

# Zur Poly- und Pseudomorphie in dünnen Aufdampfschichten

Von HEINZ LÜDEMANN

Aus dem Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg  
(Z. Naturforsch. 12 a, 226–228 [1957]; eingegangen am 22. Januar 1957)

Bei der Untersuchung dünner  $\text{TiCl}_3$ - und  $\text{CsCl}$ -Schichten, die normalerweise im  $\text{CsCl}$ -Gittertyp kondensieren, zeigte sich, daß sie auf Einkristallspaltflächen von Alkalihalogeniden des  $\text{NaCl}$ -Typs im fremden Gittertyp der Unterlage aufwachsen.

Während sich der Gittertyp der Schichten dem der Unterlage angleicht, ergeben sich auch in den dünnsten Schichten von höchstens wenigen Å Dicke keine Hinweise für eine Angleichung der Gitterkonstanten.

Beim Tempern wandeln sich die äußeren Teile der im  $\text{NaCl}$ -Typ aufgewachsenen Schichten in den  $\text{CsCl}$ -Typ um. Die Kristallite im Kontaktgebiet mit der Unterlage behalten jedoch den  $\text{NaCl}$ -Gittertyp bei.

## I. Zur Polymorphie in dünnen Aufdampfschichten

### 1. Vorbemerkung

Während die Aufdampfschichten verschiedener Substanzen, die normalerweise im  $\text{CsCl}$ -Typ kristallisieren, auf Einkristallspaltflächen von Alkalihalogeniden des  $\text{NaCl}$ -Typs im fremden Gittertyp der Unterlage aufwachsen, soll das  $\text{TiCl}_3$  auf  $\text{NaCl}$  eine Ausnahme bilden und nicht den Gittertyp der Unterlage annehmen, sondern in seinem normalen  $\text{CsCl}$ -Typ kondensieren<sup>1</sup>. Diese Sonderstellung wird mit einer guten Übereinstimmung der Ionenanordnungen in Schicht und Unterlage begründet, die den  $\text{CsCl}$ -Typ begünstige.

Rechnet man die Abweichungen der Ionenabstände in Schicht und Unterlage für verschiedene Kombinationen ( $\text{CsCl}$ ,  $\text{CsBr}$ ,  $\text{CsJ}$ ,  $\text{TiCl}_3$ ,  $\text{TlBr}$ ,  $\text{TlJ}$  auf  $\text{LiF}$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{KBr}$ ,  $\text{KJ}$ ) nach, so bemerkt man jedoch, daß  $\text{TiCl}_3$  auf  $\text{NaCl}$  in dieser Hinsicht keine Sonderstellung einnimmt: Beim  $\text{CsBr}$ , das auf  $\text{KCl}$  den fremden Gittertyp der Unterlage annimmt, liegen praktisch die gleichen Abstandsdifferenzen vor und auch die Radienquotienten  $r^+/r^-$  von  $\text{TiCl}_3$  und  $\text{CsBr}$  unterscheiden sich kaum. Außerdem gibt es mehrere Kombinationen, bei denen die Übereinstimmung der Ionenabstände noch besser ist als bei  $\text{TiCl}_3$  auf  $\text{NaCl}$  (z. B.  $\text{CsJ}$  auf  $\text{KBr}$ ,  $\text{TlBr}$  auf  $\text{NaCl}$  u. a.).

Diese Situation veranlaßte uns zur Untersuchung des Wachstums dünner  $\text{TiCl}_3$ -Schichten.

## 2. Beschreibung und Diskussion der experimentellen Ergebnisse

Die Schichten wurden in der bereits früher beschriebenen Weise<sup>2,3</sup> im Objektraum der Elektronenbeugungsanlage bei einem Restgasdruck von  $1-4 \cdot 10^{-5}$  Torr aufgedampft und während der Kondensation fortlaufend untersucht. Die Beschleunigungsspannung betrug stets 50 kV. Die Beobachtung erfolgte im allgemeinen im  $[110]$ -Azimut der Unterlage. Kontrollen wurden im  $[100]$ - und  $[210]$ -Azimut vorgenommen. Ein Einfluß des Elektronenstrahls auf das Wachstum der Schicht wurde auch bei diesen Versuchen nicht beobachtet. Zu erwähnen ist noch, daß bei den vorliegenden Experimenten der Kristallheizofen vor jeder Bedampfung durch zwei- bis vierstündiges Ausglühen im Hochvakuum bei  $500-600^\circ\text{C}$  gründlich gereinigt wurde und die Bohrung der zwischen Präparat und Verdampfungsschiffchen befindlichen Aufdampfblende so bemessen ist, daß der Aufdampfstrahl direkt nur auf die Kristallunterlage, nicht aber auf die Ofenwand treffen kann. Auf diese können nur gestreute und z. B. an der Unterlage reflektierte Teilchen der Schichtsubstanz gelangen.

