

(Mitteilung aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Metallforschung,
Berlin-Dahlem.)

Über die Dehnung von Cadmiumkristallen.

Von **W. Boas** und **E. Schmid** in Berlin-Dahlem.

Mit 26 Abbildungen. (Eingegangen am 23. Januar 1929.)

Diskussion der Verfestigung von Metallkristallen auf Grund kritischer Grenzspannungen. Dehnungsversuche an Cd-Kristallen zeigen einen sehr erheblichen Einfluß der Kristallisationsgeschwindigkeit auf die Schubfestigkeit der Basistranslationsfläche. Erniedrigung der kritischen Schubspannung durch Temperung gesunder Ausgangskristalle. Kraftverlauf bei Translation und mechanischer Zwillingsbildung. Schema der Gitterbewegungen bei der Dehnung von Cd-(Zn-)Kristallen. Fließgefahr-, Dehnungs- und Höchstlastkörper.

Die Mechanismen der plastischen Deformation von Metallkristallen sind durch eine große Zahl von Arbeiten in den letzten Jahren sichergestellt worden. Stets haben sich auch hier, wo die Deformation bisweilen außerordentlich hohe Beträge erreicht, die beiden in der Kristallographie seit über 50 Jahren bekannten Deformationsvorgänge, Translation und mechanische Zwillingsbildung als wirksam erwiesen. Die Spaltung nach ebenen Kristallflächen tritt zu diesen beiden, den Zusammenhang des Versuchskörpers während der Deformationsarten bei einigen Metallkristallen als ein weiterer Vorgang bei überelastischer Beanspruchung*.

In quantitativer Hinsicht hat sich ergeben, daß der Eintritt der plastischen Deformation der Kristalle, wenigstens soweit er Spaltung und Translation betrifft, durch kritische Grenzspannungen beschreibbar ist. Im Falle des spröden Zerreißen nach glatten Flächen erwies sich die Erreichung einer für die Reißfläche charakteristischen Normalspannung als maßgebend für den Bruch**. Das Einsetzen deutlicher Translation ist an das Auftreten einer bestimmten charakteristischen Schubspannung

* Für neuere, zusammenfassende Darstellungen vgl. z. B. M. Polanyi, Die Naturwissensch. **16**, 285, 1928; C. H. Mathewson, Ann. Lecture, A. I. M. M. New York 1928; E. Schmid, Metallwirtsch. **7**, 1011, 1928. Noch nicht völlig geklärt scheinen die Verhältnisse bei raumzentrierten Metall- und Legierungskristallen. G. J. Taylor und C. F. Elam, Proc. Roy. Soc. **112**, 337, 1926; G. J. Taylor, ebenda **118**, 1, 1928; H. Gough, ebenda **118**, 498, 1928.

** E. Schmid, Proc. int. Congr. appl. Mech. Delft 1924, S. 342; M. Georgieff und E. Schmid, ZS. f. Phys. **36**, 759, 1926; G. Wassermann und E. Schmid, ebenda **46**, 653, 1928.

in Translationsfläche und -richtung gebunden*. Die Bedingung für das Auftreten mechanischer Zwillingsbildung ist zurzeit noch unbekannt.

Die für die Plastizität der Kristalle wesentlichen Grenzspannungen erwiesen sich nun aber keineswegs als konstante, von der Vorgeschichte des Kristalls (Deformationszustand) unabhängige Größen. Sie werden vielmehr durch die plastische Deformation in weitestgehendem Maße Veränderungen unterworfen, die sich in der Regel als erhebliche Anstiege äußern und durch den technischen Ausdruck „Verfestigung“ umfaßt werden**. Als wesentlich sei hervorgehoben, daß sich auch hierbei kristallographische Gesetzmäßigkeiten erkennen lassen***.

Ebenso wie die experimentell beobachteten niedrigen Werte für die kritischen Grenzspannungen eine befriedigende gittertheoretische Erklärung heute noch nicht gefunden haben, sind auch die Änderungen dieser Größen quantitativ vorläufig noch nicht deutbar. Für eine einfache Beschreibung der Beobachtungen haben sie sich jedoch als so wertvoll erwiesen, daß wir von ihrem Standpunkt aus die sehr komplizierte Erscheinung der Kristallverfestigung zunächst kurz analysieren wollen.

A. Bedeutung der Translation.

Betrachten wir zunächst den Einfluß der Translation auf kritische Normalspannung (N_k) von Spaltflächen, kritische Schubspannung (S_k) von Translationssystemen und auf die Bedingung für das Einsetzen von mechanischer Zwillingsbildung. Zu unterscheiden ist dabei noch, ob die untersuchte Reiß- bzw. Translations- oder Zwillingsene mit der wirkenden Translationsfläche (T) identisch ist oder nicht.

1. Reißfläche identisch mit T . Zn-Kristalle zeigten bei -185°C keinen Anstieg von N_k der Basis (Dehnungen bis 130%)****. Wechsel-

* E. Schmid, l. c.; P. Rosbaud und E. Schmid, ZS. f. Phys. **32**, 197, 1925; M. Georgieff und E. Schmid, l. c.; E. Schmid, ZS. f. Phys. **40**, 54, 1926; R. Karnop und G. Sachs, ZS. f. Phys. **49**, 480, 1928; M. Masima und G. Sachs, ebenda **50**, 161, 1928.

** Hierbei unterscheidet man nach M. Polanyi zweckmäßig zwischen der die Zerreißfestigkeit (Normalspannung) treffenden „Reißverfestigung“ und der „Schubverfestigung“, die in einer Erhöhung der Schubfestigkeit des Translationssystems besteht. (ZS. f. techn. Phys. **5**, 580, 1924.)

*** P. Rosbaud und E. Schmid, l. c.; R. Karnop und G. Sachs, ZS. f. Phys. **41**, 116, 1927; E. Schmid, ebenda **40**, 54, 1926; C. F. Elam, Proc. Roy. Soc. **115**, 133, 1927; R. Karnop und G. Sachs, ZS. f. Phys. **49**, 480, 1928; M. Masima und G. Sachs, l. c.

**** E. Schmid, Delfter Vortrag.

beanspruchung (Torsion) bei Zimmertemperatur führt hingegen zu Reißverfestigung auf das Zwei- bis Dreifache*. Weitere Versuche liegen nicht vor. Von den reinen Metallen dürfte Bi ein geeignetes Versuchsmaterial darstellen.

2. Reißfläche verschieden von T . N_k der Prismenfläche I. Art von Zn-Kristallen steigt durch Basistranslation bis auf das Vierfache**. Bi-Kristalle würden auch hier weiteres Material liefern.

3. Translationsfläche identisch mit T . Der Anstieg von S_k erfolgt stetig mit zunehmender Translation. Für Zn, Al, Al-Cu-Misch-

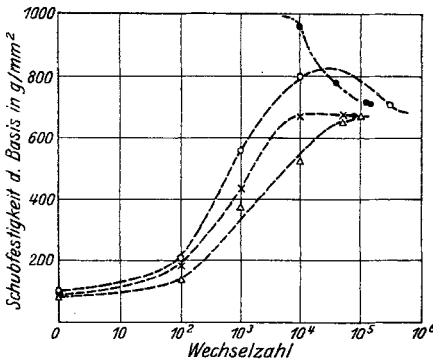


Fig. 1. Ermüdung von Zinkkristallen bei Wechseltorsion.

Verdrillungsbereich 15°: ———
20°: - - - - -

kristalle, α -Messing und durch die vorliegenden Versuche auch für Cd ist der als Verfestigungskurve bezeichnete Zusammenhang zwischen S_k und der kristallographischen Ableitung (a) bekannt***. Auch Wechselbeanspruchung (Al, Zn) bedingt zum mindesten anfänglich erhebliche Schubverfestigung****. Im weiteren Verlauf tritt dann bei Zn allerdings ein für die Ermüdung des Kristalls wesentliches Absinken der Schubfestigkeit des Translationssysteme ein (Fig. 1).

4. Translationsfläche verschieden von T . An Al-, Cu-, Ag- und Au-Kristallen erfolgt die Verfestigung einer latenten (111)-Fläche nahezu in gleichem Maße wie die der wirksamen. Der Unterschied liegt im Sinne einer stärkeren Verfestigung der latenten †. Bei Sn-Kristallen zeigt sich ein latentes Translationssystem erheblich stärker verfestigt als das kristallographisch gleichwertige wirksame ††. Deutlich stärkere Ver-

* E. Schmid, ZS. f. Metallkde. **20**, 69, 1928.

** E. Schmid, Delfter Vortrag und ZS. f. Phys. **32**, 918, 1925.

*** Siehe Anm. ***, S. 17.

**** H. J. Gough, D. Hanson und S. J. Wright, Aeron. Res. Com. R. A. M. Nr. 1025, 1926; Phil. Trans. Roy. Soc. **226**, 1, 1926; Journ. Inst. Met. **36**, 173, 1926; E. Schmid, ZS. f. Metallkde., l. c.

† G. J. Taylor u. C. F. Elam, Proc. Roy. Soc. **102**, 643, 1923; **108**, 28, 1925; C. F. Elam, ebenda **112**, 289, 1926.

†† M. Polanyi, ZS. f. Krist. **61**, 49, 1925; E. Schmid, ZS. f. angew. Math. u. Mech. **5**, 129, 1925; ZS. f. Phys. **40**, 54, 1926.

festigung des latenten Systems wird auch bei Messing- und Aluminiumbronzekristallen beobachtet*.

5. Zwillingssebene K_1 identisch mit T . Beobachtungen liegen nicht vor. Material können nur Kristalle, bei denen T keine Symmetrieebene ist, liefern.

6. K_1 verschieden von T . Mit zunehmender Abgleitung (α) erhebliche Erschwerung der mechanischen Zwillingsbildung. (Zn ** und die vorliegenden Versuche an Cd.)

In der Regel bewirkt somit die Translation eine mechanische Verfestigung des Kristalls.

B. Bedeutung der mechanischen Zwillingsbildung.

Völlig analog hätten wir nun die Bedeutung der mechanischen Zwillingsbildung zu diskutieren. Experimentelle Beobachtungen liegen hier zurzeit nur in geringstem Ausmaß vor. So wissen wir heute für Metallkristalle noch gar nichts über den Einfluß der mechanischen Zwillingsbildung auf N_k von Reißflächen; entsprechende Versuche dürften am Zn und Bi (Sb) durchführbar sein.

Über den Einfluß der mechanischen Zwillingsbildung auf S_k von Translationsflächen geben Versuche an Zn *** und vor allem die vorliegenden an Cd-Kristallen Anhaltspunkte. S_k steigt dabei un stetig und sehr erheblich an. Dieser Anstieg scheint weiterhin eine Funktion der vorangegangenen Translation zu sein, derart, daß mit zunehmender Translation (also steigender primärer Verfestigung) die weitere durch Zwillingsbildung bedingte Verfestigung abnimmt.

