

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

Über die Temperaturabhängigkeit der Kristallplastizität.

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

Mit 10 Abbildungen. (Eingegangen am 2. März 1930.)

Dehnungsversuche an Cadmium- und Zinkkristallen bei Temperaturen von 20° K bis zum Schmelzpunkt und verschiedenen Deformationsgeschwindigkeiten. Geringe Temperaturabhängigkeit der Initialschubspannung, etwa 200mal stärkere des Verfestigungskoeffizienten. Konstanz der Deformationsenergie als Bruchbedingung von Cadmiumkristallen.

Die Mechanismen der plastischen Deformation sind uns heute dank einer großen Zahl von Untersuchungen, die bei Zimmertemperatur an Metalleinkristallen durchgeführt sind, bekannt. Wir kennen aber nicht die Einzelheiten der physikalischen Vorgänge, die sich bei der plastischen Deformation abspielen; unser Wissen beschränkt sich auf eine einfache phänomenologische Beschreibung mit Hilfe von Gesetzmäßigkeiten geometrisch-kristallographischer Natur, die durch die Stichworte Schubspannungsgesetz und Verfestigungskurve charakterisiert seien.

Das Schubspannungsgesetz gibt die Orientierungsabhängigkeit der Streckgrenze eines Kristalls an; es sagt aus, daß der Beginn deutlicher Translation an das Erreichen einer bestimmten, kritischen Schubspannung in Translationsebene und -richtung gebunden ist. Für die bisher quantitativ untersuchten Fälle kann es auch als Energiegesetz formuliert werden. Hier besteht Proportionalität zwischen Schubspannung und elastischer Schiebung im Translationssystem*; die Bedingung der Schubspannungskonstanz ist dann also identisch mit der Bedingung einer konstanten elastischen Schubenergie an der Streckgrenze.

Die Verfestigungskurve ist die Kurve, die die Schubspannung im Translationssystem als Funktion der kristallographischen Abgleitung darstellt, d. h. als Funktion der Schiebung eines Gleitebenenpaketes von der Dicke 1; das ganze Spektrum der Lastdehnungskurven, die ja weitgehend orientierungsabhängig sind, wird durch diese eine Verfestigungskurve ersetzt.

* W. Boas und E. Schmid, ZS. f. Phys. **56**, 516, 1929.

Von einer physikalischen Theorie verlangen wir eine Erklärung
 für die Schubspannungskonstanz an der Streckgrenze,
 für den außerordentlich kleinen Absolutwert dieser Schubspannung
 (sie ist etwa 5000mal kleiner als die zu erwartende),
 für ihre Abhängigkeit von Temperatur und Vorbehandlung (je mehr
 Fehler man im Kristallbau vermuten möchte, desto größer ist
 die Schubspannung) und
 für ihren Anstieg bei plastischer Deformation („Verfestigung“).

Die Analyse der Verfestigung hat nun auf Grund von Messungen bei tiefen Temperaturen M. Polanyi und E. Schmid dazu geführt*, die Kristallplastizität als einen athermischen Vorgang aufzufassen; die Verfestigung ist eine Materialfunktion, deren beobachtete Abhängigkeit von Temperatur und Versuchsgeschwindigkeit durch die Temperaturbewegung der Atome („Erholung“) bedingt ist. Bei tiefen Temperaturen muß im Sinne dieser Deutung die Verfestigungskurve von Zeit und Temperatur unabhängig werden.

Quantitative Angaben über die Temperatur- und Geschwindigkeitsabhängigkeit der Kristallplastizität liegen nur im geringsten Ausmaße vor. Außer den bereits erwähnten Messungen von M. Polanyi, P. Rosbaud und E. Schmid sind Versuche über die Temperaturabhängigkeit der Streckgrenze an Bi-Kristallen von M. Georgieff und E. Schmid** und an Cd-Kristallen von W. Boas und E. Schmid*** ausgeführt worden. Es hat sich hier ergeben, daß die Schubspannung mit steigender Temperatur zunächst linear abfällt und dann in einem größeren Gebiet unterhalb des Schmelzpunktes konstant bleibt. Diese Konstanz wurde auch in der vorliegenden Arbeit wieder an Cd- und Zn-Kristallen bestätigt und dürfte somit eine allgemeine Erscheinung sein. Über den Einfluß der Versuchsgeschwindigkeit liegt eine Untersuchung von M. Polanyi und E. Schmid**** an Sn-Kristallen und eine Arbeit von J. Weerts† an Al-Kristallen vor; dieser findet im Gegensatz zu den Ergebnissen am Zinn bei einer Steigerung der Dehnungsgeschwindigkeit auf den 23000fachen

* M. Polanyi und E. Schmid, *Naturwiss.* **17**, 301, 1929. Vgl. auch E. Schmid, *Proc. Int. Congr. appl. Mech. Delft* 1924, S. 342; P. Rosbaud und E. Schmid, *ZS. f. Phys.* **32**, 197, 1925.

** M. Georgieff und E. Schmid, ebenda **36**, 759, 1926.

*** W. Boas und E. Schmid, ebenda **57**, 575, 1929.

**** M. Polanyi und E. Schmid, ebenda **32**, 684, 1925.

† J. Weerts, *Forschungsarb. a. d. Geb. d. Ingenieurw.* Heft 323, 1929.

Betrag nur eine geringe Erhöhung der Verfestigungskurve (um 16%), was auf eine sehr geringe Erholung des Aluminiums hinweist.