### a) $\text{TiCl}_3$ auf $\text{NaCl}$

Die Untersuchungen ergaben bei einer Aufdampfgeschwindigkeit von  $\leq 1 \text{ Å/sec}$ , daß die  $\text{TiCl}_3$ -Schichten entgegen der Beobachtung von SCHULZ auf  $\text{NaCl}$ -Spaltflächen von Zimmertemperatur im fremden  $\text{NaCl}$ -Gittertyp der Unterlage kondensieren. Das Beugungsdiagramm einer derartigen Schicht ist in Abb. 1 a \* wiedergegeben. Neben den Reflexen von Schicht und Unterlage sind noch solche vorhanden, die auf Mehrfachstreuung zwischen beiden zurückzuführen sind.

<sup>1</sup> L. G. SCHULZ, Acta Cryst. 4, 487 [1951].

<sup>2</sup> H. LÜDEMANN, Z. Naturforsch. 9 a, 252 [1954].

<sup>3</sup> H. LÜDEMANN, Z. Naturforsch. 11 a, 935 [1956].

\* Abb. 1 und 2 auf Tafel S. 226 a.



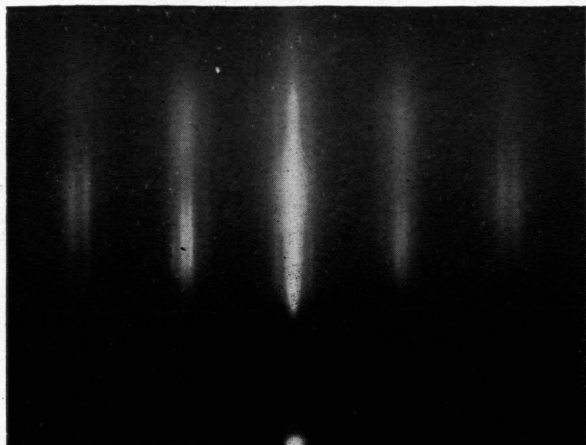


Abb. 1 a.

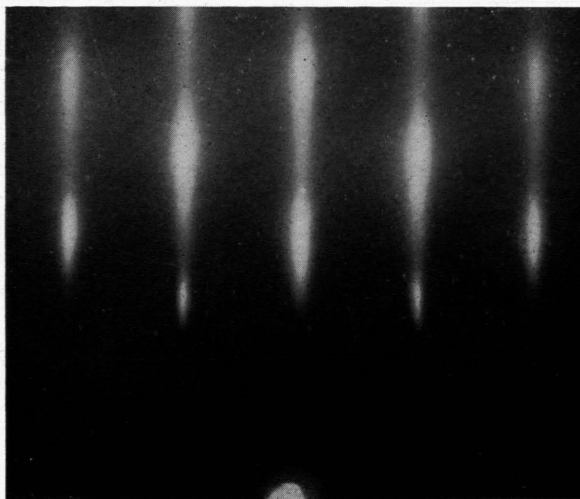


Abb. 2 a.

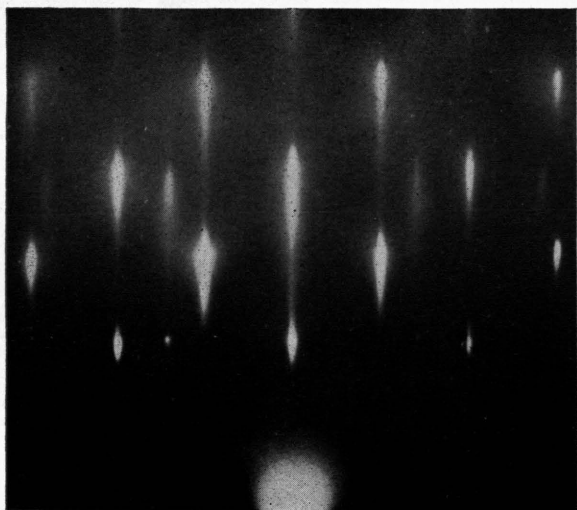


Abb. 1 b.

