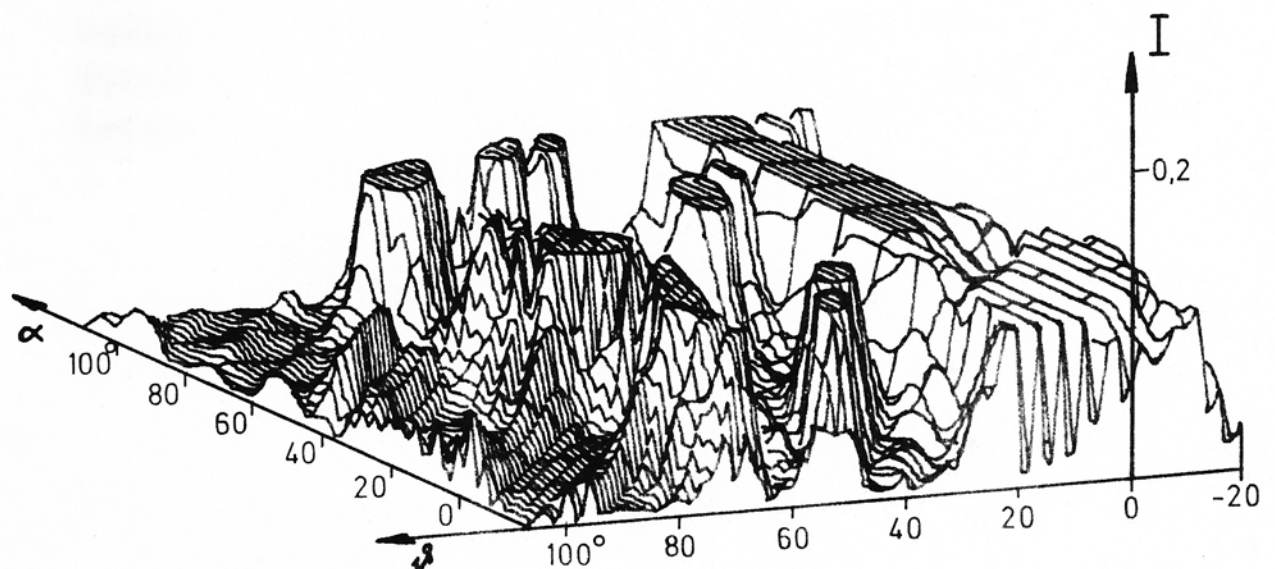
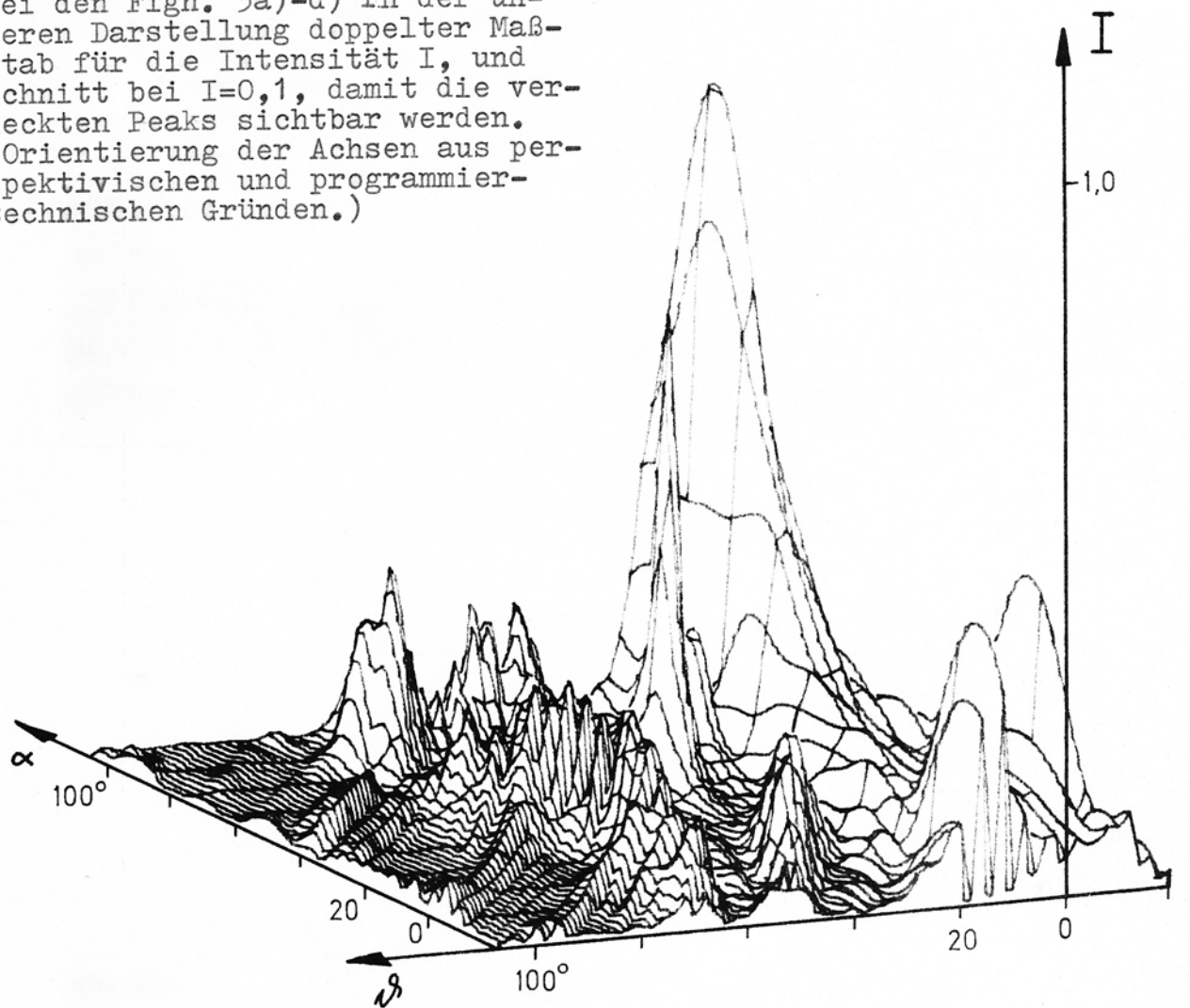


Fig. 3b) $s = 100\text{cm}$

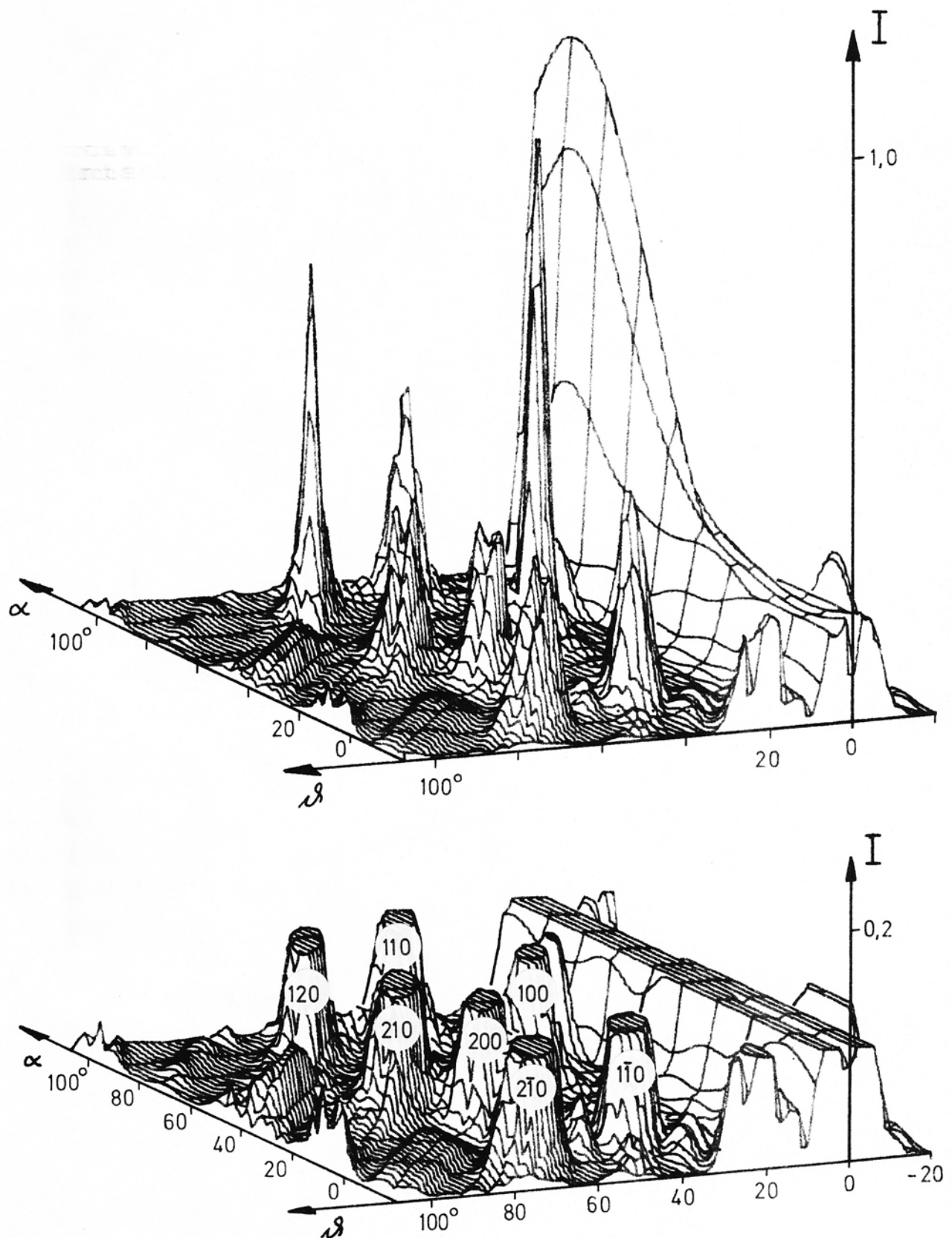