Eine ausführliche Untersuchung des Einflusses der Zeit bei verschiedenen Temperaturen auf den Verlauf der Verfestigungskurve schien somit erwünscht. Außer dem physikalischen Interesse für die Deutung der Verfestigung und Erholung kommt solchen Untersuchungen auch technologische Bedeutung zu; sie bilden einen systematischen Weg zur Verfolgung des Übergangs der Kaltdeformation in die sogenannte „Warmreckung“.

In der vorliegenden Arbeit sind die Ergebnisse von Zugversuchen beschrieben, die an Einkristallen von Cd im Temperaturbereich von 20° K bis zum Schmelzpunkt mit zwei verschiedenen Versuchsgeschwindigkeiten ausgeführt sind, ferner einige orientierende Versuche an Zn-Kristallen im Bereich von 85° K bis zum Schmelzpunkt.

I. Experimentelle Einrichtungen.

Die Kristalle sind nach dem Czochralskischen Ziehverfahren mit einer Geschwindigkeit von 20 cm/Std. aus der Schmelze gezogen worden; ihr Durchmesser betrug etwa 1 mm. Die Orientierung wurde röntgenographisch, der Querschnitt durch Wägung und durch mikrometrische Messung bestimmt. Die Dehnung erfolgte in einem Schopperschen Festigkeitsprüfer, bei dem die Last-Dehnungskurve selbsttätig aufgezeichnet wurde. Der Apparat war so umgeändert worden, daß der Kristall mit den beiden Einspannklemmen in ein Temperaturbad gebracht werden konnte. Fig. 1 zeigt die verwendete Zusatzvorrichtung, die in die untere Klemme des Festigkeitsprüfers eingespannt wurde. Die Temperatur des elektrisch geheizten Ölbad es wurde auf $\pm 1^\circ$ konstant gehalten.

Die Bauart des Schopperschen Festigkeitsprüfers gestattet es nicht, die Dehnungsgeschwindigkeit oder die physikalisch wohl wichtigere Abgleitungsgeschwindigkeit während des Versuchs konstant zu halten; einstellbar ist nur die Senkungsgeschwindigkeit der unteren Fassung, ein Maß für sie ist die Belastungsgeschwindigkeit in dem Gebiet unterhalb der Streckgrenze. Die „langsamen“ Versuche sind ausgeführt bei einer Belastungsgeschwindigkeit von 1 g/sec, einer Versuchsdauer von etwa 20 Min. entsprechend; die Versuchsdauer der „schnellen“ Versuche betrug etwa 12 sec, was einer Belastungsgeschwindigkeit von etwa 100 bis 150 g/sec entspricht.

II. Versuche an Cd-Kristallen.

1. Das Verhalten der Kristalle bei der Dehnung. Ein Unterschied in den Deformationsmechanismen der Kristalle bei langsamer und

bei schneller Dehnung wurde nicht beobachtet. Der Verlauf der Dehnung bei Zimmertemperatur ist ja oft beschrieben worden*: An die „primäre“ Basistranslation schließt sich mechanische Zwillingsbildung, im Zwilling beginnt „sekundäre“ Translation (Nachdehnung) nach der jetzt wieder

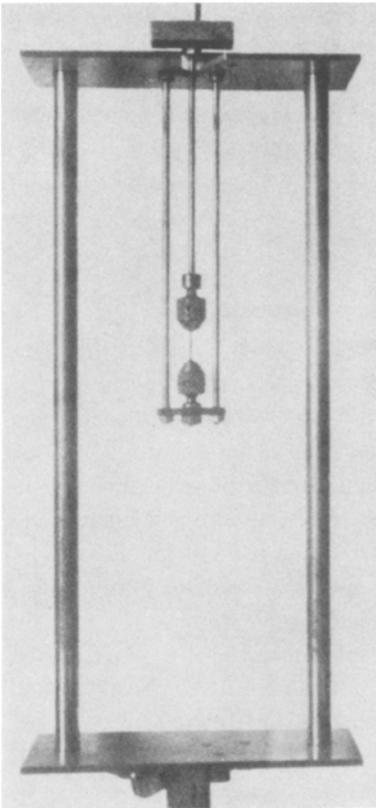


Fig. 1. Zusatzvorrichtung zur Dehnung von Kristallen in Temperaturbädern.

translationsfähigen Basis; erneute Zwillingsbildung führt dann den Bruch herbei. Die Zwillingsbildung ist mit erheblicher Schubverfestigung der Basis verknüpft, die Nachdehnung erfolgt unter sehr geringer weiterer Verfestigung.

In einem mittleren Temperaturbereich von -185°C bis 200°C verhalten sich die Kristalle wie bei Zimmertemperatur; bei -185°C geht allerdings die sekundäre Translation unter stark steigender Last (erheblicher weiterer Verfestigung entsprechend) vor sich. Bei -253°C folgt auf die Zwillingsbildung banales Reißen nach einer ungefähr quer verlaufenden, körnigen Fläche.

Bei 200°C bilden sich bei der sekundären Translation besonders derbe Gleitpakete aus (siehe Fig. 2); die Bänder sind knotig, gelegentlich findet Rekristallisation an einem Knoten und auch im Band, eventuell von einem Zwilling ausgehend, statt (Fig. 3); jedenfalls wurde hier der Ablauf der primären Translation noch in keinem Falle durch Rekristallisation

gestört. Bei 250°C erfolgte die Basistranslation unter starker Knotenbildung; nach Rekristallisation findet im neuen Korn Translation statt, die baldigen Bruch herbeiführt; in einigen Fällen konnte auch Zwillingsbildung beobachtet werden. Bei 300°C tritt banales Reißen, gelegentlich nach geringer

* W. Boas und E. Schmid, ZS. f. Phys. **54**, 16, 1929; dort auch ausführliche Literaturangaben.

ungleichmäßiger Basistranslation, ein; der Kristall reißt ohne vorherige Rekristallisation auf, wie dies schon früher beschrieben wurde*.