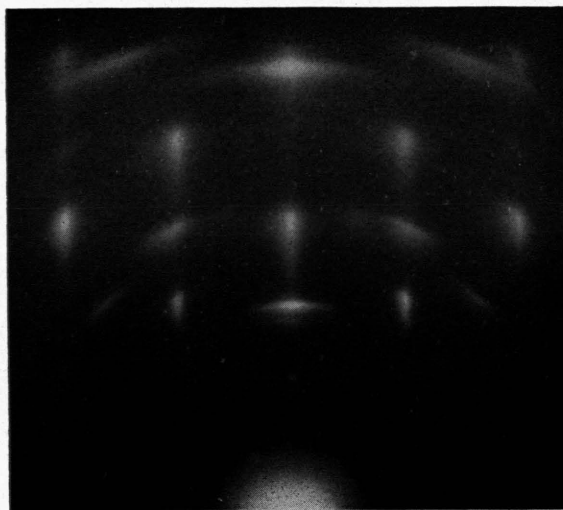


Abb. 2 b.

Abb. 1. Interferenzdiagramme einer bei Zimmertemperatur auf NaCl aufgedampften  $\text{TiCl}$ -Schicht.  $[110]$ -Azimut der Unterlage. a) Mittlere Schichtdicke: höchstens wenige Å. Die ersten Kristallite der Schicht wuchsen im fremden NaCl-Gittertyp der Unterlage achsenparallel zu ihr auf. b) Mittlere Schichtdicke: etwa 100 Å. Die nachfolgenden Schichtbausteine haben sich im CsCl-Gittertyp angelagert.

Abb. 2. Interferenzdiagramme einer im Mittel etwa 200 Å dicken, auf eine NaCl-Spaltfläche von Zimmertemperatur aufgedampften  $\text{CsCl}$ -Schicht.  $[110]$ -Azimut der Unterlage. a) Schicht nach Beendigung des Aufdampfens. Sie ist vollständig im NaCl-Gittertyp der Unterlage aufgewachsen. b) Dieselbe Schicht ist zwei Minuten lang bei ca.  $40^\circ \text{C}$  getempert worden. Es sind die Reflexsysteme beider Gittertypen erkennbar. Beim weiteren Tempern verschwinden die zum NaCl-Typ gehörenden Interferenzpunkte vollständig.



Aus der Strichform der Reflexe<sup>4,5</sup> und ihrer Schärfe kann geschlossen werden, daß die Schichtkristallite parallel zur Unterlage mehrere 100 Å, senkrecht dazu jedoch höchstens wenige Å ausge dehnt sind. Die aus der verdampften Substanzmenge abgeschätzte mittlere Schichtdicke liegt in der gleichen Größe.

Die Abstände der Striche, die sowohl im [110]- als auch [100]-Azimut der Unterlage ausgemessen wurden, sind nicht zu verstehen, wenn die Schichten im CsCl-Typ kondensieren, aber sofort erklärbar, wenn man eine Kristallisation der sehr dünnen Schichten im NaCl-Gittertyp annimmt.

Beim weiteren Bedampfen dieser dünnen TiCl-Schichten lagerten sich die nachfolgenden Bausteine stets im arteigenen CsCl-Gittertyp<sup>6</sup> an. Das Interferenzbild einer solchen Schicht zeigt Abb. 1 b. Man erkennt zwei Reflexsysteme, die auf Kristallite mit zwei um 90° gegeneinander gedrehte Orientierungen<sup>6</sup> zurückzuführen sind. Es gelang nicht, TiCl bei Zimmertemperatur und der angegebenen Aufdampfgeschwindigkeit in dickeren Schichten im NaCl-Typ niederzuschlagen, während in Parallelversuchen z. B. bei TiCl auf KBr und KCl sowie CsCl auf NaCl Schichten bis zu Dicken von z. Tl. mehreren 100 Å im NaCl-Gittertyp hergestellt werden konnten.