Fig. 3c) $s = 200\text{cm}$

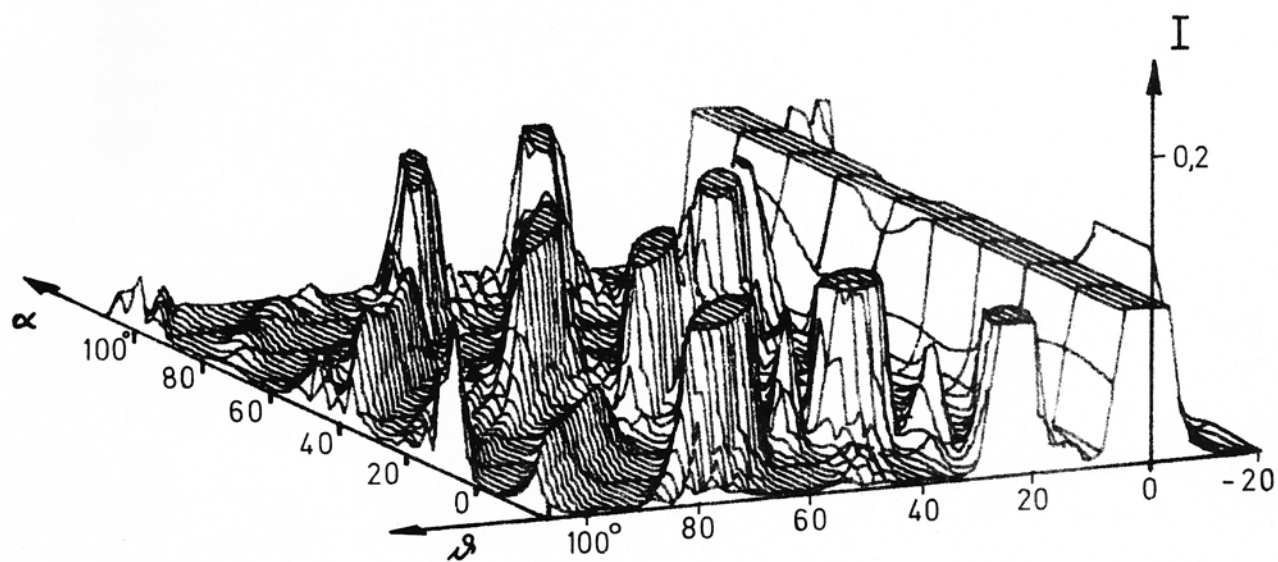
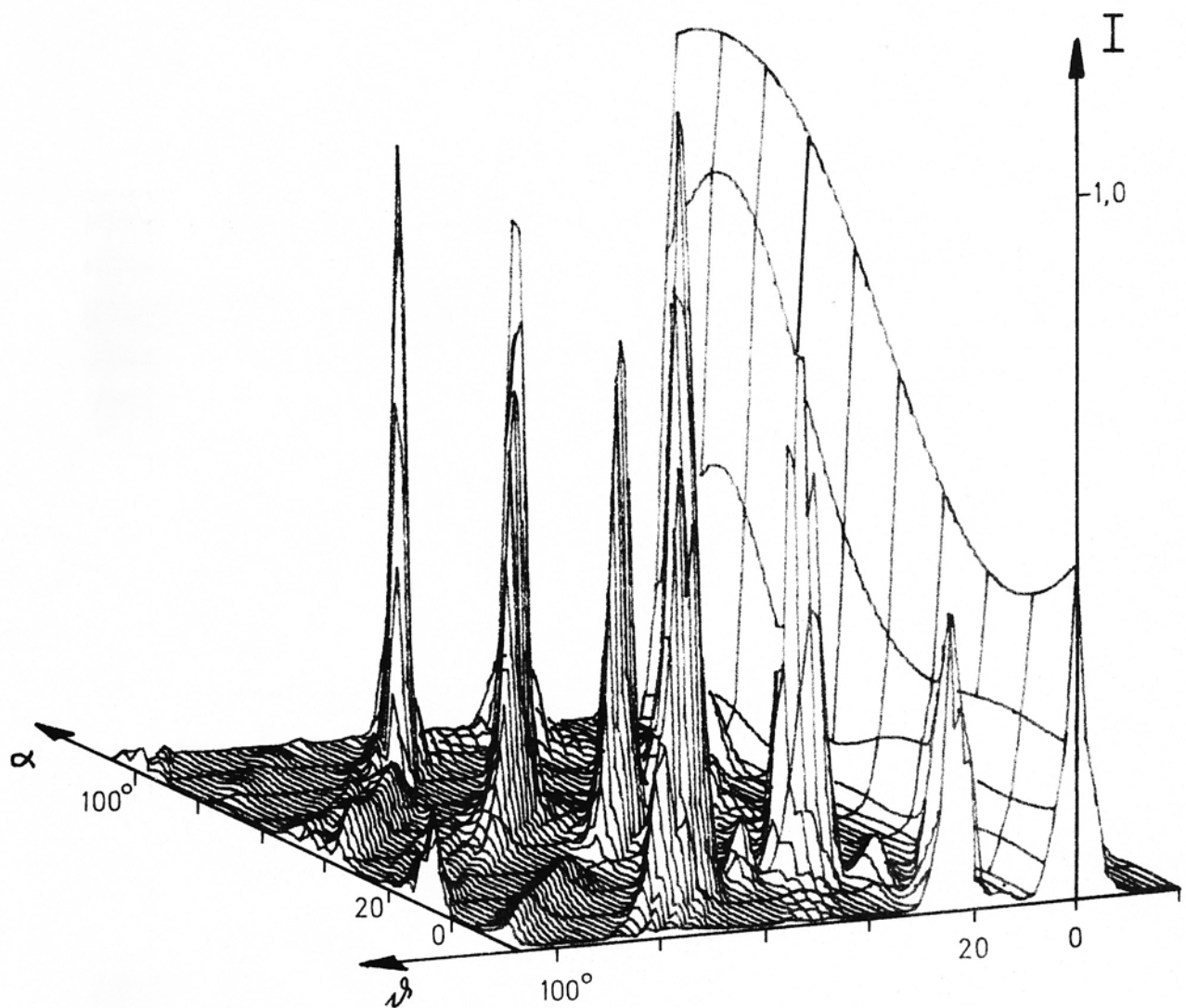
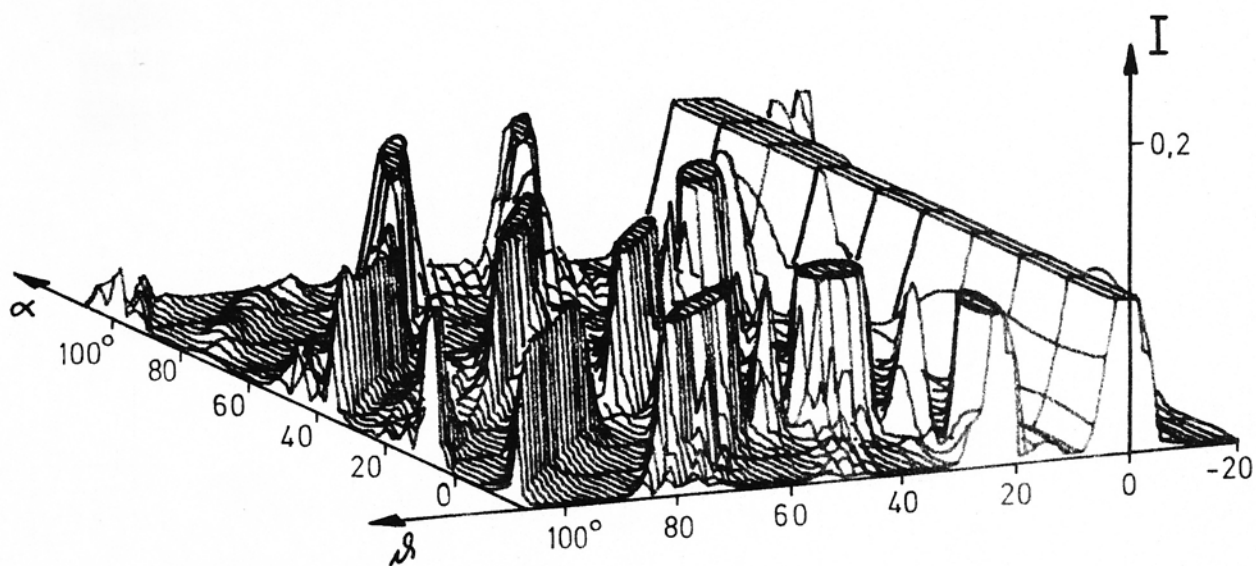