Die starke Knotenbildung ist eine für die Dehnung bei hohen Temperaturen typische Erscheinung. Die Dehnung beginnt ja an der schwächsten Stelle des Kristalls und kann hier ein beträchtliches Ausmaß erreichen, wenn, wie dies bei hohen Temperaturen der Fall ist, die Verfestigung so gering ist, daß erst nach größeren Deformationen die Spannung zur Ausbreitung der Dehnung auf die benachbarten Kristallteile hinreicht. Dieser Vorgang kann sich mehrmals hintereinander ereignen, so daß also zunächst

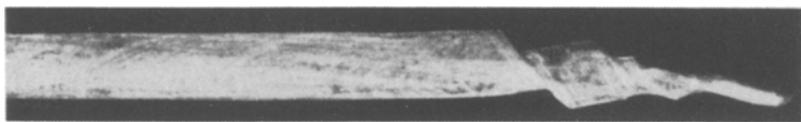


Fig. 2. Cadmium-Kristall bei 200° C gedehnt.
Derbe Gleitpakete bei der sekundären Translation. $\nu = 12$.

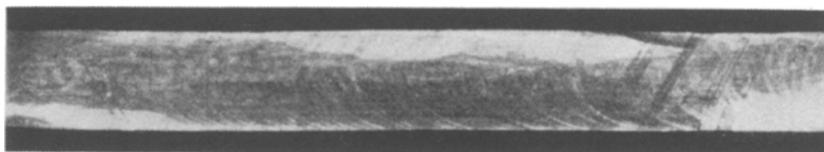


Fig. 3. Cadmium-Kristall bei 200° C gedehnt. Rekristallisation im gedehnten Kristall. $\nu = 12$.

ein knotiges Band entsteht, das sich erst im weiteren Verlauf durch Ausziehen der Knoten glättet. Es kann vorkommen, wie es einige Male beobachtet wurde, daß bei sehr geringer Verfestigung eine Ausbreitung der Dehnung nicht mehr stattfindet und der Bruch durch vollkommenes Abgleiten in der ersten Einschnürung erfolgt**.

Über die Dicke der Gleitschichten können keine genauen Angaben gemacht werden. Jedenfalls ist der mittlere Abstand der Gleitlinien bei hohen Temperaturen nicht einwandfrei größer als bei tiefen Temperaturen. Eine Ausmessung begegnet deswegen besonderen Schwierigkeiten, weil die Zahl der sichtbaren Gleitlinien mit der Auflösung des Mikroskops stark ansteigt. Die Tatsache, daß die Translationslinien einen nicht allzu verschiedenen Abstand voneinander haben, kann vielleicht als Wirkung der Verfestigung angesehen werden: als Translationsebene ist ja nicht eine

* W. Boas und E. Schmid, ZS. f. Phys. **57**, 575, 1929.