#### b) CsCl auf NaCl u. a.

Im Temperaturbereich von 20 bis 350° C (oberhalb 350° C dampften die CsCl-Schichten bereits so schnell von der Unterlage wieder ab, daß die Anfertigung photographischer Aufnahmen nicht möglich war) kondensierten die ersten Lagen von CsCl-Aufdampfschichten ebenfalls stets im fremden NaCl-Typ achsenparallel zur Unterlage.

Der weitere Aufbau der Schicht hing sehr stark von den Aufdampfbedingungen ab: Bei Zimmertemperatur der Unterlage und Aufdampfgeschwindigkeiten von einigen Å/sec wuchsen die Schichten im NaCl-Typ weiter (mittlere Schichtdicken: bis zu etwa 1000 Å). Bei höheren Aufdampfgeschwindigkeiten (einige 10–100 Å/sec) und damit stärkerer

Heizung der Verdampfungsquelle (Tantalschiffchen) kondensierten die Schichten oberhalb gewisser Dicken (einige 10–100 Å) im CsCl-Typ<sup>6</sup>.

Dampfte man die CsCl-Schichten so langsam auf (einige Å/sec), daß sie durchgehend im NaCl-Gittertyp kristallisierten (s. Abb. 2 a) und temperierte sie dann anschließend bei Temperaturen unter 100° C, so wandelte sich das Gitter in den arteigenen CsCl-Typ um (s. Abb. 2 b). Es entstand dabei jedoch eine andere Orientierung<sup>7</sup> als die beim Aufwachsen in dickeren Schichten beobachtete<sup>6</sup>.

Durch den relativ hohen Dampfdruck des CsCl dampften die Schichten bei Unterlagetemperaturen über 100° C bereits merklich wieder ab. Auch dieser Abdampfvorgang wurde mittels der Interferenzdiagramme fortlaufend untersucht. Es zeigte sich dabei, daß sich das Gitter der vorher bei Temperaturen unter 100° C getemperten Schichten nur außerhalb eines gewissen Bereiches vor der Unterlage in den CsCl-Typ umgewandelt hatte, im Kontaktgebiet mit der Unterlage aber der artfremde NaCl-Typ bis zum Abdampfen beibehalten wurde.

Neben der ausführlichen Untersuchung von CsCl auf NaCl wurden bei einigen anderen Schicht–Unterlage-Kombinationen Stichproben durchgeführt. Es wurden aufgedampft:

CsCl auf LiF, KCl und KJ

bei Zimmertemperatur und 100° C,

CsBr auf KCl

bei Zimmertemperatur, 100 und 200° C,

TiCl auf KBr<sup>8</sup> und KCl

bei Zimmertemperatur und 120° C.

In allen genannten Kombinationen wurde der gleiche Schichtaufbau wie bei CsCl auf NaCl beobachtet. Eine Temperung wurde bei ihnen nicht vorgenommen.

## II. Zur Pseudomorphie in dünnen Aufdampfschichten

Da die meisten unserer Interferenzaufnahmen der dünnsten TiCl-Schichten (s. Abb. 1 a) Reflexe von Schicht und Unterlage enthalten, war bei ihnen eine

F. KIRCHNER u. H. RAETHER, Phys. Z. **30**, 510 [1932].

<sup>5</sup> H. RAETHER, Handb. Physik **32**, 443 [1956]; dort auch weitere Literatur.

<sup>6</sup> Orientierung:  $(110)_s \parallel (001)_u$  und  $[001]_s \parallel [110]_u$  bzw.  $[110]_u \cdot s = \text{Schicht, } u = \text{Unterlage}$ .

<sup>7</sup> Orientierung:  $(111)_s \parallel (001)_u$  und  $[112]_s \parallel [110]_u$  bzw.  $[110]_u$ .

<sup>8</sup> PASHLEYS Beobachtung<sup>9</sup> beider Gittertypen (NaCl-Typ überwiegt den CsCl-Typ) in einer etwa 100 Å dicken, bei 120° C auf KBr aufgedampften TiCl-Schicht entspricht unserem Untersuchungsbefund bei Aufdampfgeschwindigkeiten von einigen 10 Å/sec. Bei kleineren Aufdampfgeschwindigkeiten (etwa einige Å/sec) erhielten wir auch in dickeren Schichten ( $\leq 500$  Å) nur zum NaCl-Typ gehörige Reflexe. Hervorzuheben ist, daß die ersten Lagen der Schichten aber in jedem Falle im NaCl-Typ aufwuchsen.