Über den Einfluß der mechanischen Zwillingsbildung auf weitere Zwillingsbildung, also über die Frage, ob ein Deformationszwilling oder der Ausgangskristall fester gegen mechanische Zwillingsbildung ist, liegen heute noch kaum Anhaltspunkte vor. Hier dürfte vor allem maßgebend sein, ob die durch nochmalige Zwillingsbildung erzielbare plastische Deformation dem Sinne der angelegten Spannung gleich- oder entgegengerichtet ist. Ferner hat man hier zu unterscheiden zwischen Rückbildung eines Deformationszwillings und Ausbildung eines sekundären — vom Ursprungskristall verschiedenen — Zwillings. Nach der Angabe von Czochralski,

* C. F. Elam, Proc. Roy. Soc. **115**, 148, 1927; **116**, 694, 1927; M. Masima und G. Sachs, l. c.

** E. Schmid u. G. Wassermann, ZS. f. Phys. **48**, 370, 1928. Im folgenden als l. c. bezeichnet.

*** E. Schmid und G. Wassermann, l. c.

daß es durch Rückbiegung von Zn-Bleichen gelingt, vorher erzeugte Deformationszwillinge zum Verschwinden zu bringen, dürfte die Rückbildung in diesem Falle leichter vor sich gegangen sein als die weitere Verzwillingung des Mutterkristalls*.

Jedenfalls haben, auch bezüglich der mechanischen Zwillingsbildung, alle quantitativen bisherigen Versuche erwiesen, daß dieser Deformationsvorgang mit einer Kristallverfestigung verknüpft ist.

Die Tatsache, daß diese Verfestigung mit zunehmender primärer Verfestigung durch vorangegangene Translation abnimmt, steht in auffälliger Parallele zu anderen Beobachtungen der Überlagerung zweier Verfestigungen, die durch verschiedene Ursachen entstanden sind. So zeigen Zn-Cd-Mischkristalle (die Löslichkeit für Cd reicht hier nur bis 1%), für die die Ausgangsschubfestigkeit mit zunehmendem Cd-Gehalt erheblich ansteigt, ein starkes Absinken der durch gleiche Translation bewirkten Schubverfestigung**. Dasselbe Verhalten zeigen durch Wechselbeanspruchung primär verfestigte Zn-Kristalle***. Das durch ein zweites Translationssystem abgelöste, primäre Translationssystem von α -Messingkristallen zeigt bei erneuter Betätigung nach der mit starker Verfestigung verbundenen Ruhezeit nur mehr sehr geringen Anstieg der Schubfestigkeit mit zunehmender Abgleitung. (Häufig wird sogar eine wenn auch schwache Schubentfestigung beobachtet****.) Schließlich ist als hierher gehörig noch hervorzuheben, wofür bereits Beispiele an Zn vorliegen† und an Cd-Kristallen in dieser Arbeit erbracht werden, daß die Translation im (unstetig erheblich weiter verfestigten) Deformationszwilling unter konstanter oder nur wenig steigender Schubspannung vor sich geht. Die Begrenzung der Verfestigungsfähigkeit eines Kristalls tritt in allen diesen Fällen überaus deutlich in Erscheinung.

I. Beginn der Translation von Cadmiumkristallen.

Ausgangsmaterial für die Herstellung unserer Cadmiumkristalle bildete stets Cd-„Kahlbaum“. Die Kristalle wurden nach dem Czochralskischen Ziehverfahren gewonnen; die Kühlung erfolgte mit CO_2 . Die Ziehgeschwindigkeit mußte zu sehr kleinen Werten herabgemindert

* J. Czochralski, *Moderne Metallkde.* Berlin, Springer, 1924.

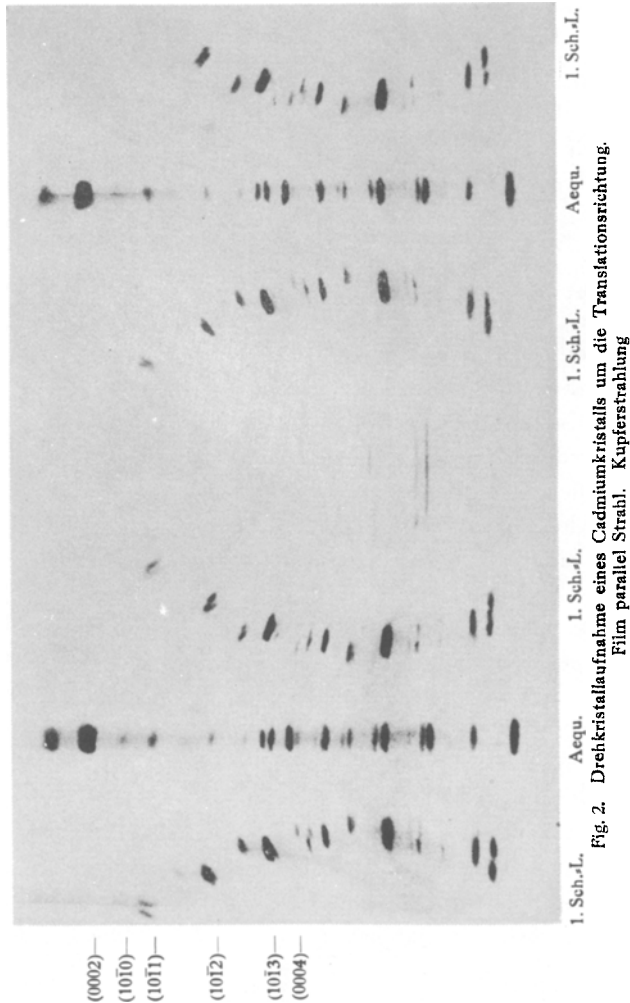
** P. Rosbaud und E. Schmid, l. c.

*** E. Schmid, *ZS. f. Metallkde.*, l. c.

**** C. F. Elam, *Proc. Roy. Soc.* **115**, 148, 1927; M. Masima u. G. Sachs, l. c.

† E. Schmid und G. Wassermann, l. c.

werden, um Kristalle mit annähernd quer zur Drahtachse liegender Basisfläche zu erhalten. Mit einer Geschwindigkeit von 20 cm/Std. wurden Kristalle nur bis zu Neigungswinkeln (χ_0) der Basis zur Längsrichtung von etwa 45° erhalten; Verlangsamung des Ziehens bis auf 5 cm/Std.



lieferte Kristalle mit χ_0 -Winkeln bis 79° und erst weitere Erniedrigung der Geschwindigkeit auf 1,5 cm/Std. führte bis zur Querlage der Basis. Die angegebenen Werte geben somit auch einen Anhalt für die Orientierungsabhängigkeit der Kristallisationsgeschwindigkeit des Cadmiums.

Auf eine weitere Bedeutung der Ziehgeschwindigkeit haben wir weiter unten noch einzugehen. Der Querschnitt der Drähte war mehr oder minder kreisförmig; sein Durchmesser lag zwischen 0,5 und 1 mm.

Die Translationselemente des Cadmiums sind dieselben wie die des Zinks. Die Basis stellt die Translationsfläche, die digonale Achse I. Art die Translationsrichtung dar. Fig. 2, die eine Drehkristallaufnahme eines weitgehend gedehnten, um die Translationsrichtung gedrehten Kristalls wiedergibt, bestätigt diesen Befund. Die aus dem Diagramm berechnete Identitätsperiode in der Translationsrichtung beträgt 3,05 Å gegenüber dem für die digonale Achse I. Art gültigen Wert von 2,98 Å. Die Verteilung der Interferenzen auf Äquator und erste Schichtlinie stimmt lückenlos mit der für $[10\bar{1}0]$ als Drehrichtung zu erwartenden überein*.

Die Dehnungsversuche wurden ausschließlich mit einem Faden-
dehnungsapparat nach M. Polanyi ausgeführt**. Die genaue Querschnittsbestimmung der Kristalle erfolgte außer durch mikrometrische Messung auch noch durch Wägung der einzelnen Versuchsstücke. Die Senkungsgeschwindigkeit der Mikrometerschraube wurde bei allen Versuchen konstant gehalten und betrug 0,0020 mm/sec (Motorantrieb). Größte Sorgfalt wurde auf schonende Einspannung der Drähte gelegt. Zur Bestimmung der frei dehnbaren Ausgangslänge (l_0) wurde von der gemessenen Klemmentfernung (L_0) die Strecke Δl_0 subtrahiert, welche der Blockierung der in den Klemmen festgehaltenen Translationsebenen entspricht (vgl. Fig. 3).

Die Bestimmung der Kristallorientierung erfolgte stets röntgenographisch, gegebenenfalls durch schiefe Aufnahmen, um die Basis zur Reflexion zu bringen. Die Genauigkeit der so erhaltenen Winkel beträgt $\pm 45'$. Daß durch die untersuchten Kristalle der mögliche Orientierungsbereich genügend dicht bedeckt ist, zeigt Fig. 4.

Der Beginn ausgiebiger Translation macht sich durch eine unvermittelte Abnahme des mit der Senkung der Mikrometerschraube einhergehenden Spannungsanstiegs bemerkbar. Häufig tritt sogar ein Absinken der Spannung (σ) mit zunehmender Dehnung (d) ein, wie es bei Fehlen erheblicher Verfestigung ja auch zu erwarten ist. Die Umrechnung der so erhaltenen Anfänge der Lastdehnungskurven auf die kristallographische Verfestigungskurve mit den Koordinaten Schubspannung (S) im Translationssystem und Abgleitung (a) zeigt indessen, daß bisweilen sogar die

* Auf den einzigen Fall, in dem sich andere Translationselemente betätigt haben, wird später hingewiesen.

** M. Polanyi, ZS. f. techn. Phys. 6, 121, 1925.

Schubspannung nach Beginn der Translation zunächst eine Abnahme aufweist (vgl. Fig. 5)*.



Fig. 3. Blockierung von Kristallteilen durch die Klemmbacken.

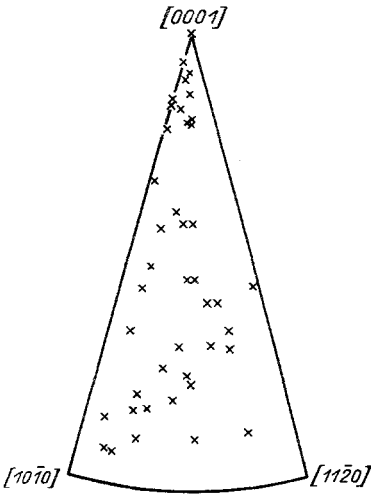


Fig. 4. Orientierung der untersuchten Cd-Kristalle.