** Vgl. auch M. Polanyi und E. Schmid, ZS. f. Phys. **32**, 684, 1925.

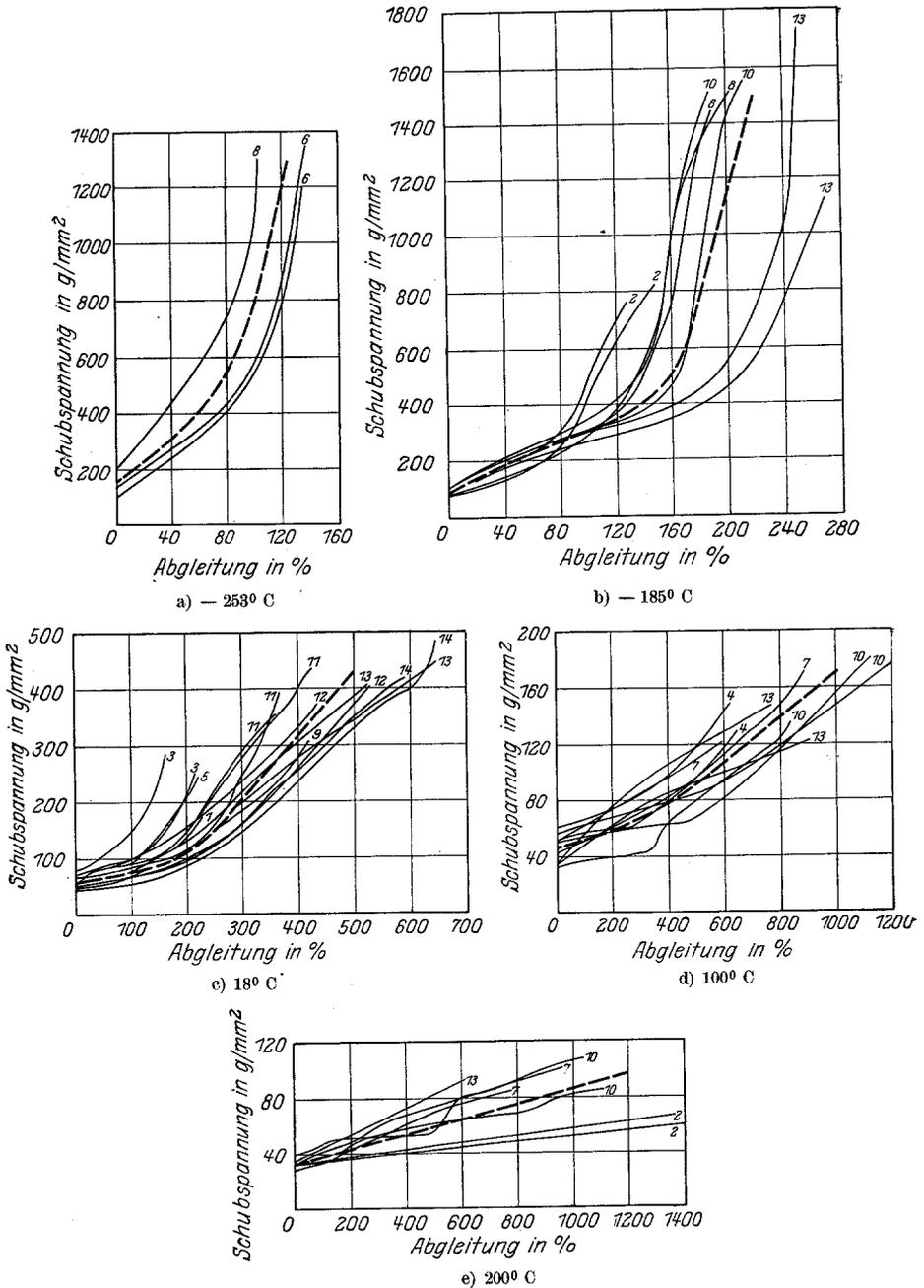


Fig. 4. Dehnung von Cadmium-Kristallen bei verschiedenen Temperaturen.
(Belastungsgeschwindigkeit ~ 10 g in 10 sec.)

einzig, durch den ganzen Querschnitt des Kristalls gehende glatte Netzebene wirksam; daher erstrecken sich auch die von einer Abgleitung her-

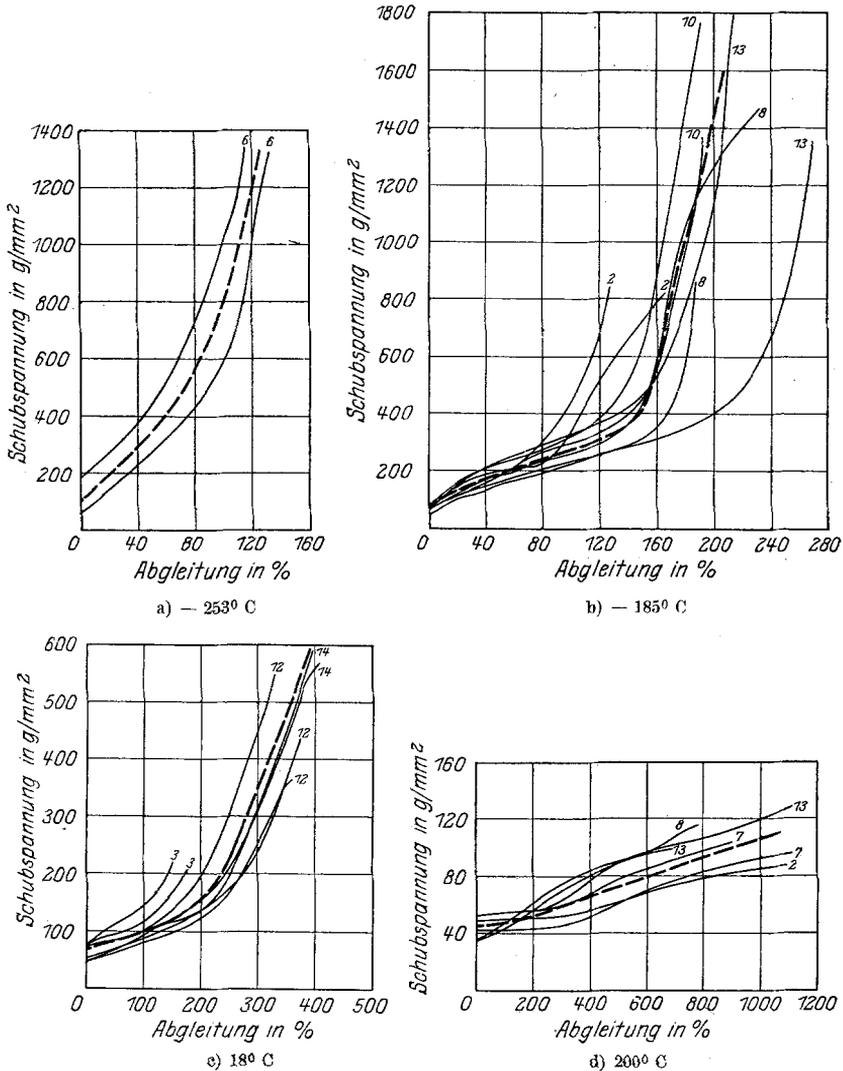


Fig. 5. Dehnung von Cadmium-Kristallen bei verschiedenen Temperaturen. (Versuchsdauer ~ 10 sec.)

rührenden Veränderungen im Gitter auf eine gewisse Umgebung der Gleitstelle und blockieren so innerhalb dieses Volumens weitere Translation. Ein anderer Erklärungsversuch für das Auftreten annähernd äquidistanter

Translationslinien rührt von L. Tronstad* her, der elastische Schwingungen hierfür verantwortlich macht.