<sup>9</sup> D. W. PASHLEY, Proc. Phys. Soc., Lond. A **65**, 33 [1952].

relative Gitterkonstantenbestimmung möglich. Durch Auswertung der Photoplatten und Photometerkurven wurde für die dünnen, im fremden Gittertyp der Unterlage auf NaCl-Spaltflächen aufgewachsenen TiCl-Schichten der Wert

$$a_{\text{TiCl}}^{\circ} = 6,09 \pm 0,06 \text{ \AA},$$

bezogen auf die Gitterkonstante des NaCl

$$a^{\circ} = 5,628 \text{ \AA}$$

ermittelt. Während sich der *Gittertyp* der Schichtsubstanz dem der Unterlage angleicht (Polymorphie), ist also eine Angleichung der *Gitterkonstanten* (Pseudomorphie) nicht zu beobachten, obgleich sie im vorliegenden Falle bei den sehr dünnen Schichten und geringen Gitterkonstantendifferenzen ( $\approx +8\%$ ) nach der Theorie von FRANK und v. D. MERWE<sup>10</sup> erfolgen sollte. Alle vorliegenden Ergebnisse fremder und eigener Untersuchungen weisen vielmehr darauf hin, daß diese Theorie zur Deutung des Wachstums dünner Aufdampfschichten nicht ausreicht. Die nach ihr bei geringen Gitterkonstantendifferenzen ( $\leq 9$  bzw.  $14\%$ ) in dünnsten Schichten zu erwartende Pseudomorphie ist auch bei anderen Kombinationen bisher in keinem Falle nachgewiesen worden (siehe z. B. I. c. 5, 11, dort auch weitere Literatur).

Ebenfalls ergaben sich keinerlei Anzeichen für die Existenz der geforderten kritischen Gitterkonstantendifferenz zwischen Schicht und Unterlagensubstanz<sup>10</sup>, bei deren Überschreiten eine Schicht nicht mehr azimutal orientieren, sondern willkürlich aufwachsen sollte. Die Experimente zeigen, daß eine gute Übereinstimmung der Gitterkonstanten keineswegs die entscheidende Voraussetzung für eine azimutale Orientierung der Schichtkristallite ist. Alkalihalogenidschichten wachsen z. B. auf Glimmer- und di-

verse isotype Unterlagen<sup>1-3, 12-14</sup> bei Variation der Gitterkonstantendifferenz von  $-43\%$  bis  $+90\%$  im Temperaturbereich von  $20-500^{\circ}\text{C}$  in einkristallinen Orientierungen auf.

Es wurde (s. z. B. Anm. 12) versucht, das Schichtwachstum durch Anlagerung von größeren, im Dampfraum vor der Unterlage gebildeten und aus mehreren Schichtbausteinen bestehenden Aggregaten zu deuten. Die vorliegende Erscheinung der Polymorphie sowie die Entstehung von Kristalliten, die z. B. mit (110)-Ebenen des NaCl-Gitters auf Würfelflächen der Unterlage aufwachsen<sup>3</sup>, und auch die Zwillingsbildung der Alkalihalogenide vom NaCl-Typ<sup>2, 3, 15</sup> legen jedoch die Vermutung nahe, daß die zweiatomigen Alkalihalogenidmoleküle der Dampfphase direkt auf die Unterlage auftreffen und dort kondensieren, ohne daß vorher dreidimensionale Aggregate aus gleichartigen Schichtbausteinen entstehen. Die vorstehend genannten Untersuchungsbefunde wären gegenwärtig nicht verständlich, wenn die Schichten durch solche Aggregate aufgebaut würden.

Insgesamt folgt aus den bisher vorliegenden Untersuchungsbefunden, daß Gitterkonstanten- und Symmetriebetrachtungen nicht ausreichen, um die komplizierten Erscheinungen des Kristallwachstums zu erklären. Es scheint notwendig zu sein, für jeden Fall die Wechselwirkung der auftretenden Schichtbausteine mit der Unterlage gesondert zu berechnen.

Diese Untersuchungen wurden im Institut für Angewandte Physik der Universität Hamburg durchgeführt. Dem Leiter des Instituts, Herrn Professor Dr. H. RAETHER, danke ich vielmals für die Anregung und ständige wohlwollende Förderung der Arbeit.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft habe ich dafür zu danken, daß sie diese Untersuchungen durch Gewährung einer finanziellen Beihilfe und Überlassung verschiedener Geräte ermöglichte.