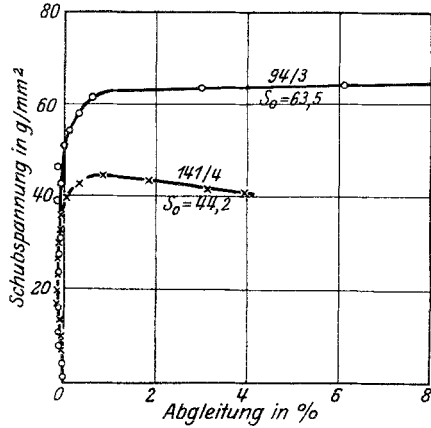


Fig. 5. Beginn der Dehnung von Cd-Kristallen mit sehr verschiedener Ausgangslage der Basis. ($65,7^\circ$ bei Kristall 141/4 und $11,2^\circ$ bei Kristall 94/3.)

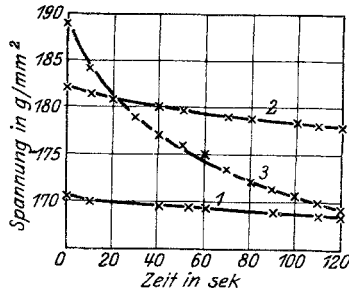


Fig. 6. Fließkurven eines Cd-Kristalls nach verschieden starker Beanspruchung. Eine Spannungsabnahme von 10 g/mm^2 entspricht hier einer Dehnung von $0,67\%$.

Auch auf Grund von Fließversuchen könnte man auf eine anfängliche Entfestigung schließen. Fig. 6 zeigt einige an einem verschieden stark

* Die Bestimmung der Abgleitung (a) aus der Dehnung ($d = \frac{\text{Endlänge}}{\text{Anfangslänge}}$) ist durch die Formel $a = \frac{1}{\sin \lambda_0} (\sqrt{d^2 - \sin^2 \lambda_0} - \cos \lambda_0)$ gegeben. ($\lambda_0 =$ Winkel zwischen Drahtachse und Translationsfläche, $\lambda_0 =$ Winkel zwischen Drahtachse und Translationsrichtung.) Als Näherung für sehr kleine Dehnungen, bei denen die Änderung der Stellungswinkel der Translationselemente noch zu vernachlässigen ist, ergibt sich $a = \frac{d-1}{\sin \lambda_0 \cos \lambda_0}$. Aus dem gleichen Grunde ist hier auch $S = \sigma \sin \lambda_0 \cos \lambda_0$ zu setzen.

belasteten Cadmiumkristall erhaltene typische Fließkurven, die in Reihenfolge ihrer Aufnahme numeriert sind. Die Dehnung ist der Bauart des Polanyischen Apparates entsprechend dabei durch die Abnahme der Spannung (mit der sie gekoppelt ist) gegeben. Man sieht, wie bei Erreichung einer bestimmten Spannung die Fließgeschwindigkeit plötzlich einen sehr hohen Betrag annimmt (Kurve 3) und der Kristall nun auch bei niedrigeren Spannungen erheblich rascher fließt als vorher (Kurve 3 durchschneidet Kurve 2).

Trotz dieser Befunde halten wir eine Entfestigung des Kristalls im Anfang der Translation nicht für erwiesen. Wie ja schon mehrmals hervorgehoben wurde und wie dies Fig. 7 an einem charakteristischen

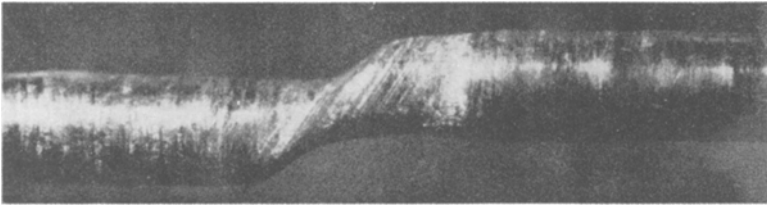


Fig. 7. Cd-Kristall. Beginn der Translation. $\nu = 12$.

Beispiel zeigt, setzt die Dehnung mit Ausbildung einer lokalen Einschnürung ein, die sowohl ein Absinken der Schubspannung wie einen Anstieg der Fließgeschwindigkeit vortäuschen kann.

Sowie die Dehnungskurven durch plötzliche Abnahme des Spannungsanstiegs mit der Dehnung einen ganz bestimmten Spannungswert als bedeutsam erkennen lassen, weisen auch die Fließkurven auf einen ausgezeichneten Spannungswert hin. Die Fortsetzung des in Fig. 6 dar-

Tabelle I. Vergleich der aus Fließ- und Dehnungskurven ermittelten Streckgrenzen.

Kristall Nr.	Streckgrenze (g/mm ²) aus	
	Fließkurve	Dehnungskurve *
62	158	136
61	189	178
54	155	159
125	106	115
	114	
144	87	99
	83	

* Die hier angegebenen Zahlen stellen das Mittel aus allen an demselben Kristall erhaltenen Einzelwerten dar.

gestellten Fließversuchs zeigt nämlich, daß es in der Regel nicht mehr gelingt, die Ausgangsspannung der Kurve 3 zu erreichen. Ihr Wert deckt sich, wie an mehreren Beispielen nachgewiesen wurde (vgl. Tabelle 1),

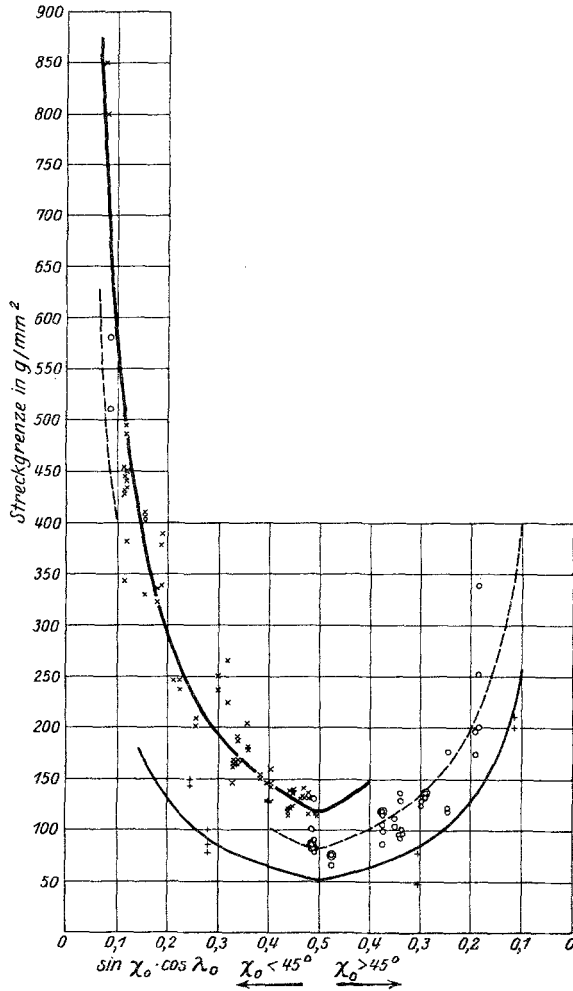


Fig. 8. Orientierungsabhängigkeit der Streckgrenze von Cd-Kristallen.

- × Ziehgeschwindigkeit 20 cm/Std.
- " " 5 bis 10 cm/Std.
- + " " 1,5 cm/Std.

mit der durch die Dehnungskurve nahegelegten Spannung, die wir — früheren Arbeiten entsprechend — als Streckgrenze des Kristalls bezeichnen. Ihre Bestimmung erfolgte im weiteren stets aus den Dehnungskurven, wobei als Abszisse jedoch statt der Dehnung die Ableitung benutzt

wurde, die sich von ihr in dem betrachteten Gebiet nur durch den orientierungsabhängigen Proportionalitätsfaktor $\sin \chi_0 \cdot \cos \lambda_0$ unterscheidet. An allen so erhaltenen Kurven ließ sich die Streckgrenze klar erkennen.

Über das Ausmaß der plastischen Deformation vor Erreichung der Streckgrenze können wir keine bündigen Angaben machen. Die entsprechenden an den Cadmiumkristallen beobachteten Abgleitungen betragen bis zu 4%.

Die Ergebnisse aller Versuche zur Ermittlung der Orientierungsabhängigkeit der Streckgrenze sind in Tabelle 2 und Fig. 8 dargestellt. Es ergibt sich eine völlige Bestätigung des bisher stets an Metallkristallen beobachteten Gesetzes, daß der Beginn deutlicher Translation an die Erreichung einer bestimmten konstanten Schubspannung im Translationssystem gebunden ist.

Auf einen Punkt ist hier aber noch besonders hinzuweisen. Der Wert der kritischen Grenzspannung ist von den Herstellungsbedingungen des Kristalls in sehr erheblichem Maße abhängig. Je langsamer der Kristall aus der Schmelze gezogen wurde, um so niedriger ist die Schubfestigkeit seines Translationssystems. Sowohl in der Tabelle wie in der Figur sind dementsprechend die Kristalle in drei Gruppen geteilt, die den verschiedenen Ziehgeschwindigkeiten entsprechen. In jeder der Gruppen für sich gilt das Schubspannungsgesetz. Der Mittelwert der kritischen Schubspannung in der Basis in Richtung einer digonalen Achse I. Art beträgt für eine Ziehgeschwindigkeit von 20 cm/Std. $58,4 \pm 0,9 \text{ g/mm}^2$, für Ziehgeschwindigkeiten von 5 bis 10 cm/Std. $39,7 \pm 1,2 \text{ g/mm}^2$ und schließlich für die langsamste benutzte Ziehgeschwindigkeit von 1,5 cm/Std. nur mehr $25,5 \pm 2,2 \text{ g/mm}^2$. Dieser Wert stellt die niedrigste an Metallkristallen bisher beobachtete Schubfestigkeit eines Translationssystems dar. Da man wohl annehmen wird, daß langsamere Kristallisation und Abkühlung zu ungestörtem Kristallbau führt, so zeigen diese Ergebnisse, daß auch mit großer Vorsicht aus der Schmelze erhaltene Kristalle noch mit Störungen durchsetzt sind, die sich in der Schubfestigkeit des besten Translationssystems in überaus deutlicher Weise bemerkbar machen (vgl. auch die weiter unten beschriebenen Temperversuche.)

Die schrägste Ausgangslage der Basis, bei der wir noch Translation beobachteten, war $4,6^\circ$. Liegt die Basis noch schräger im Kristall, so tritt bei Belastung ohne vorherige Translation mechanische Zwillingsbildung auf. Dasselbe tritt ein, wenn die Einspannlänge eines „schräg orientierten“ Kristalls kürzer ist als die durch die Klemmen blockierte

Tabelle 2. Streckgrenze von Cd-Kristallen bei Zimmertemperatur.