2. Quantitative Ergebnisse. Tabelle 1 enthält die Orientierungen der untersuchten Kristalle. Zu allen aufgenommenen Last-Dehnungskurven wurden die Schubspannungs-Abgleichungskurven berechnet. Fig. 4 zeigt sämtliche mit der langsamen, Fig. 5 die Gesamtheit der mit der schnellen Dehnungsgeschwindigkeit erhaltenen Verfestigungskurven. Man sieht, daß sich die Kurven mit einer gewissen Streuung um die gestrichelt eingezeichneten Mittelkurven gruppieren; die Existenz der Verfestigungskurve ist dadurch auch für die hohen und tiefen Temperaturen dargetan. Die bei 250° C erhaltenen Kurven sind nicht eingezeichnet worden. Bei der hier auftretenden starken Knotenbildung ist ja die wahre Dehnung nicht feststellbar; die auf die Gesamtlänge bezogene Dehnung ergibt einen viel zu kleinen Wert, ohne daß eine Angabe der Fehlergrenze möglich wäre. Die aus den Figuren ersichtliche Streuung der Verfestigungskurven beruht wohl auch zum Teil auf dieser ungenauen Angabe der Dehnung. Typischer als die absolute Lage scheint demnach die Neigung der Verfestigungskurve zu sein.

Tabelle 1. Orientierung der untersuchten Cd-Kristalle.

Kristall Nr.	Winkel zwischen Zugrichtung und Basisfläche (α_0)	Exzentrizität der Translationsrichtung (α_0)
1	7,0	7,4
2	10,4	15,2
3	10,7	6,1
4	11,2	8,5
5	13,6	6,2
6	20,4	4,0
7	21,5	13,7
8	21,7	5,9
9	29,0	18,9
10	30,6	7,0
11	30,8	4,4
12	33,8	16,7
13	44,3	20,5
14	67,7	16,0

Den gezeichneten Kurven kann zunächst die für den Beginn der Translation wesentliche kritische Schubspannung entnommen werden. Tabelle 2 enthält deren Mittelwerte, die in Fig. 6 als Funktion der absoluten Temperatur aufgetragen sind. Bei 20° K sind zu wenig Werte erhalten, um einen verlässlichen Mittelwert angeben zu können. Bei 523° K ergab

* L. Tronstad, ZS. f. techn. Phys. 10, 445, 1929; Metallwirtsch. 9, 173, 1930.

sich 32,1 g/mm² als Mittel von zwei Versuchen. In Fig. 6 sind außerdem die Werte wiedergegeben, die früher an Kristallen, die mit erheblich kleinerer Geschwindigkeit aus der Schmelze gezogen waren, erhalten wurden. Übereinstimmend zeigt sich, daß bis etwa 473° K der Abfall der Schubspannung mit der Temperatur linear erfolgt und bei höheren Temperaturen weiteres Absinken nicht mehr eintritt. Der Einfluß der Dehnungsgeschwindigkeit auf die Schubspannung an der Streckgrenze ist verhältnismäßig gering*. Die in dieser Arbeit verwendete große Belastungsgeschwindigkeit bringt eine bis 40% betragende Erhöhung der Streckgrenze mit sich.

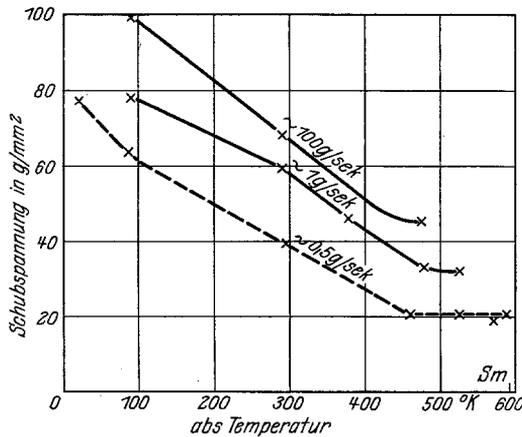


Fig. 6. Abhängigkeit der kritischen Schubspannung von Cadmium-Kristallen von Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit.

Fig. 7 zeigt die mittleren Verfestigungskurven; sie verlaufen nach höheren Ableitungen hin in allen Fällen linear. Als Maß für den bei einer Temperatur als charakteristisch erkannten Anstieg der Verfestigungskurve ist die Tangente des Neigungswinkels ihres geradlinigen Teiles eingeführt und Verfestigungskoeffizient benannt worden. Diese Verfestigungskoeffizienten (siehe auch Tabelle 2) sind in Fig. 8 als Funktion der Temperatur dargestellt. Während die Initialschubspannung bei — 185° C nur etwa das 2,5fache der für 200° C gültigen beträgt, steigt der Verfestigungskoeffizient in diesem Bereich auf das etwa 400fache. Allerdings sind die den tiefen Temperaturen zugehörigen Kurven so steil, daß ihren Verfestigungskoeffizienten (wegen der großen Empfindlichkeit der Tangente in diesem Winkelbereich) nur eine geringere Genauigkeit zuzuschreiben ist; aus diesem Grunde ist auch der für — 185° C bei schneller Dehnung erhaltene Wert nicht mit eingetragen.