<sup>10</sup> F. C. FRANK u. J. H. v. D. MERWE, Proc. Roy. Soc., Lond. A **189**, 216 [1949].

<sup>11</sup> D. W. PASHLEY, Adv. Phys. **5**, 173 [1956].

<sup>12</sup> L. G. SCHULZ, Acta Cryst. **5**, 130 [1952].

<sup>13</sup> N. D. LISGARTEN, Trans. Faraday Soc. **50**, 684 [1954].

<sup>14</sup> E. BAUER, Z. Kristallogr. **107**, 265 [1956].

<sup>15</sup> H. LÜDEMANN, Z. Kristallogr. [1957], im Druck.



# Die Bestimmung der elastischen Konstanten kubischer Kristalle mittels der Methode der Ultraschall-Elastogramme<sup>1</sup>

Von LUDWIG BERGMANN \*

(Z. Naturforschg. **12 a**, 229—233 [1957]; eingegangen am 14. Januar 1957)

Mit der von SCHAEFER und BERGMANN angegebenen Methode der Lichtbeugung an hochfrequent schwingenden Kristallen wurden die elastischen Konstanten einer größeren Zahl kubischer Kristalle bestimmt. Es wird versucht, einen Zusammenhang zwischen der Form des Elastogramms und den Kräften im Kristallgitter zu finden. Als besonders bemerkenswertes Ergebnis wurde gefunden, daß ein regulärer Einkristall von Bariumfluorid sich in elastischer Beziehung wie ein isotroper Körper verhält.

Mit dem von SCHAEFER und BERGMANN<sup>2</sup> 1934 angegebenen Verfahren der Beugung des Lichtes an Ultraschallwellen in einem zu hochfrequenten Schwingungen angeregten Kristallstück ist es möglich, die elastischen Konstanten des betreffenden Kristalles aus den Abmessungen und der Form der Beugungsfigur (Elastogramm) zu erhalten. Dabei kann das Kristallstück in seiner äußeren Form beliebig gestaltet sein und muß nur so orientiert sein, daß es mit sichtbarem Licht in einer oder mehreren Kristallachsenrichtungen durchstrahlt werden kann. Der große Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß man die Messungen aller elastischen Konstanten an einem Kristallstück durchführen kann und daß man nicht wie bei den alten Methoden mehrere genau orientierte und bearbeitete Kristallstücke mit bekannten Abmessungen benötigt, an denen die elastischen Konstanten durch Messung der Dehnung, Biegung und Torsion in mühsamer Weise ermittelt werden müssen.

Im folgenden soll über Messungen der elastischen Konstanten an verschiedenen kubischen Kristallen berichtet werden.

Abb. 1 zeigt den dazu erforderlichen Aufbau. Eine intensive Lichtquelle L (Quecksilberhochdrucklampe) beleuchtet über den Kondensor K und ein Monochromatfilter F eine sehr feine Lochblende B. Diese Blende wird mittels eines langbrennweitigen Objektivs O über einen Spiegel S auf die in einer Entfernung von etwa 250 cm befindliche Filmebene einer Kleinbildkamera C abgebildet. Durch Einschieben eines Spiegels S' in den Strahlengang vor der Kamera läßt sich das Bild auf einer Mattscheibe M mittels der Lupe Lp subjektiv be-

obachten. Dicht vor dem Objektiv O befindet sich der zu untersuchende Kristall Kr, meist in der Form eines Würfels. Durch die Irisblende I läßt sich der Strahlengang auf den durch den Kristall bedingten Querschnitt abbilden. Der Kristall sitzt unter Zwischenschaltung eines Ölfilms auf dem Piezoquarz Q, der von einem Hochfrequenzgenerator zu Oberschwingungen im Bereich zwischen 5 und 25 MHz angeregt werden kann.

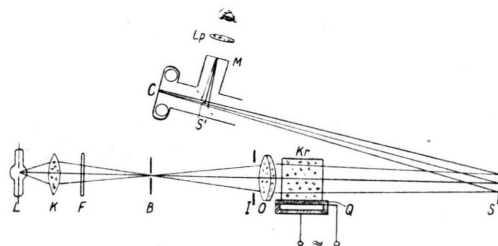


Abb. 1. Optische Anordnung zur Beugung des Lichtes beim Durchgang durch einen hochfrequent schwingenden Kristall.