Kristall Nr.	Winkel zwischen Zugrichtung und Basisfläche (λ_0)	Exzentrizität der Translations- richtung (α_0)*	$\sin \lambda_0 \cos \lambda_0$	Streckgrenze (σ_g) g/mm ²	Schub- spannung (S)	Normal- spannung (N)
					in g/mm ² Basisfläche	
a) Ziehgeschwindigkeit 20 cm/Std.						
115	4,6 ⁰	4,5 ⁰	0,0794	850	67,5	5,47
				800	63,5	5,13
16	7	7,4	0,120	440	52,7	6,51
				435	52,1	6,45
				381	45,6	5,65
99	7	15,9	0,116	430	49,8	6,38
				452	52,5	6,70
				428	49,6	6,33
				342	39,7	5,08
				445	51,6	6,59
81	7,5	23,9	0,119	485	57,4	8,25
				450	53,2	7,66
				495	58,5	8,42
89	9	2,3	0,154	405	62,3	9,9
				410	63,1	10,0
				330	50,8	8,1
95	10,7	6,1	0,181	400	61,5	9,8
				335	60,6	11,6
94	11,2	8,5	0,188	323	58,4	11,1
				377	70,6	14,4
				389	73,0	14,8
93	12,9	12,5	0,212	338	63,5	12,8
				245	51,8	12,2
47	13,6	6,2	0,227	235	53,4	12,9
				245	55,6	13,5
92	16,1	14,3	0,258	200	51,6	15,5
				207	53,4	16,0
15	20,1	22,2	0,299	249	74,1	23,4
				235	70,0	27,8
14	21,2	19,1	0,319	264	84,2	34,4
				222	70,9	29,0
54	21,3	13,1	0,329	164	54,0	21,6
				167	54,9	22,0
				160	52,6	21,1
				145	47,7	19,1
101	23	3,8	0,359	177	63,5	27,0
				203	72,9	31,0
				180	64,6	27,5
61	23,5	22,8	0,337	187	63,0	29,7
				189	63,6	30,1
				168	56,5	26,7
				163	54,8	26,0

* Der Zusammenhang zwischen λ_0 , α_0 und dem Winkel λ_0 zwischen Translationsrichtung und Zugrichtung ist durch die Gleichung $\cos \lambda_0 = \cos \alpha_0 \cos \alpha_0$ gegeben.

Kristall Nr.	Winkel zwischen Zugrichtung und Basisfläche (χ_0)	Exzentrizität der Translations- richtung (ε_0)	$\sin \chi_0 \cos \lambda_0$	Streckgrenze (σ_g) g/mm ²	Schub- spannung (S)		Normal- spannung (N)
					in g/mm ² Basisfläche		
62	28,8°	21,4°	0,394	127	50,0	29,5	
				145	57,0	33,6	
52	29	18,9	0,402	144	57,8	33,9	
				128	51,4	30,0	
				145	58,2	34,1	
				143	57,4	33,6	
39	30,8	4,4	0,439	159	63,8	37,4	
				112	49,1	29,4	
				118	51,7	31,0	
63	30,8	29,5	0,382	120	52,6	31,5	
				150	57,2	39,4	
127	33,8	14,6	0,447	152	58,1	39,9	
				135	60,3	41,6	
131	33,8	16,7	0,443	137	61,2	42,4	
				138	61,6	42,6	
				123	54,9	38,0	
				120	53,1	37,1	
102	35,2	5,5	0,468	137	60,6	42,4	
				130	60,9	43,2	
				130	60,9	43,2	
				140	65,5	46,5	
125	43,3	6,2	0,496	115	57,0	54,0	
				115	57,0	54,0	
126	44,8	16,3	0,479	115	55,1	57,0	
				130	62,3	64,5	
				135	64,7	67,0	

Mittelwert $\bar{S} = 58,4 \pm 0,90$ g/mm².

b) Ziehgeschwindigkeit 5 bis 10 cm/Std.

153	4,9	3,25	0,085	580	49,3	4,24
				509	43,3	3,70
144	44,8	13,3	0,486	130	63,2	64,5
				100	48,6	49,6
				84	40,8	41,7
				84	40,8	41,7
142	47,3	10,3	0,489	78	38,1	42,3
				88	43,0	47,5
				83	40,6	44,7
				83	40,6	44,7
143	53,5	0,5	0,477	65	31,0	42,0
				74	35,3	47,9
				75	35,8	48,5

Kristall Nr.	Winkel zwischen Zugrichtung und Basisfläche (χ_0)	Exzentrizität der Translations- richtung (λ_0)	$\sin \chi_0 \cos \lambda_0$	Streckgrenze (σ_s) g/mm ²	Schub- spannung (S)		Normal- spannung (N)
					in g/mm ² Basisfläche		
141	65,7°	0°	0,375	115	43,1	96	
				85	31,9	71	
				98	36,6	81	
				118	44,2	98	
				117	43,9	97	
				104	39,0	86	
150	67,7	16,0	0,336	96	32,2	82	
				100	33,6	85	
145	68	12,6	0,339	91	30,8	78	
				135	45,8	116	
				128	43,4	110	
				93	31,6	80	
148	68,6	15,6	0,351	102	35,8	88	
				110	38,6	95	
152	71,8	0	0,297	124	36,8	112	
				127	37,7	115	
147	72,4	0	0,289	135	39,1	122	
				135	39,1	122	
				131	37,9	119	
155	74,8	14,6	0,245	175	42,8	163	
				120	29,4	112	
				118	28,9	110	
154	78,5	9,6	0,192	195	37,4	187	
				173	33,2	166	
151	79,0	10,2	0,184	251	46,2	242	
				200	36,8	193	
				333	61,3	320	

Mittelwert $\bar{S} = 39,7 \pm 1,2$ g/mm².

c) Ziehgeschwindigkeit 1,5 cm/Std.

160	15,2	15,6	0,244	150	36,6	10,3
				142	34,6	9,8
159	17,5	10,5	0,279	77	21,5	6,9
				99	27,6	8,9
				84	23,5	7,6
156	71	7,7	0,305	48	14,6	43
				78	23,8	70
157	83,3	0	0,115	200	23,0	197
				210	24,1	207

Mittelwert $\bar{S} = 25,5 \pm 2,2$ g/mm².

Länge Δl_0 (s. Fig. 3). Ausführlicher auf die mechanische Zwillingsbildung wird in einem späteren Kapitel eingegangen.

Eine Basistranslation ist beim Zugversuch außer bei völlig längs liegender Basis auch noch bei Querlage derselben ausgeschlossen, da auch hier keine Schubkomponente in ihr auftritt. In diesem Falle ist aber auch eine mechanische Zwillingsbildung ausgeschlossen, da sie bei dieser Orientierung mit einer Verkürzung in der Zugrichtung verbunden ist. Ein mit der langsamsten Ziehgeschwindigkeit erhaltener Kristall, bei dem die Basis zwischen 88° und 90° mit der Längsrichtung einschließt, ergab in einem Falle ausgiebige Translation nach der Basis mit einer Streckgrenze von 594 g/mm^2 . Ein anderes Stück desselben Kristalls blieb bis zu einer Spannung von 1640 g/mm^2 ohne jede plastische Deformation. Weitere Erhöhung der Spannung konnte mit unserem Dehnungsapparat nicht erfolgen. Ruckartig zwischen Zangen weiter gedehnt,



Fig. 9. Reißstelle eines Cd-Kristalls mit annähernder Querlage der Basis. $\varphi = 40$.

ergab das Stück ungleichmäßige Dehnung von etwa 50%. An der Oberfläche bildeten sich drei tiefe Furchen aus; Spuren von Translationsstreifungen, die keinesfalls der querliegenden Basis zugehören, waren erkennbar. Die Reißstelle zeigt das in Fig. 9 dargestellte Aussehen, an dem Dreizähligkeit deutlich hervortritt. Ätzung ergab keinerlei Anhalt für mechanische Zwillingsbildung. Der Deformationsmechanismus scheint in diesem Falle somit in einer Translation nach Pyramidenflächen bestanden zu haben. Hervorheben möchten

wir aber nochmals, daß mindestens bis zu Stellungswinkeln der Basis von 83° zur Zugrichtung die Basistranslation den Normalfall darstellt. Ebenso wie bei Zink ist auch bei Cadmium die Basis durch ein außerordentlich ausgeprägtes Minimum der Schubfestigkeit vor den übrigen Kristallflächen ausgezeichnet. Die Prisma I. Art, die als Translationsfläche bisher nicht beobachtet ist, besitzt in einer digonalen Achse I. Art mindestens den 5,5fachen Wert, wie sich aus der Orientierung des sehr schräg orientierten Kristalls Nr. 115 ergibt.

Die oben beschriebene Tatsache, daß bei Verlangsamung der Ziehgeschwindigkeit (bei der Kristallherstellung) die Schubfestigkeit der Basis so außerordentlich stark sinkt, läßt vermuten, daß ähnliche Wirkungen

auch durch nachträgliches Glühen der Kristalle erzielt werden können. Die kleinere Ziehgeschwindigkeit ist ja außer mit langsamerer Kristallisation auch mit einem längeren Verbleiben des Kristalls auf hohen Temperaturen verbunden. In der Tat konnte auch durch Temperung von Kristallen, die mit der größten von uns benutzten Geschwindigkeit gewonnen waren, ein sehr erheblicher Abfall der Schubfestigkeit der Basis (bis um 67 %) erreicht werden. Eine Änderung der Kristallorientierung ist dabei in keinem Falle erfolgt, wie Röntgenaufnahmen der getemperten Kristalle beweisen. Tabelle 3 gibt die Ergebnisse der mechanischen Versuche wieder. Während die mit einer Geschwindigkeit von etwa 7 cm/Std. hergestellten Kristalle nach der angewandten Glühung keinerlei Entfestigung zeigen, zeigt sich diese bei allen rascher gezogenen Kristallen. Ihr Ausmaß nimmt mit der Dauer der Glühung zu.

Ähnliche Beobachtungen über Glühwirkung sind von I. W. Obreimow und L. W. Schubnikoff auch an Steinsalzkristallen gemacht worden*.

Tabelle 3. Streckgrenze von getemperten Cd-Kristallen.

Kristall Nr.	Zieh- geschwindigkeit	Temperatur	Streckgrenze (g/mm ²)		Schub- festigkeit (S ₀) der Basis nach der Temperatur	Entfestigung %	
			vor der Temperatur	nach			
141	5 bis 10 cm/Std.	16 Std. 275° C	106 **	{ 108 113	50,5 42,3	- 1,9 - 6,6	
142			83	{ 84	41,0	- 1,2	
81	477		{ 335 427	39,8 50,6	+ 29,8 + 10,5		
127	133		{ 93 93	41,6 41,8	+ 30,1 + 30,1		
52	20 cm/Std.		144	{ 78 88	31,3 35,3	+ 45,8 + 38,9	
54			159	{ 75 76	24,6 25,0	+ 52,8 + 52,2	
94			24 Std. 275° C.	368	{ 171 168	32,1 31,6	+ 53,5 + 54,4
16			419	{ 138 187	16,6 22,4	+ 67,0 + 55,5	

II. Verlauf der Translation.

Ebenso wie der Beginn der Translation erweist sich auch ihr weiterer Verlauf von der kristallographischen Orientierung der Kristalle maßgeblich

* I. W. Obreimow und L. W. Schubnikoff, ZS. f. Phys. **41**, 907, 1927.