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

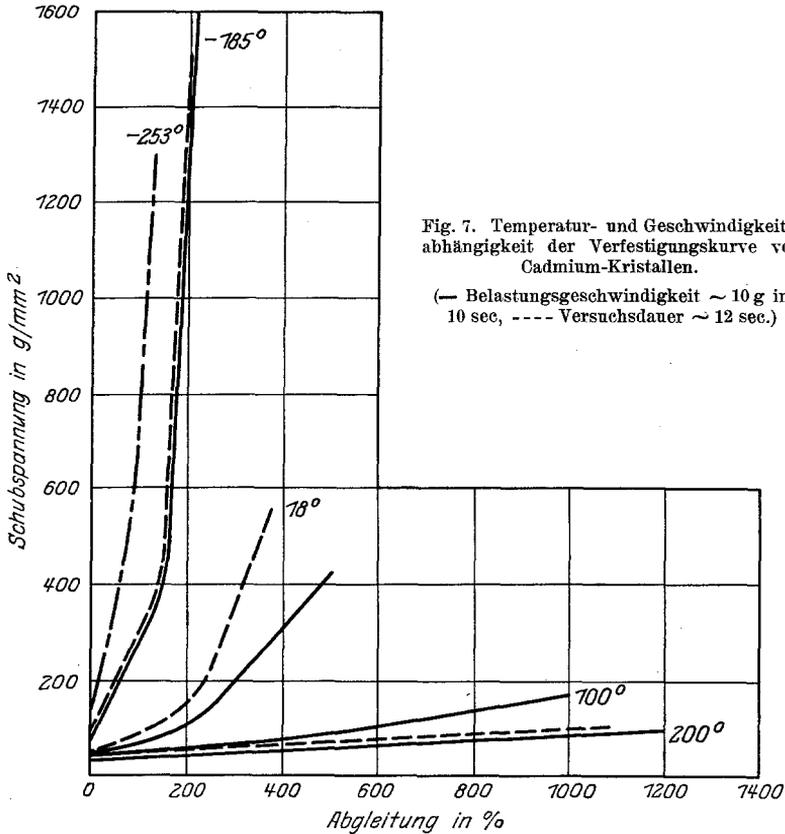


Tabelle 2.

Dehnung von Cd-Kristallen bei verschiedenen Temperaturen und Dehnungsgeschwindigkeiten.

Temperatur	- 253° C		- 185° C		18° C		100° C	200° C	
	langsam	schnell	langsam	schnell	langsam	schnell	langsam	langsam	schnell
Kritische Schubspannung (g/mm ²)	—	—	78,8	99,7	60,1*	68,6	45,8	32,5	45,7
Verfestigungskoeffizient . . .	~ 2100	~ 2100	~ 2100	$\sim 2800(?)$	110	265	15,5	5,3	6,7
Schiebungsarbeit (Joule/cm ³) . . .	6,36	6,64	9,14	9,97	9,18	7,35	9,42	7,67	8,06

* Für noch langsamere Dehnung (0,5 g/sec) war in früheren Versuchen 58,4 g/mm² für die kritische Schubspannung und 50 für den Verfestigungskoeffizienten erhalten worden.

Wenn auch die Lage der bei -253°C und -185°C aufgenommenen Kurven verschieden ist, so ist doch ihre Neigung annähernd gleich und von der Dehnungsgeschwindigkeit wesentlich unabhängig, wie dies auch von der oben dargelegten athermischen Auffassung der Kristallplastizität gefordert wird. Jedenfalls genügt die Veränderung der Dehnungsgeschwindigkeit im Verhältnis 1 : 150 nicht, um eine Geschwindigkeitsabhängigkeit deutlich werden zu lassen. Auch bei hohen Temperaturen ist diese sehr klein, nachdem sie bei Zimmertemperatur ein erhebliches Ausmaß (Ver-

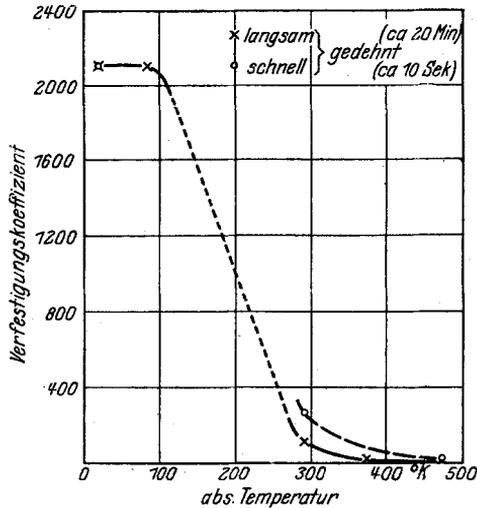


Fig. 8. Temperaturabhängigkeit des Verfestigungskoeffizienten von Cadmium-Kristallen.

dopplung des Verfestigungskoeffizienten!) erreicht hat. Bei tiefen Temperaturen ist die Erholung zu gering; bei hohen Temperaturen geht die Erholung so rasch vor sich, daß sie auch während der geringen Dauer der schnellen Versuche schon fast vollständig erfolgt. Den größten Einfluß auf die Neigung der Verfestigungskurve hat die Dehnungsgeschwindigkeit dann, wenn die Geschwindigkeiten von Versuch und Erholung annähernd dieselbe Größe haben.

Charakteristisch für eine Verfestigungskurve sind nicht nur ihr Anfangspunkt (Streckgrenze) und ihre Neigung (Verfestigungskoeffizient). Auch ihr Endpunkt ist wesentlich von der Kristallorientierung unabhängig, zumindest im Bereich, in dem die Basis zwischen 20° und 90° mit der Drahtachse einschließt. Die dem Endpunkt zukommende Grenzableitung bezieht sich auf die gesamte primäre Basistranslation bis zu dem Punkt, an

dem die Nachdehnung einsetzt. Diese Behauptung einer konstanten Grenzabgleichung steht nicht im Widerspruch zu einer früher angegebenen Kurve, die den Beginn deutlicher Zwillingsbildung betraf; denn zwischen dem Entstehen der einzelnen Zwillingslamellen findet noch primäre Translation statt. Auch die experimentell gefundene Konstanz der Endwinkel der Translationselemente im gedehnten Kristall, die seiner Zeit mit Hilfe der „Grenzkurve der mechanischen Zwillingsbildung“ erklärt werden konnte, findet durch die konstante Grenzabgleichung ihre einfache Deutung. Aus dieser Behauptung ist ferner die Orientierungsunabhängigkeit der Dehnungsarbeit zu folgern; da ja nur die Schubkomponente der Zugkraft bei der Dehnung Arbeit leistet, ist die Dehnungsarbeit bei allen Orientierungen gleich der Schubarbeit

$$\left(\int \sigma d\varepsilon = \int S da \right).$$

Die Schubarbeit der primären Basistranslation ist eine von Temperatur und Dehnungsgeschwindigkeit unabhängige Größe. Bis zum Eintritt der dem Bruch unmittelbar vorausgehenden Nachdehnung wird dem Kristall im Zugversuch eine bestimmte Energie zugeführt ohne Rücksicht auf die Art der Zuführung*. Tabelle 2 enthält diese Schubarbeit; ihr Mittelwert beträgt 8,7 Joule/cm³ oder 2,1 cal/cm³**. Nicht die gesamte Schubarbeit bleibt im Kristall bis zum Beginn der Nachdehnung aufgespeichert, sondern ein erheblicher Teil tritt als Wärme in Erscheinung***. Auch nach Beendigung des Versuchs muß während der Erholung Wärme entstehen, der Abnahme der inneren Energie entsprechend.

III. Versuche an Zn-Kristallen.

Es seien noch einige Versuche an Zn-Kristallen mitgeteilt, die einen mehr orientierenden Charakter tragen. Quantitative Schlüsse können zunächst daraus nicht gezogen werden; auch wurden die Kristalle häufig nicht bis zum Zerreißen gedehnt. In Fig. 9 sind die an Stücken desselben Kristalls bei verschiedenen Temperaturen aufgenommenen Last-Dehnungskurven (und nicht die Verfestigungskurven) wiedergegeben. Da die Orientierung in allen Fällen dieselbe ist, geht auch bereits aus diesen Kurven die überaus

* W. Boas und E. Schmid, *Naturwissensch.* **18**, 227, 1930.

** Tritt, wie dies bei 20° K der Fall ist, vorzeitiges Reißen ein, so wird der Normalwert der Deformationsenergie nicht erreicht. Die bei dieser Temperatur ermittelten Schubarbeiten wurden daher auch bei der Mittelwertbildung nicht mit berücksichtigt.

*** W. S. Farren und G. J. Taylor, *Proc. Roy. Soc. London (A)* **107**, 427, 1925; M. Masima und G. Sachs, *ZS. f. Phys.* **56**, 394, 1929.

starke Temperaturabhängigkeit der Verfestigungsfähigkeit des Zn-Kristalls hervor. Desgleichen zeigt sich wieder das Konstantbleiben der Streckgrenze bei hohen Temperaturen.

Das Verhalten eines Zn-Kristalls bei der Dehnung entspricht bei Zimmertemperatur vollkommen dem des Cd-Kristalls, bei anderen Tempe-

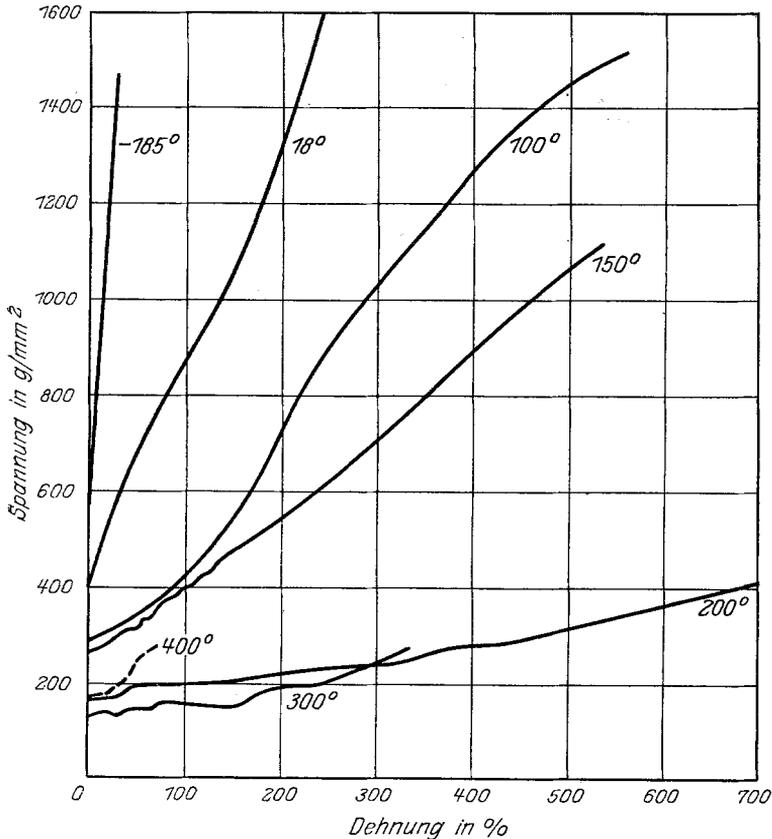
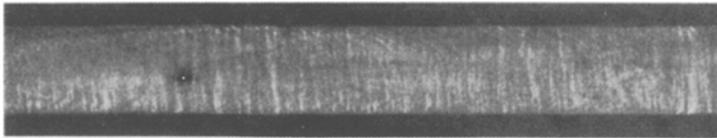