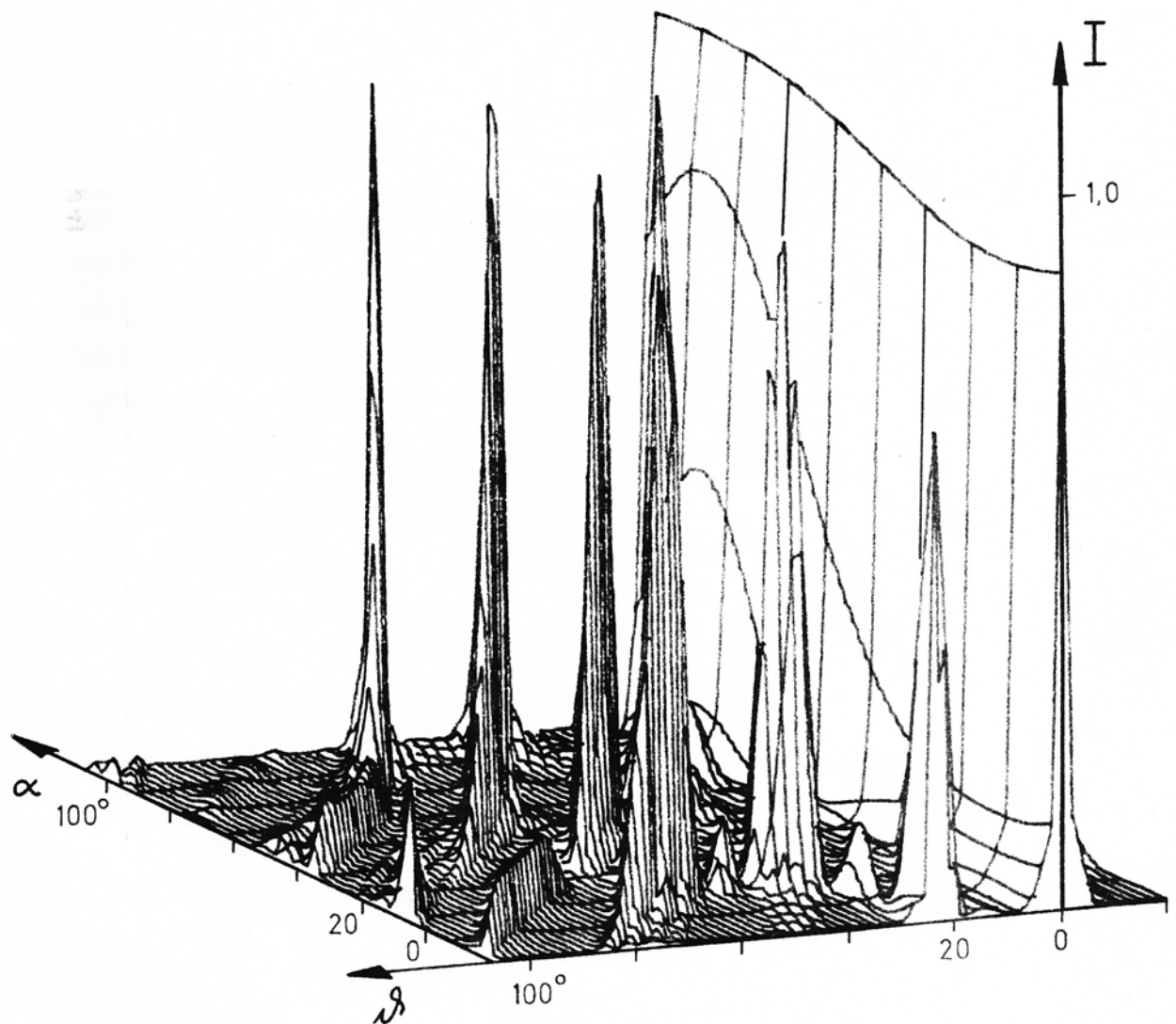


Fig. 3d) $s = 500\text{cm}$



5. Zusammenfassung

Der in verschiedenen Arbeiten vorgeschlagene Modellversuch mit cm-Wellen zur Röntgenstrahlbeugung an Kristallen wurde vor allem unter dem Gesichtspunkt der Durchführbarkeit an Schulen näher betrachtet. Dabei ergaben sich folgende Punkte:

1. Nachdem die Beugung am Raumgitter immer in den Stufen lineares Gitter - ebenes Gitter - Raumgitter behandelt werden wird, ist es durchaus sinnvoll, die Laue-Gleichungen schon im Anschluß an das System zweier Kreiswellen, d.h. nach den Wellenwannenversuchen, einzuführen.