** Die in dieser Spalte angegebenen Zahlen stellen das Mittel aus allen an demselben Kristall erhaltenen Werten dar.

beeinflusst. Die üblichen Dehnungskurven mit den Koordinaten Dehnung und Spannung pro mm^2 Ausgangsquerschnitt sind in völliger Analogie zu früheren Versuchen an Zink-, Aluminium- und Messingkristallen in sehr

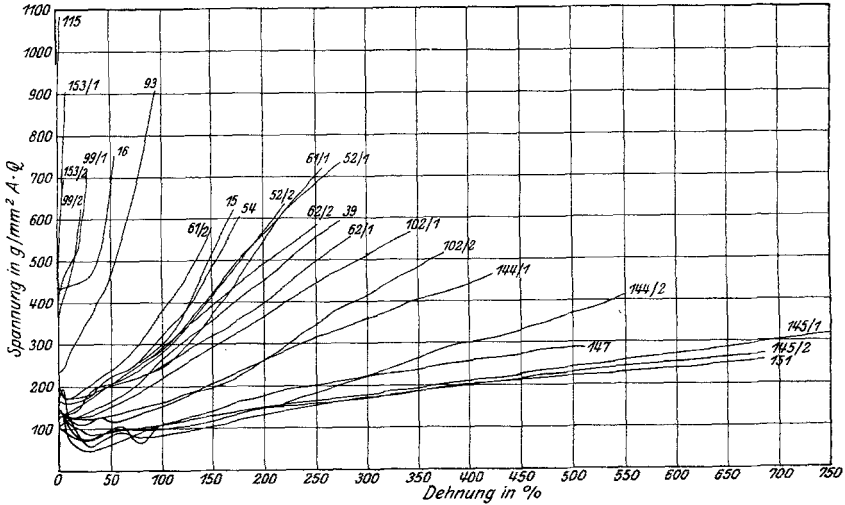


Fig. 10. Dehnungskurven von Cd-Kristallen. Die Kurven beziehen sich auf reine Basistranslation. Die Kristallnummer ist jeweils angegeben.

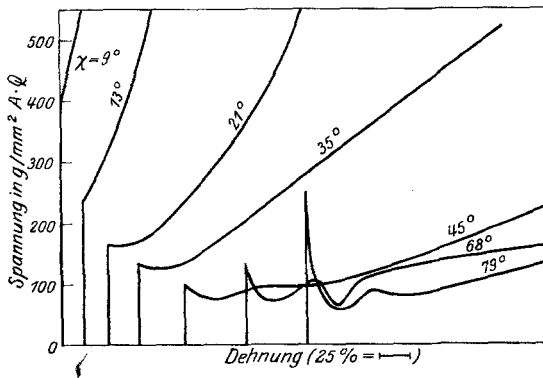


Fig. 11.

Auswahl aus Fig. 10. Dehnungskurven der Kristalle 89, 93, 54, 102/1, 144/2, 145/1 und 151.

starkem Maße von der Ausgangslage der Translationselemente abhängig. Fig. 10 stellt den Großteil der erhaltenen Kurven dar*; in Fig. 11 ist der besseren Übersicht halber eine Auswahl nebeneinander gezeichnet. Je kleiner

* Nicht eingetragen sind nur fünf Kurven, die sich auf sehr schräg orientierte Kristalle beziehen. Sie fallen mit gezeichneten Kurven fast völlig zusammen und würden die Unübersichtlichkeit der Figur nur noch weiter erhöht haben.

der Neigungswinkel der Basis zur Zugrichtung ist, um so steiler verläuft die Kurve. Zufolge des ausgedehnten Orientierungsbereichs der untersuchten Kristalle ist die Spannungs-Dehnungsebene fast vollständig mit Kurven bedeckt. Alle Kurven beziehen sich auf reine Basistranslation; ihre Endpunkte sind durch das erstmalige Auftreten mechanischer Zwillingsbildung gegeben, die sich durch ein ruckartiges Absinken der Spannung zufolge der plötzlichen Dehnung bemerkbar macht.

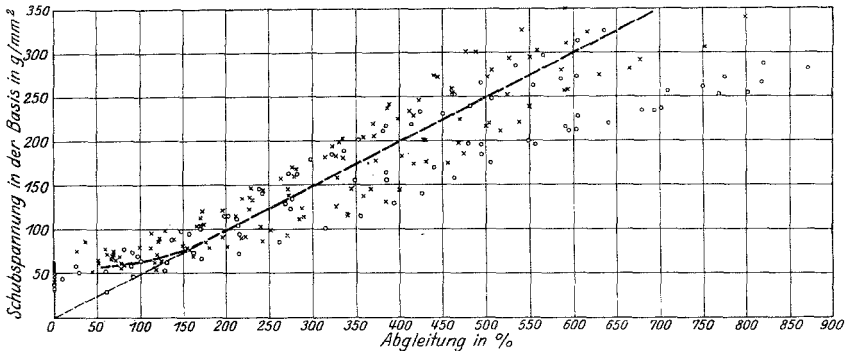


Fig. 12. Schubverfestigung bei der Dehnung von Cd-Kristallen.

× Ziehgeschwindigkeit 20 cm/Std.,
○ 5 bis 10 cm/Std.

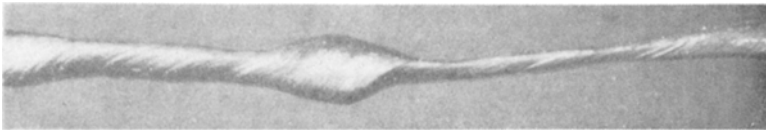


Fig. 13. Gedehnter Cd-Kristall mit Knoten. $V = 12$.

Übergang auf die Verfestigungskurve mit den kristallographischen Koordinaten Abgleitung (a) und Schubspannung im Translationssystem (S) führt auch hier wie bei den oben erwähnten Kristallen das ganze Spektrum der Dehnungskurven mit gewisser Streuung auf eine einheitliche Form zurück („Verfestigungskurve“, Fig. 12). Für Abgleitungsbeträge größer als 200% ist die Mittelkurve gut durch die Gerade $S = 50a$ dargestellt. Nach kleineren Abgleitungen hin verlaufen die Kurven erheblich flacher, in den ersten 100% sogar fast horizontal. Dies dürfte wohl durch die oben beschriebene Ungleichmäßigkeit der Dehnung zu Beginn der Translation (Einschnürung) bedingt sein. Desgleichen halten wir die Streuung der Verfestigungskurven zum mindesten zu einem großen

Teil durch Ungleichmäßigkeit der Dehnung auch im weiteren Verlauf (Knotenbildung*) verursacht (Fig. 13).

Ein Einfluß der Ziehgeschwindigkeit auf die Verfestigungskurve läßt sich aus diesen Beobachtungen nicht mit Sicherheit erkennen. Allerdings liegen die Kreise, die sich auf Kristalle der zweiten (langsameren) Ziehgeschwindigkeitsgruppe beziehen, überwiegend an der unteren Grenze des Streubereichs und deuten so vielleicht doch auf eine geringere Schubverfestigung durch Translation bei diesen Kristallen hin.

III. Mechanische Zwillingsbildung.

Auf die Basistranslation folgt bei der Dehnung von Cadmiumkristallen, so wie dies auch bei Zink (und Zinn) beobachtet wird, mechanische Zwillingsbildung. Als Zwillingsebene ist von C. H. Mathewson und A. I. Phillips wie bei Zink die $(10\bar{1}2)$ -Ebene bestimmt worden**. Eine vollständige experimentelle Bestimmung der Zwillingselemente steht noch aus. In

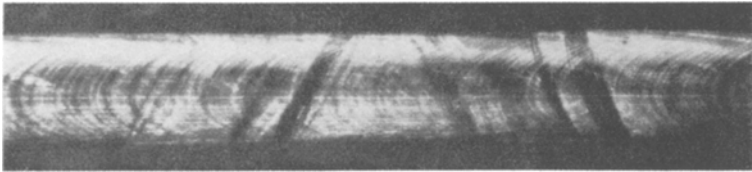


Fig. 14. Gedehnter Cd-Kristall mit Deformationszwillingen. $V = 12$.

Analogie mit der gemeinsam mit G. Wassermann durchgeführten Bestimmung an Zink*** wird man wohl auch hier die $(10\bar{1}2)$ -Ebene als 2. Kreisschnittsebene und somit einen Betrag der Schiebung $s = 0,1750$ erwarten.

Die Deformationszwillinge selbst sind in der Regel schmale, sehr häufig gar nicht das ganze Kristallband durchsetzende Streifen (Fig. 14). Meist treten mehrere, im Höchstfall vier, verschiedene Systeme solcher Zwillingstreifen auf. Ihre Ausbildung erfolgt in einem größeren Bereich der Spannung derart, daß zunächst nur vereinzelt kleine Lamellen entstehen, bei einer bestimmten höheren, offenbar eine Stabilitätsgrenze darstellenden Spannung sodann eine ausgeprägte Häufung von Verzwilligungen eintritt****. In den Dehnungskurven, in denen der Ausbildung jeder

* Vergleiche auch H. Mark, M. Polanyi und E. Schmid, ZS. f. Phys. **12**, 58, 1922.

** C. H. Mathewson und A. I. Phillips, Amer. Inst. Min. Met. Eng., Techn. Publ. Nr. 53, 1928.

*** E. Schmid und G. Wassermann, l. c.

**** Vgl. auch W. Voigt, Ann. d. Phys. **60**, 638, 1919.

Zwillingslamelle ein unstetiges Absinken der Spannung entspricht, ist dieser Tatbestand deutlich wiedergegeben (Fig. 15).