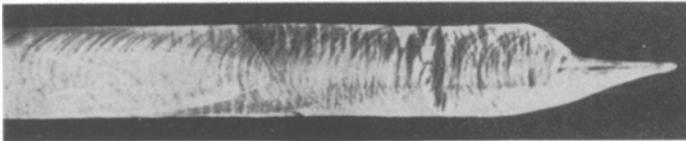
Fig. 9. Dehnungskurven eines Zinkkristalls bei verschiedenen Temperaturen.

raturen zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede. Bei -185°C folgt auf die Basistranslation keine Zwillingsbildung, sondern Spaltung nach der Basis. Bei 100°C und 150°C entsteht, wenn die Basistranslation bereits weit fortgeschritten ist, kurz vor der Zwillingsbildung eine neue, quer verlaufende Streifung (Fig. 10a). Die darauf sich bildenden Zwillinge gehen ungestört durch den Kristall hindurch, auch die Translationsstreifung der Nachdehnung wird nicht in ihrer normalen Ausbildung gehindert; der

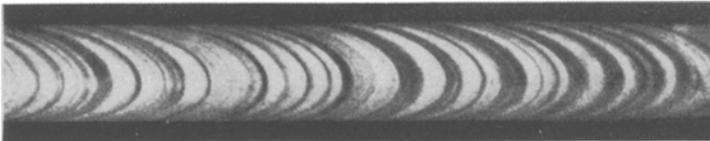
Bruch tritt wie bei Zimmertemperatur durch erneute Zwillingsbildung im Nachdehnungsfaden ein. Die bei 200° C gedehnten Kristalle verhalten sich fast genau ebenso. Die Querstreifung ist hier viel gröber, es entstehen bisweilen tiefe Einkerbungen im Kristall, wie Fig. 10b an einem Beispiel zeigt. Der Bruch erfolgt teils durch banales Reißen, teils durch Zwillingsbildung in der Nachdehnung. Bei 300° C geht die Basistranslation unter Bildung auffällig derber Gleitlinien (Fig. 10c) vor sich. Es entsteht keine



a) 100° C



b) 200° C



c) 300° C

Fig. 10. Zinkkristalle bei erhöhter Temperatur gedehnt. $\nu = 12$.

Querstreifung, keine Zwillingsbildung, sondern es erfolgt Rekristallisation; die neugebildeten Körner dehnen sich und reißen banal. Auch bei 400° C wurde weder Querstreifung noch Zwillingsbildung beobachtet; die Basistranslation wird durch Rekristallisation abgelöst, das Band schnürt sich durch Dehnung in neuen Körnern spießförmig ein und reißt.

Über das Wesen der bei den mittleren Temperaturen entstehenden Querstreifung können noch keine endgültigen Angaben gemacht werden. Nach dem Gesagten kann es sich hierbei keineswegs um Kornzerfall oder um Entstehen von Zwillingslamellen handeln. Die bei 200° C entstehenden tiefen Einkerbungen weisen auf eine Deutung durch oberflächliches Aufreißen des Kristalls hin; es ist aber noch nicht bewiesen, daß diese tiefen

Furchen nur eine starke Vergrößerung des Effektes darstellen und daß es sich nicht um zwei verschiedene Erscheinungen handelt. Hier können nur weitere Versuche Klarheit bringen.

Zusammenfassung.

1. Die Konstanz der kritischen Schubspannung (Streckgrenze) in einem größeren Temperaturbereich unterhalb des Schmelzpunktes wird an Cd-Kristallen beobachtet und ist wohl eine allgemeine Erscheinung. Die Abhängigkeit der kritischen Schubspannung von der Dehnungsgeschwindigkeit wird im Bereich von 85° K bis 473° K untersucht.

2. Der die Stärke der Verfestigung definierende Verfestigungskoeffizient wird in seiner Temperaturabhängigkeit untersucht: geringe bzw. fehlende Abhängigkeit bei tiefsten Temperaturen (athermische Plastizität), steiler Abfall bei mittleren und geringe Abhängigkeit mit niedrigsten Absolutwerten bei hohen Temperaturen (Warmreckung). Der Einfluß der Dehnungsgeschwindigkeit auf den Verfestigungskoeffizienten ist bei sehr tiefen und sehr hohen Temperaturen gering; er erreicht ein Maximum, wenn die Geschwindigkeiten von Versuch und Erholung gleich groß sind.

3. Das durch das Einsetzen der Nachdehnung bedingte Ende der primären Basistranslation ist bei Cd-Kristallen in einem weiten Orientierungsbereich durch eine konstante Grenzableitung gegeben. Es folgt daraus die Orientierungsunabhängigkeit der Dehnungsarbeit, die gleich der Schubarbeit ist.

4. Die Schubarbeit der primären Basistranslation ist bei Cd-Kristallen eine von Temperatur und Dehnungsgeschwindigkeit unabhängige Materialkonstante; sie beträgt 8,7 Joule/cm³.

5. Bei 100, 150 und 200° C gedehnte Zn-Kristalle zeigen eine Querstreifung, die vielleicht als oberflächliches Aufreißen des Kristalls gedeutet werden kann.

Herrn Dr. W. Meissner, dem Leiter des Kältelaboratoriums der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt danken wir für freundliche Überlassung von 5 Liter flüssigen Wasserstoffs.

Die Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft hat die Durchführung dieser Arbeit ermöglicht, wofür ihr bestens gedankt sei.