2. Man benötigt auch dann noch mehr als 6 Stunden, wenn man - wie etwa in AGs in 13₂ - Schüler voraussetzt, die über ein größeres Vorwissen (z.B. Beugung am Gitter) verfügen. Insofern ist die Behandlung der Bragg-Reflexion im Rahmen eines Vorspannes zur Strukturanalyse bedenklich.
3. Die formale Behandlung der Bragg-Gleichung würde mehr Fragen aufwerfen als beantworten, denn schon bei der Behandlung der Laue-Beziehungen ist man oft gezwungen, grundlegende Begriffe der Interferenz zu wiederholen.
4. Das Wesentliche der Bragg-Reflexion kann nur erfaßt werden, wenn die Beugung am Raumgitter verstanden wurde. Die Reflexion an Netzebenen wurde deshalb an den Schluß einer konstruktiven Herleitung der Laue-Gleichungen gesetzt.
5. Der theoretische Teil des Kurses läßt sich nicht weiter elementarisieren und wird deshalb den experimentellen Teil immer überwiegen.
6. In der vorhandenen Literatur werden oft entscheidende Punkte des Modellversuches sowohl in physikalischer als auch methodischer Hinsicht außer Acht gelassen, weil die Röntgenstrahlbeugung nur als Mittel zum Zweck (Kristallanalyse) angesehen wird.

Literaturverzeichnis

- (1) Dorn-Bader, Physik Oberstufe 0, Schrödel Verl., 1976, 142.
- (2) Kuhn, Lehrbuch der Physik Bd. 2, Westermann Verl., '68, 192.
- (3) K.H. Dünkeloh, Beugung von Röntgenstrahlen am räumlichen Gitter, schriftl. Prüfungsarbeit am Sem. Stuttgart II, 1971/1972.
- (4) K. Kühn, Ein Kurs über Röntgenphysik als Arbeitsgemeinschaft in der Klasse 13, schriftl. Prüfungsarbeit, Sem. Tübingen, 1974/II.
- (5) W. Czech, Beugungserscheinungen bei Röntgen- und Teilchenstrahlen an Kristallgittern, Physik und Didaktik (PhuD) 3(1974), 184-200.
- (6) T.H. Markl, Behandlung von Laueschen Beugungserscheinungen an Kristallen mit Hilfe der vektoriellen analytischen Geometrie, PhuD 2(1975), 137-146.
- (7) E. Bundrück/H. Jodl, Modellversuche zur Untersuchung von Kristallstrukturen mit Röntgenstrahlen, PhuD 3(1975), 190-210.
- (8) E. Bundrück/H. Jodl, Streuung von Wasserwellen an ein- und zweidimensionalen Punktgittern, PhuD 1(1976), 23-34.
- (9) S. Danner, Prinzipien der Kristallstrukturanalyse - veranschaulicht am zweidimensionalen Modell, Praxis der Naturwissenschaften 3(1976), 60-72.
- (10) W. Gieseke, Ein Vorschlag zur theoretischen Behandlung der Bragg-Reflexion im Physikunterricht, PhuD 4(1978), 283-290.

- (11) A.Sommerfeld, Atombau und Spektrallinien I, Vieweg
& Sohn (1969), 190 ff.
- (12) E.W.Schpoliski, Atomphysik 1, VEB Deutscher Verlag
der Wiss. (1970), 94 ff.
- (13) Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik
Bd. III Optik, W.de Gruyter (1966), 295 ff.