Vergleicht man nun die der ausgiebigen Zwillingsbildung zugehörigen, auf den augenblicklichen Querschnitt bezogenen Spannungen miteinander, so findet man, daß sie keineswegs konstant sind. Je größer die voran-

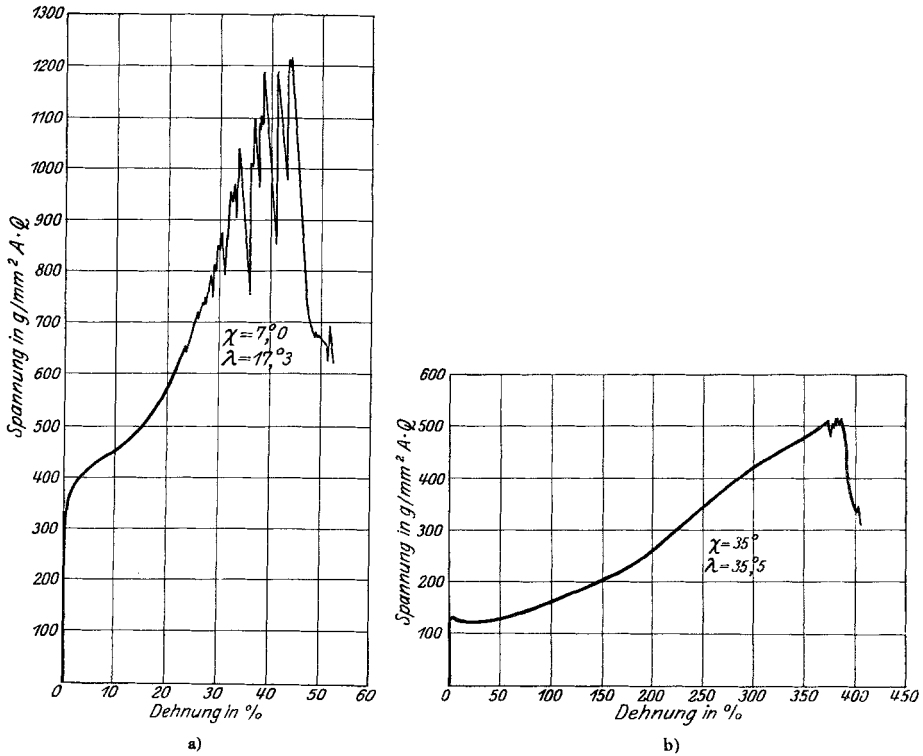


Fig. 15. Gesamtdehnungskurven von Cd-Kristallen. Die Ausbildung von Deformationszwillingen äußert sich in sprunghaftem Absinken der Spannung.

a) Kristall 99 mit sehr schräg liegender Basis und geringer Translation.

b) Kristall 102 mit unter 35° liegender Basisfläche und ausgiebiger Dehnung durch Translation. Das starke Absinken der Spannung am Ende der Kurve betrifft sekundäre Basistranslation in Zwillingslamellen.

gegangene Basistranslation ist, um so höher liegt die zur mechanischen Verzwilligung erforderliche Spannung. Am deutlichsten tritt die hier herrschende Gesetzmäßigkeit zutage, wenn man die vorangegangene Translation wieder durch die Ableitung ausdrückt. Tabelle 4 und Fig. 16 zeigen die erhaltenen Ergebnisse*. In Erweiterung des für

* Zuweilen traten im Verlauf der Dehnung eines Kristalls mehrere, bis zu drei, Häufungsstellen von Zwillingsbildung auf. Die entsprechenden Punkte sind dann in der Figur durch gestrichelte Linien verbunden.

Tabelle 4.

Mechanische Zwillingsbildung von Cd-Kristallen.

a) Ziehgeschwindigkeit 20 cm/Std.

Kristall Nr.	Spannung bei Zwillings- bildung $\sigma_{Zw.}$ (g/mm ²)	Dehnung % %	Effektive Spannung bei Zwillings- bildung $\sigma_{eff. Zw.}$ (g/mm ²)	Ableitung % %	Endwinkel der Translationselemente		$\frac{\sigma_{max}^*}{\sigma_{Zw.}}$
					λ_e	λ_e	
35/1	1260	0	1260	0	3,2°	10,4°	1,28
35/2	855	0	855	0			1,81
35/3	781	0	781	0			—
35/4	887	0	887	0			>1,21
35/5	1070	0	1070	0			—
35/5	953	0	953	0	—		
115/4	1560	0	1560	0	4,6	6,4	—
115/2	1207	2,5	1240	32	4,5	6,3	—
99/1	844	4,0	875	33	6,8	16,7	>1,33
	970	4,6	1010	58	6,7	16,5	—
	1042	4,9	1090	74	6,7	16,5	—
115/3	1170	3,8	1210	48	4,4	6,2	>1,08
115/1	1740	8,0	1880	113	4,3	6,1	1,04
81	774	15	890	124	6,5	21,7	>1,05
	809	17,5	950	145	6,4	21,1	—
47	915	44	1320	192	9,4	10,4	>1,47
89	1081	32,5	1430	206	6,8	7,1	1,15
99/3	875	30	1140	238	5,4	13,3	1,39
	1040	33	1380	261	5,3	12,9	—
99/2	935	33,5	1250	268	5,2	12,8	1,22
	1065	36	1450	283	5,1	12,7	—
	1140	38	1570	299	5,1	12,5	—
61/2	602	155	1530	414	9,0	12,1	1,08
	650	158	1680	425	—	—	—
16	824	56	1285	468	4,5	6,5	0,94
52/2	632	220	2020	477	8,8	10,1	0,83
93	1158	112	2460	515	6,1	8,6	1,13
54	630	183	1780	520	7,4	8,6	1,07
	672	185	1920	525	7,3	8,6	—
62/2	588	257	2100	540	8,3	10,8	1,07
	621	265	2270	552	8,1	10,5	—
15	763	193	2240	587	6,8	9,8	1,04
	778	194	2280	590	6,7	9,8	—
102/1	573	345	2540	624	7,5	7,6	0,69
62/1	603	309	2470	642	7,2	9,5	1,06
39	677	323	2860	648	6,9	7,0	0,83
52/1	790	303	3180	652	6,9	8,0	0,92
102/2	511	374	2420	677	7,0	7,1	1,01
	517	381	2480	685	6,9	7,0	—
61/1	860	305	3480	800	5,8	7,6	0,91

* Ein >-Zeichen vor einem in dieser Spalte enthaltenen Wert bedeutet, daß in diesem Falle die Höchstlast den Meßbereich des benutzten Dehnungsapparats überstieg.

b) Ziehgeschwindigkeit 5 bis 10 cm/Std.

Kristall Nr.	Spannung bei Zwillings- bildung $\sigma_{Zw.}$ (g/mm ²)	Dehnung %	Effektive Spannung bei Zwillings- bildung $\sigma_{eff. Zw.}$ (g/mm ²)	Ableitung %	Endwinkel der Translationselemente		$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{Zw.}}$ *
					λ_e	λ_e	
153	1010	9,0	1100	105	4,5°	5,4°	1,15
147	288	521	1790	611	8,8	8,8	0,89
144/1	501	470	2860	705	7,1	7,3	0,97
151	259	709	2100	795	7,0	7,0	1,00
145/2	274	687	2160	802	6,8	6,8	0,85
144/2	408	554	2670	825	6,2	6,3	1,02
145/1	306	762	2640	882	6,2	6,2	0,60

Beginn (und Verlauf) der Translation beobachteten Tatbestandes zeigt sich auch hier wieder ein Einfluß der Herstellungsbedingungen der Kri-

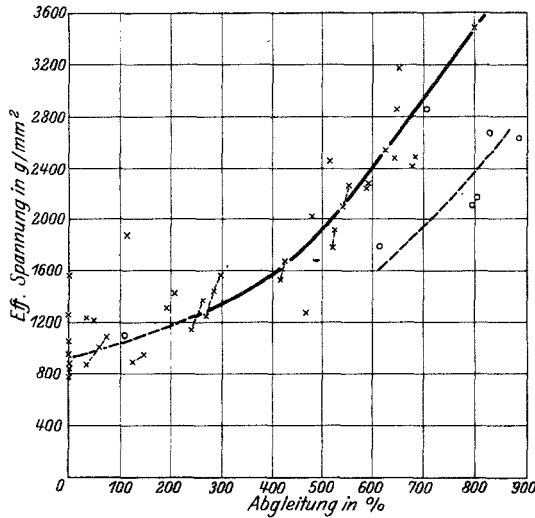


Fig. 16.

Erschwerung der mechanischen Zwillingsbildung von Cd-Kristallen durch vorangegangene Basistranslation. Grenzkurve der mechanischen Zwillingsbildung.

× Ziehgeschwindigkeit 20 cm/Std,
○ 5 bis 10 cm/Std.

stalle. Die für den Eintritt der Zwillingsbildung notwendige Spannung nach gleicher Ableitung ist bei den langsamer gezogenen Kristallen deutlich kleiner.

Welcher Art das exakte Initialgesetz für die Ausbildung der Deformationszwillinge ist, kann man auf Grund dieser Beobachtungen noch

* Siehe Fußnote auf voriger Seite.

nicht angeben. Die Gitterlage in den gedehnten Kristallen und in denen, die ohne vorherige Translation Verzwillingung geben, ist nämlich, wie die in die Tabelle 4 aufgenommenen Winkel (χ_e und λ_e) von Basis und Translationsrichtung zur Drahtachse zeigen, in allen Fällen zu ähnlich. Jedenfalls geht aus der Tatsache, daß im weitaus größten Teile der möglichen Gitterlagen von Cadmiumkristallen der primäre Vorgang der Dehnung

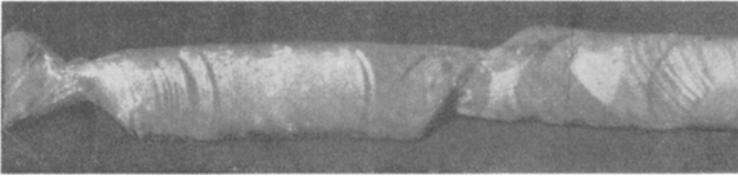


Fig. 17. Cd-Kristall. Translation im Zwilling. $V = 12$. Geätzt in verd. HCl.

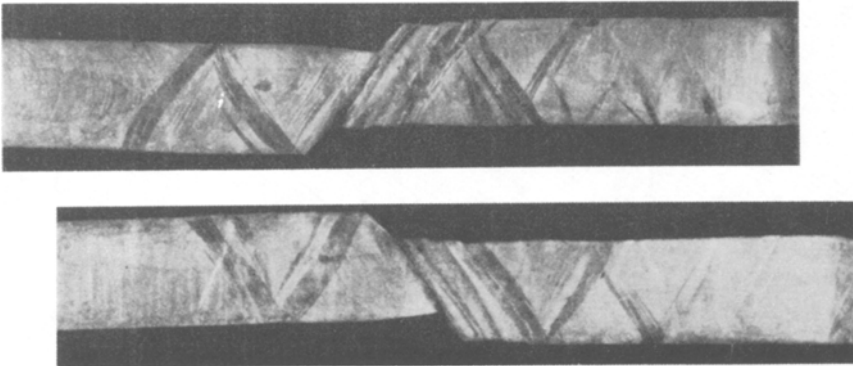


Fig. 18. Gedehnter Cd-Kristall mit schmalen Deformationszwillingen und sekundärer Basis-translation. Blick auf das Band von beiden Seiten. $V = 12$. Geätzt in verd. HCl.

die Translation ist, hervor, daß die zur Einleitung der Zwillingsbildung erforderlichen Kräfte bei weitem die zur Ausbildung von Translation nötigen übersteigen.