Durch langsames Verändern der Frequenz am Generator muß man eine solche Frequenz heraussuchen, durch die der Schwingquarz mit dem darauf befindlichen Kristall zu einer kräftigen Eigenschwingung angeregt wird. Dann erscheint auf der Mattscheibe M die Beugungsfigur und kann anschließend photographiert werden.

Bei den hier zur Diskussion stehenden kubischen Kristallen erhält man bei Durchstrahlung in Richtung einer Kristallachse eine Beugungsfigur mit vierzähliger Symmetrie (Abb. 2a), die aus einem inneren und äußeren Teil besteht. Eine Ausmessung der Abschnitte dieser Interferenzfigur auf den Koordinatenachsen sowie auf einer unter 45° gegen

<sup>1</sup> Im Auszug vorgetragen auf der Physikertagung in Bad Nauheim am 28. April 1956 und auf dem II. Internationalen Akustiker-Kongreß in Cambridge, Mass., am 22. Juni 1956.

\* Wetzlar, Laufdorfer Weg 59.

<sup>2</sup> CL. SCHÄFER u. L. BERGMANN, S.B. Berliner Akad. Wiss. Phys. math. Kl. XIII (1934), S. 192/193 und XIV (1935), S. 222/239; zusammenfassende Darstellung in L. BERGMANN, Der Ultraschall, 6. Aufl., Verlag S. Hirzel, Stuttgart u. Zürich 1954.

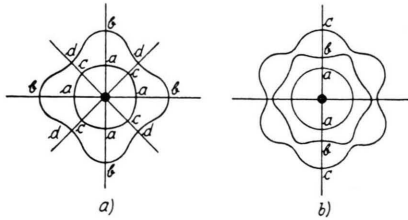


Abb. 2. Form und Beugungsfigur bei Durchstrahlung eines kubischen Kristalles (z. B. KCl) längs einer Kristallachse mit vierzähliger Symmetrie (a) bzw. längs einer Würfel-diagonale mit sechszähliger Symmetrie (b).

die Achsen geneigten, durch den Mittelpunkt gehenden Geraden liefert die gesuchten drei elastischen Konstanten des betreffenden kubischen Kristalles. Unter Bezug auf Abb. 2 a gelten die Beziehungen

$$(a a) \sim \frac{1}{\sqrt{c_{11}}}, \quad (b b) \sim \frac{1}{\sqrt{c_{44}}},$$

$$(c c) \sim \frac{2}{\sqrt{c_{11} + c_{12} + 2 c_{44}}}, \quad (d d) \sim \frac{2}{\sqrt{c_{11} - c_{12}}}.$$

Der Proportionalitätsfaktor ist dabei  $k = (A \lambda)^2 \varrho N^2$ , wobei  $\varrho$  die Dichte des Kristalls,  $\lambda$  die Lichtwellenlänge,  $A$  den Abstand der Bildebene von der Mitte des Kristalls und  $N$  die Anregungsfrequenz bedeuten. Damit erhält man für die gesuchten elastischen Konstanten die Gleichungen

$$c_{11} = \frac{k}{(a a)^2}, \quad c_{44} = \frac{k}{(b b)^2},$$

$$c_{12} = c_{11} - \frac{2 k}{(d d)^2}, \quad c_{12} = \frac{2 k}{(c c)^2} - (c_{11} + 2 c_{44}).$$

Durchstrahlt man den kubischen Kristall in Richtung einer Würfel-diagonale, so erhält man eine Beugungsfigur von sechszähliger Symmetrie (Abb. 2 b), die aus einer Kurve 6. Grades besteht. Bezeichnen  $(a a)$ ,  $(b b)$  und  $(c c)$  die Durchmesser der drei geschlossenen Kurventeile längs einer in die Bildebene projizierten Kristallachse, so gelten die Gleichungen

$$(a a) \sim \frac{1}{\sqrt{(c_{11} - c_{12} - 2 c_{44})}}, \quad (b b) \sim \frac{1}{\sqrt{2 c_{44}}},$$

$$(c c) \sim \frac{1}{\sqrt{(c_{11} - c_{12})}},$$

aus denen sich ebenfalls die gesuchten drei elastischen Konstanten ermitteln lassen.