Völlig analog wie bei gedehnten Zinkkristallen tritt auch bei Cadmiumkristallen bei weiterer Beanspruchung Translation nach der Basis in den Zwillingsstreifen auf (Nachdehnung). Zuzufolge der an Cadmium nur schmalen Deformationszwillinge erreicht diese Dehnung durch sekundäre Translation hier meist nur sehr geringe Beträge (Fig. 17 und 18). Der einzige Fall, in dem wir eine Nachdehnung von etwa 6 mm Länge erhielten, ist in Fig. 19 wiedergegeben. Es handelt sich hier um den sehr schräg orientierten Kristall Nr. 35 ($\chi_0 = 3,2^\circ$), der bei der Dehnung

zunächst ohne vorherige Translation mehrfach ausgiebige Zwillingsbildung gezeigt hatte (vgl. die Dehnungskurve in Fig. 20). Neuerliche Zwillingsbildung im Nachdehnungsfaden führte den Bruch herbei.

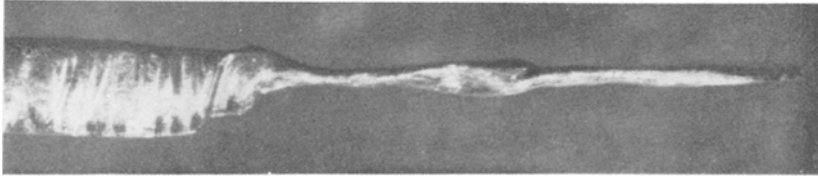


Fig. 19. Lange Nachdehnung eines Cd-Kristalls. $V = 12$.

In Fig. 21 ist schematisch eine Darstellung der Gitterbewegungen bei der Dehnung von Cadmium-(Zink-) Kristallen gegeben. ϑ_0 stellt die Orientierung des Ausgangskristalls dar. Die der primären Basistranslation entsprechende Gitterdrehung ist durch den Größtkreisbogen $\vartheta_0\vartheta_1$ gegeben; die un stetigen, theoretisch möglichen Gitterumklappungen bei der darauffolgenden ersten Zwillingsbildung sind durch Übergang der Drahtachse von ϑ_1 nach ϑ_1^I , ϑ_1^{II} , ..., ϑ_1^{VI} gekennzeichnet. Für die Lage ϑ_1^I ist sodann sekundäre Basistranslation ($\vartheta_1^I\vartheta_2$) und schließlich erneute (sekundäre) Zwillingsbildung (Sprung von ϑ_2 nach ϑ_2^V) eingetragen. Wie oben bereits erwähnt, werden von den sechs Möglichkeiten primärer mechanischer Zwillingsbildung vier in der Tat beobachtet*.

In guter Übereinstimmung mit den Befunden an Zink steht ferner die Tatsache, daß die mechanische Zwillingsbildung mit einer beträchtlichen Schubverfestigung der Basis verknüpft ist. Trotzdem im Deformationszwilling die Translationselemente plötzlich in

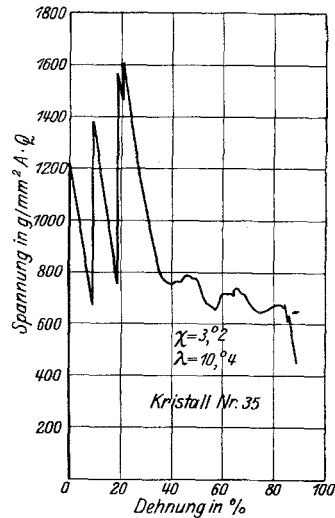


Fig. 20.
Dehnungskurve eines Cd-Kristalls. Primäre Translation fehlt. An die ausgiebige mechanische Zwillingsbildung schließt sich sekundäre Basistranslation von erheblichem Ausmaß.

* Bemerkte sei, daß die beiden bisher nicht aufgefundenen Arten von primären Zwillingsstreifen (Pole der Zwillings Ebenen V und VI) durch ein Minimum der Schubspannung in der Zwillings Ebene ausgezeichnet sind, während in den übrigen die Schubkomponente in der Gleitrichtung ungefähr gleich groß ist.

eine sehr günstige Lage zur Zugrichtung gelangen ($\chi \sim \lambda \sim 60^\circ$ gegenüber etwa 8° im gedehnten Band) steigt die Spannung in vielen Fällen bei

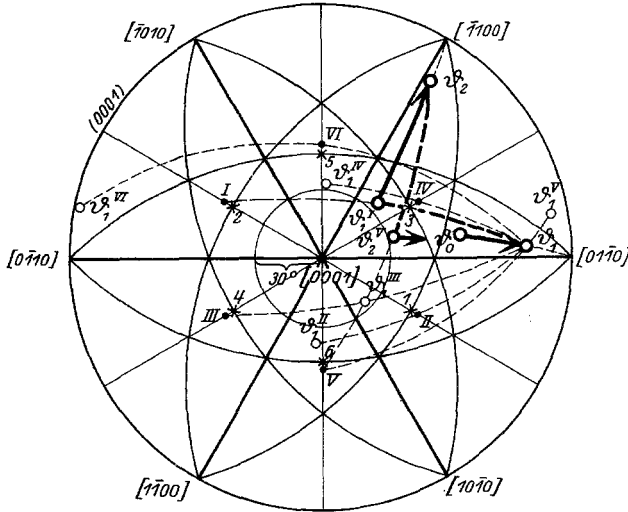


Fig. 21. Schema der Gitterbewegungen bei der Dehnung von Cd-(Zn-) Kristallen.

weiterer Beanspruchung über den vor der Zwillingsbildung erreichten Wert an. Die Schubverfestigung der Zwillingsbildung überwiegt also

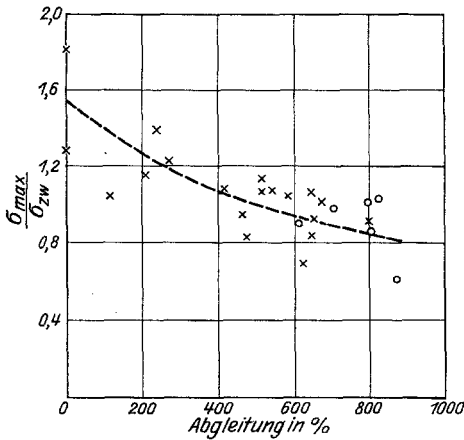


Fig. 22. Schubverfestigung der Basis von Cd-Kristallen durch mechanische Zwillingsbildung.

in diesen Fällen die geometrische Orientierungsentfestigung. Der ein Maß der Schubverfestigung darstellende Quotient aus der nach der Zwillingsbildung erreichten Höchstspannung (σ_{\max}) und der zur Zwillingsbildung führenden Spannung ($\sigma_{zw.}$) ist in der Tabelle 4 ebenfalls verzeichnet. Aus den Zahlen und der Fig. 22 geht hervor, daß mit zunehmender Abgleitung während der vorangegangenen Haupttranslation, also zunehmender primärer Ver-

festigung, die weitere durch Zwillingsbildung bewirkte Schubverfestigung abnimmt. Diese beträgt im Mittel 200 % ($\sin 60^\circ \cdot \cos 60^\circ \sim 3 \cdot \sin 8^\circ \cdot \cos 8^\circ$)

gegenüber 100 %, die sich bei Zinkkristallen ergeben hatten, ein Unterschied, der möglicherweise durch die außerordentliche Kleinheit der Zwillingslamellen in den Cadmiumkristallen mitbedingt ist.

Wie aus den Dehnungskurven der Nachdehnung sich ergibt, verläuft diese sekundäre Basistranslation im Deformationszwilling bei den Cadmiumkristallen in 19 von 23 untersuchten Fällen unter Schubverfestigung; in vier Fällen war die Schubfestigkeit der Basis konstant geblieben oder leicht gesunken*. Dieses Verhalten stellt einen immerhin deutlichen Unterschied gegenüber den Zinkkristallen dar, bei denen in 9 von 12 Fällen die Nachdehnung unter geringer Schubverfestigung der Basis verlief.

IV. Geometrische Darstellungen.

Zum Schluß seien der besseren Übersicht halber noch einige geometrische Darstellungen gegeben, die die Orientierungsabhängigkeit technologisch wichtiger Größen des Cd-Kristalls betreffen. Die durch Einsetzen ausgiebiger Basistranslation bedingte Streckgrenze (σ_s) ist bei konstanter Grenzschubspannung (S) durch den Ausdruck $\sigma_s = \frac{S}{\sin \chi \cdot \cos \lambda}$ gegeben, worin χ , λ wie oben die Stellungswinkel der Translations-elemente bedeuten. Analog schon früher gegebenen Darstellungen für Zink und flächenzentrierte Kristalle** ist in Fig. 23 für den Cd-Kristall der Schnitt des Fließgefahrkörpers mit den beiden Prismenflächen I. und II. Art wiedergegeben***. Die sehr ausgeprägte Orientierungsabhängigkeit der Streckgrenze tritt deutlich zutage; der festeste Kristall übertrifft den weichsten um mindestens das 6,5fache. Der Schnitt des Fließgefahrkörpers mit der Basis ist in der Figur nicht angegeben. Das Eintreten der plastischen Deformation erfolgt hier durch mechanische Zwillingsbildung, für die ja das Initialgesetz noch unbekannt ist. Aus dem gleichen Grunde fehlt auch der Abschluß des Körpers für mit der Basis nahe zusammenfallende Richtungen****. Auch

* Abnahme der Last während der Nachdehnung um 50 % zeigt bei einer Ausgangslage der Translationselemente von 60° zur Zugrichtung konstante Schubfestigkeit, Abnahme über 50 % Schubverfestigung, Abnahme unter 50 % Schubverfestigung an (E. Schmid, ZS. f. Phys. **22**, 328, 1924).

** E. Schmid, ZS. f. Metallkde. **19**, 154, 1927.

*** Die Länge des Radiusvektors vom Mittelpunkt aus gibt die Größe der Streckgrenze für die betreffende Richtung.

**** Auch beim Zn-Kristall tritt in diesem Orientierungsbereich mechanische Zwillingsbildung auf. Die seinerzeit auf Grund der Annahme von Translation nach der Prismenfläche gegebene Darstellung des Fließgefahrkörpers für Zimmertemperatur ist also für diese Orientierungen fehlerhaft.

parallel der hexagonalen Achse ist der Körper noch offen. Für die bei dieser Orientierung eintretenden Translationen nach höher indizierten Kristallflächen liegen Messungen noch nicht vor.