Untersucht wurden Kristalle aus RbCl, RbBr, KBr, KCl, KJ, NaBr, NaCl, NaF, LiF und  $\text{CaF}_2$ . Die Kristallproben hatten Würfelgestalt und eine

Kantenlänge von 3 bis 4 cm. Abb. 3 \* und 4 zeigen die damit erhaltenen Beugungsfiguren sowohl bei Durchstrahlung in einer Kristallachse (1. und 3. Reihe in Abb. 3 bzw. 1. Reihe in Abb. 4) als auch bei Durchstrahlung längs einer Würfel-diagonalen (2. und 4. Reihe in Abb. 3 bzw. 2. Reihe in Abb. 4). Das Elastogramm von NaBr bei Durchstrahlung in Richtung einer Würfel-diagonalen konnte experimentell bisher nicht erhalten werden; hierzu ist zu bemerken, daß merkwürdigerweise die Interferenzfiguren besonders bei Durchstrahlung in einer Würfel-diagonalen nicht bei allen Kristallen gleich gut herauskommen. Man erkennt dies daran, daß infolge zu langer Belichtung bei den Kristallen, bei denen der äußere Teil der Figur nur sehr schwach erscheint, der innere Teil der Figur, der immer gut herauskommt, sehr stark überbelichtet ist (z. B. bei KBr und NaCl).

Die aus einer großen Zahl solcher Elastogramme mit einer Genauigkeit von 1% ermittelten elastischen Konstanten sind in Tab. 1 zusammengestellt, die auch die Dichte der Kristalle enthält. Die Messungen wurden bei Zimmertemperatur ausgeführt. Auf die in der Tabelle noch angegebenen Werte von  $2 c_{44}$  und  $c_{11} - c_{12}$  wird sogleich noch eingegangen.

Überblickt man die in den Abb. 3 und 4 wiedergegebenen Beugungsfiguren, so fällt auf, daß die Figuren von RbCl, RbBr, KCl, KBr und KJ annähernd die gleiche Form haben; dies gilt sowohl für die Durchstrahlung in Richtung einer Kristallachse als auch bei Durchstrahlung in einer Würfel-diagonalen. Andererseits haben auch die Bilder von NaCl, NaBr und NaF unter sich eine gleiche Form. Die Figur von  $\text{CaF}_2$  liegt zwischen den Figuren der beiden genannten Gruppen, und die Figur von LiF weicht am meisten von allen anderen Beugungsbildern in beiden Durchstrahlungsrichtungen ab.

| Kristall       | Dichte<br>g/cm <sup>3</sup> | Elastische Konstanten in 10 <sup>11</sup> dyn/cm <sup>2</sup> |          |          |            |                   |
|----------------|-----------------------------|---|----------|----------|------------|-------------------|
|                |                             | $c_{11}$  | $c_{12}$ | $c_{14}$ | $2 c_{44}$ | $c_{11} - c_{12}$ |
| RbCl           | 2,76                        | 3,56  | 0,60     | 0,46     | 0,92       | 3,50              |
| RbBr           | 3,35                        | 3,10  | 0,49     | 0,38     | 0,76       | 2,50              |
| KCl            | 1,99                        | 3,99  | 0,68     | 0,63     | 1,26       | 3,31              |
| KBr            | 2,74                        | 3,42  | 0,56     | 0,50     | 1,01       | 2,86              |
| KJ             | 3,13                        | 2,70  | 0,44     | 0,37     | 0,74       | 2,25              |
| NaCl           | 2,16                        | 4,82  | 1,27     | 1,22     | 2,44       | 3,54              |
| NaBr           | 3,20                        | 4,02  | 1,11     | 1,00     | 2,00       | 2,91              |
| NaF            | 2,79                        | 9,70  | 2,56     | 2,80     | 5,60       | 7,14              |
| $\text{CaF}_2$ | 3,18                        | 16,28   | 4,33     | 3,34     | 6,68       | 11,95             |
| LiF            | 2,63                        | 11,03   | 4,48     | 6,23     | 12,46      | 6,57              |

Tab. 1. Aus Elastogrammen ermittelte elastische Konstanten.

\* Abb. 3, 4, 5, 7 und 8 auf Tafel S. 230 a, b.