Durch Kombination der für die Basistranslation ermittelten Verfestigungskurve (Fig. 12) mit der den Beginn der mechanischen Zwillingsbildung nach (ausgiebiger) Translation beschreibenden Grenzkurve (Fig. 16), können die Endpunkte der auf die Basistranslation bezüglichen techno-

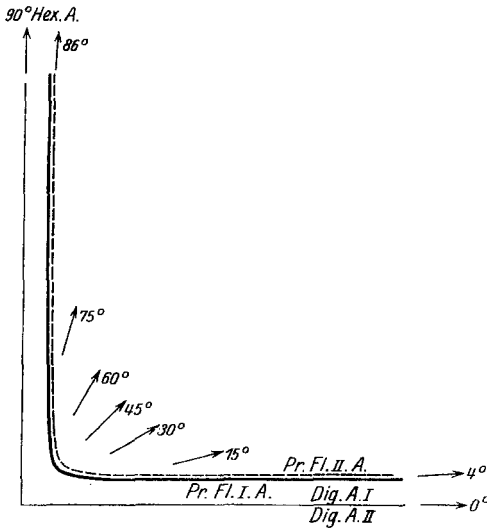


Fig. 23. Fließgefahrkörper des Cd-Kristalls. Schnitt mit den Prismenflächen I. und II. Art.

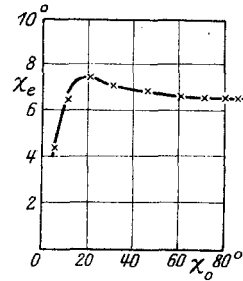


Fig. 24. Aus Verfestigungskurve und Grenzkurve der mechanischen Zwillingsbildung ermittelter Endwinkel (χ_e) der Basis von Cd-Kristallen als Funktion der Ausgangslage (χ_0).

logischen Dehnungskurven rechnerisch ermittelt werden. Hierzu werden zunächst aus der Verfestigungskurve ($S - a$ -Kurve) die Kurven Effektivspannung-Ableitung nach den Formeln

$$\sigma_{\text{eff}} = 2 \cdot \frac{\sin \lambda_0}{\sin \chi_0} \cdot \frac{S}{\sin 2\lambda},$$

$$\cot \lambda = \cot \lambda_0 + \frac{\sin \chi_0}{\sin \lambda_0} \cdot a$$

berechnet*. Der Schnitt dieser Kurvenschar mit der für die Zwillingsbildung gültigen Grenzkurve liefert die den verschiedenen Kristallorientierungen zugehörigen Grenzableitungen. Aus diesen erhält man weiter unter Benutzung der letzten Gleichung und der Dehnungsformel

* Die mit dem Index 0 versehenen Stellungswinkel beziehen sich auf die Ausgangslage der Translationselemente.

$d = \frac{\sin \lambda_0}{\sin \lambda} = \frac{\sin \chi_0}{\sin \chi}$ Orientierung und Dehnung des Kristalls bei Einsetzen der Zwillingsbildung. Die für $\chi = \lambda$ durchgeführte Rechnung führt auf den in Fig. 24 dargestellten Zusammenhang zwischen Ausgangs- und Endwinkel der Basis-(Translations-)fläche*. Die experimentell gefundene ungefähre Konstanz der Endwinkel der Basis (Tabelle 4)** findet so für χ_0 -Winkel größer als 10° ihre einfache Begründung.

In Fig. 25 ist der Schnitt des Dehnungskörpers wiedergegeben. Der Unterschied zwischen den Prismenflächen I. und II. Art ist

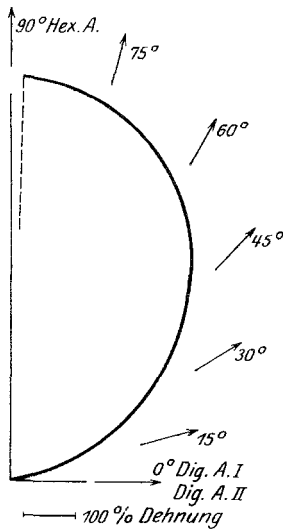


Fig. 25.
Dehnungskörper des Cd-Kristalls.
Schnitt mit einer Prismenfläche.

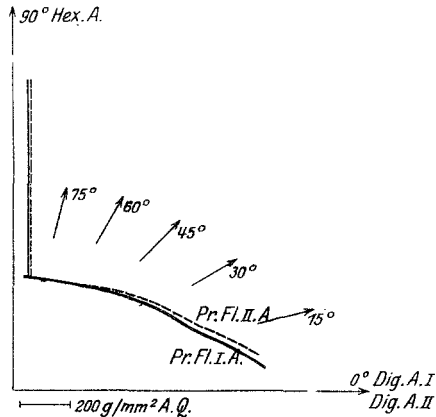


Fig. 26.
Festigkeitskörper (Höchstlast) des Cd-Kristalls.
Schnitt mit Prismenflächen I. und II. Art.

zu gering, um noch darstellbar zu sein. Der Dehnungskörper stellt also im wesentlichen einen Rotationskörper um die hexagonale Achse dar. Für Richtungen in der Basis und bis 4° davon abweichende beträgt die (auf Basistranslation bezügliche) Dehnung Null. Ihr Wert steigt mit zunehmendem Winkel zur Basisfläche und erreicht bei 85° Neigungswinkel 782%. In unmittelbarer Nähe der hexagonalen Achse muß sodann, dem

* Die Kurve gilt mit vernachlässigbaren Fehlern auch noch für die größtmöglichen Abweichungen von χ und λ .

** Vgl. auch die früheren Beobachtungen am Zinkkristall von H. Mark, M. Polanyi und E. Schmid, l. c.

Versagen der Basistranslation und der Ausbildung mehrerer Pyramidentranslationen entsprechend, ein schroffes Absinken der Dehnung erfolgen.

Entnimmt man dem Schnitt der $\sigma_{\text{eff}} - \alpha$ -Kurven mit der Grenzkurve der Zwillingsbildung außer der bisher allein benutzten Grenzabgleitung noch die dazugehörige Grenzeffektivspannung ($\sigma_{\text{eff}_{\text{Zw.}}}$), so läßt sich mit Hilfe der eben berechneten Dehnung auch der Höchstlastkörper bestimmen. Seinen Schnitt mit den Prismenflächen I. und II. Art zeigt Fig. 26. Die Abweichungen von einem Rotationskörper um die hexagonale Achse sind in dem Bereich, in dem Basistranslation auftritt, nur gering. Für Orientierungen nahe der Basis (mechanische Zwillingsbildung) und parallel der hexagonalen Achse (Translation nach höher indizierten Ebenen) ist auch dieser Körper noch unbestimmt. Für Richtungen, die von der hexagonalen Achse nur um 8 bzw. 9° und noch kleinere Winkel abweichen, stellt die Streckgrenze die im Verlauf des Versuchs erreichte höchste Last dar (vgl. Fig. 10 und 11). Für diese Orientierungen ist daher außer der nach Abschluß der Basistranslation erreichten Höchstlast auch noch der Schnitt des Fließgefahrkörpers mit angegeben.

Frühere modellmäßige Darstellungen der Höchstlast und Dehnung liegen für Kupferkristalle von J. Czochralski* (rein empirisch), für Aluminiumkristalle von v. Göler und G. Sachs** (berechnet auf Grund der Verfestigungskurve und Höchstlastbedingung) vor.

Zusammenfassung.

1. Die Verfestigung von Kristallen wird auf Grund der für die Mechanismen der plastischen Kristalldeformation gültigen Gesetzmäßigkeiten (kritische Grenzspannungen) besprochen.

2. Eine röntgenographische Bestimmung der Translationselemente des Cadmiums bestätigt die bis jetzt stets angenommene Analogie zum Zink: $T = (0001)$; $t = [10\bar{1}0]$.

3. Fließ- und Dehnungskurven von Cd-Kristallen heben denselben Spannungswert als charakteristisch für den Beginn ausgiebiger Translation hervor. „Streckgrenze“.

4. Bestätigung des bisher stets an Metallkristallen beobachteten Gesetzes, daß die Streckgrenze durch eine konstante Schubfestigkeit des Translationssystems gegeben ist.

5. Diese charakteristische Schubfestigkeit der Basis (in Richtung einer digonalen Achse I. Art) hängt von den Herstellungsbedingungen der

* J. Czochralski, ZS. f. Metallkde. **15**, 7, 1923; ZS. d. Ver. d. Ing. **22**, 67, 1923.

** v. Göler und G. Sachs, ZS. f. techn. Phys. **12**, 586, 1927.

Kristalle ab. Je langsamer die Kristallisation und Abkühlung erfolgt, um so niedriger liegt der Wert. Er beträgt für Ziehgeschwindigkeiten der Kristalle (Czochralskisches Ziehverfahren) von

20 cm/Std.	58,4 ± 0,9 g/mm ²
5 bis 10 cm/Std. . . .	39,7 ± 1,2 „
1,5 cm/Std.	25,5 ± 2,2 „

6. Temperung gesunder Ausgangskristalle führt ebenfalls zu erheblichen Abnahmen der Schubfestigkeit der Basis.

7. Der Verlauf der Translation ist durch eine Verfestigungskurve [Schubfestigkeit (S) des Translationssystems als Funktion der Abgleitung (a)] gut darstellbar. Für Abgleitungen über 200 % gilt die Gleichung $S = 50 a$.

8. An die Basistranslation schließt sich (wie bei Zinkkristallen) mechanische Zwillingsbildung. Die zur Ausbildung der mechanischen Zwillingsbildung erforderliche Spannung steigt mit zunehmender Translation in einfacher Weise an (Grenzkurve der mechanischen Zwillingsbildung).

9. Die Weiterdehnung der Kristalle erfolgt durch neuerliche Basistranslation im Zwilling. Die Schubfestigkeit der Basis wird durch die Zwillingsbildung auf etwa das Dreifache erhöht. Diese Verfestigung ist überdies vom Ausmaß der primären Translation abhängig; je größer diese, um so kleiner die zusätzliche Verfestigung. Die sekundäre Basistranslation ist in der Regel mit schwacher Schubverfestigung (Gegensatz zu Zink) verbunden.

10. Eine schematische Darstellung der Gitterbewegungen bei der Dehnung von Cd- (Zn-) Kristallen wird gegeben.

11. Die beobachtete Konstanz der Endwinkel der Translationselemente im gedehnten Kristall ergibt sich aus der Verfestigungskurve und der Grenzkurve der mechanischen Zwillingsbildung.

12. An Hand von Schnitten des Fließgefahrs-, Dehnungs- und Höchstlastkörpers wird die Orientierungsabhängigkeit technologisch wichtiger Größen erläutert.

Der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft danken wir bestens für die weitgehende Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit.