

Über die Festigkeit von Tellurkristallen.

Von E. Schmid und G. Wassermann in Frankfurt a. M.

Mit 17 Abbildungen. (Eingegangen am 1. Dezember 1927.)

ZerreiBversuche an Tellurkristallen zeigen, daß im Orientierungsbereich von 29 bis 90° für den Winkel der querst liegenden Prismenfläche erster Art (Reißfläche) das Gesetz von der Konstanz der Grenznormalspannung gültig ist. Für schrägere Lagen der Prismenflächen bleibt dagegen die ZerreiBfestigkeit (allerdings mit größerer Streuung) nahezu konstant. Plastische Deformation konnte nur bei Biegung der Kristalle beobachtet werden.

Die Untersuchungen der ZerreiBfestigkeit von Kristallen, die seit einigen Jahren insbesondere auch auf Metallkristalle ausgedehnt worden sind, haben ergeben, daß die beobachteten Festigkeitswerte stets größenordnungsmäßig hinter den theoretisch zu erwartenden zurückbleiben*.

Ferner ist für das Zerreißen von Metallkristallen, sofern es entlang einer Kristallfläche erfolgt, das Bestehen einer einfachen Gesetzmäßigkeit experimentell aufgefunden worden**. Sie besagt, daß für das Zerreißen die Erreichung einer bestimmten, kritischen Normalspannung auf die Spaltfläche (unabhängig von der gleichzeitig wirkenden Schubspannung) maßgebend ist. Die ZerreiBfestigkeit der Kristalle ist demnach wesentlich von der Orientierung des Kristallgitters zur Zugachse abhängig***.

Der Zweck der vorliegenden Arbeit war es, das über die Gesetzmäßigkeit der „kritischen“ Normalspannung vorliegende Beobachtungsmaterial durch Untersuchung weiterer Metallkristalle zu ergänzen. Hierzu schienen, um die durch plastische Dehnung hervorgerufenen Komplikationen auszuschneiden, Kristalle aus einem spröden, undehnbaren Material besonders geeignet. Aus diesem Grunde wurde das Tellur gewählt, das sich durch besonders hohe Sprödigkeit auszeichnet.

I. Herstellung der Kristalle. Für die Herstellung von Metallkristallen stehen heute eine ganze Reihe von Verfahren zur Verfügung.

* Zur Erklärung dieser Tatsache nimmt man heute mit A. Smekal vielfach an, daß Gitterfehlstellen — „Lockerstellen“ — die geringe Festigkeit realer Kristalle bedingen. Erst höchst verfestigte Realkristalle seien mit dem Ideal-kristall vergleichbar. (Vgl. A. Smekal, Phys. ZS. **26**, 707, 1925; Mitteil. d. Staatl. Techn. Versuchsanstalt Wien **16**, Heft 1—3, 1927; hier finden sich weitere Literaturhinweise.)

** E. Schmid, Verh. d. Intern. Kongr. f. angew. Mechan. S. 342, Delft 1924; M. Georgieff und E. Schmid, ZS. f. Phys. **36**, 759, 1926.

*** Um mit diesem Tatbestand in Übereinstimmung zu bleiben, muß man also eine streng kristallographische Anordnung der Lockerstellen voraussetzen.

Sie lassen sich im wesentlichen in zwei Hauptgruppen einteilen. Bei denen der ersten Gruppe wird die Entstehung großer Kristalle durch Rekristallisation nach vorangegangener, geeigneter plastischer Deformation bewirkt. Bei denen der zweiten Gruppe werden die Kristalle durch entsprechend geleitete Kristallisation der Schmelze erzeugt*.

Nach einigen mißglückten Versuchen mit Hilfe der bekannten Verfahren haben wir die Herstellung der Tellurkristalle nach folgender, einfacher Methode vorgenommen**

Das zerkleinerte Material (Tellur „Kahlbaum“) wurde in schwer schmelzbare Glasröhrchen von 2 bis 3 mm innerem Durchmesser eingefüllt, die dann in einem elektrischen Ofen auf etwa 300° C erhitzt und gleichzeitig evakuiert wurden. Wenn ein Vakuum von etwa 0,01 mm erreicht war, wurden die Rohre abgeschmolzen.

Das Metall kann nun niedergeschmolzen werden, ohne daß Oxydation oder Verdampfung eintritt. Um eine Beobachtung der Schmelze zu ermöglichen, erfolgt das Erhitzen in der leuchtenden Flamme eines Bunsenbrenners***. Die in der Schmelze vorhandenen Gasblasen müssen möglichst weitgehend entfernt werden, weil sie sonst im erstarrten Metall Hohlräume bilden. Dies gelingt durch kurzes, ruckweises Schütteln des Rohres****.

Durch geeignete Abkühlung ist nun dafür zu sorgen, daß sich beim Erstarren der Schmelze nur ein Kristall bildet. Bei Tellur (und ebenso bei Wismut und Antimon) ist es nicht notwendig, die Kristallisation an einer Stelle besonders engen Querschnittes einzuleiten, da bei ihm die Zahl der Kristallkeime verhältnismäßig gering zu sein scheint. Es genügt hier vielmehr, für gleichmäßige, möglichst langsame Abkühlung der die Metallschmelze enthaltenden Rohre zu sorgen†. Das Rohr mit dem ge-

* G. Sachs, ZS. f. Metallk. **17**, 238, 1925; E. Schmid, ebenda **18**, 90, 1926; H. C. H. Carpenter, Met. Ind. **28**, 543, 1926.

** Das von P. W. Bridgman (Proc. Amer. Acad. **60**, 305, 1925) angegebene Verfahren, nach dem dieser Autor auch Tellurkristalle hergestellt hat, war zur Zeit der Durchführung unserer Versuche noch nicht veröffentlicht.

*** Da die Rohre zuweilen springen, ist beim Erhitzen Vorsicht geboten.

**** Es ist vorteilhaft, das zuerst geschmolzene Metall möglichst weitgehend von Gas zu befreien, ehe man weitere Teile erhitzt. Auch muß man die einmal geschmolzenen Teile dauernd flüssig erhalten, weil sonst beim Wiedererhitzen das Glas leicht springt. Für das Schmelzen und ausreichende Entgasen sind manchmal 15 Minuten und mehr erforderlich.

† Bei anderen Metallen (Zn, Sn, Pb, Cd) konnten Einkristalle dadurch erzielt werden, daß die Röhrchen mit dem geschmolzenen und entgasten Metall langsam durch einen elektrischen Ofen bewegt wurden (vgl. D. R.-P. 442 085 und P. W. Bridgman, l. c.).

schmolzenen Metall wird unmittelbar nach Beendigung des Entgasens in ein Temperaturbad gestellt*, und zwar so, daß etwa 1 cm des Metalls sich außerhalb des Bades befindet. Dieses Stück erkaltet dann zuerst, und die Schmelze erstarrt allmählich von oben her, wenn man die Temperatur langsam sinken läßt und durch Rühren des Bades für gleichmäßige Abkühlung Sorge trägt. Sobald die Kristallisation beendet ist, wird das Rohr in Eiswasser abgeschreckt. Dadurch zerspringt das Glas in viele, kleine Stückchen, die sich mit einiger Vorsicht leicht entfernen lassen, ohne daß der Metallstab, der in den meisten Fällen aus einem einzigen Kristall besteht, beschädigt wird. Die größten der auf diese

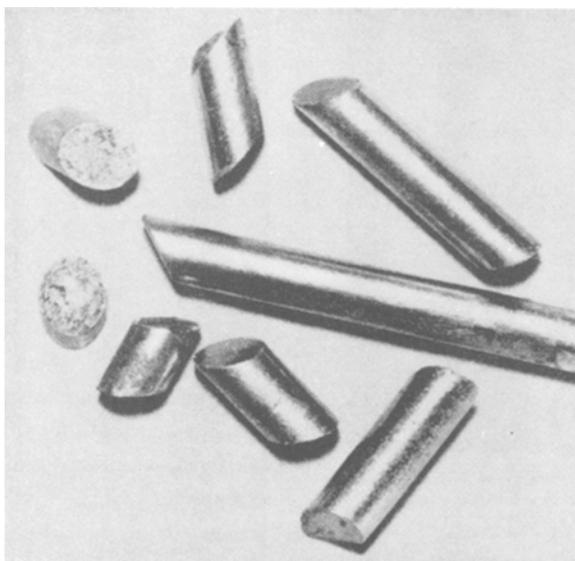


Fig. 1. Spaltstücke von Tellurkristallen. Vergr. = 2,5.

Weise erhaltenen Kristalle waren etwa 10 cm lang bei einem Durchmesser von 2 bis 3 mm.

II. Kristallographische Kennzeichnung der Spaltflächen. Die auf die eben beschriebene Weise hergestellten Tellurkristalle sind sehr spröde und außerordentlich leicht spaltbar. Sie zeigen über den ganzen Querschnitt gehende, glatte, spiegelnde Spaltflächen (Fig. 1).

Nach P. Groth** kristallisiert Tellur trigonal. Röntgenographische Strukturbestimmungen ergaben die Basiskante $a = 4,44 \text{ \AA}$; das Achsen-

* Für Tellur wurde eine mit Gas geheizte Salpeterschmelze verwendet.

** P. Groth, Chem. Kristallographie S. 35. Leipzig 1906.

verhältnis $c/a = 1,33^*$. Im Elementarkörper liegen drei Atome mit den Koordinaten $(0, x, 0)$, $(x, 0, \frac{1}{3})$, $(\bar{x}, \bar{x}, \frac{2}{3})$. $x = 0,269 a$. Die trigonale Achse ist also eine Schraubenachse.

Die Spaltbarkeit ist nach P. Groth eine vollkommene nach den Prismenflächen erster Art, eine unvollkommene nach der Basis. Es war also anzunehmen, daß die beobachteten Kristallflächen Prismenflächen erster Art darstellen. An jedem Kristall mußten dann drei solcher, sich unter Winkeln von 60° schneidender Flächen vorhanden sein.

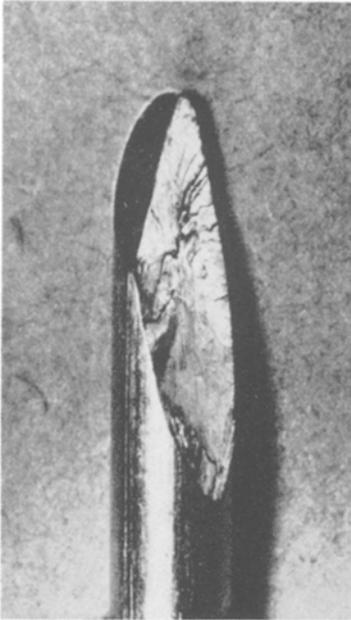


Fig. 2. Reißstelle eines Tellurkristalls mit zwei Prismenflächen erster Art. Vergr. = 5.

Man sieht, daß die Flächen mit geringer Streuung Winkel von 60° bilden. Die oben gemachte Annahme über die Identität der Spaltflächen mit Prismenflächen erster Art erscheint somit gerechtfertigt.

In der Tat konnte auch bei solchen Kristallen, die nur eine Reißfläche zeigten, durch Abspalten leicht die zweite und auch die dritte Prismenfläche freigelegt und somit die Spaltbarkeit des Tellurs nach den Prismenflächen erster Art bestätigt werden.

Im Gegensatz zu den meist auftretenden, spiegelnden Prismenebenen zeigte ein Teil der Präparate quer zur Längsrichtung liegende Bruchflächen

Tabelle 1.

Bestimmung der Spaltflächen als Prismenflächen erster Art.

Winkel zwischen zwei Spaltflächen derselben Reißstelle
$60^\circ 30'$
$60^\circ 30'$
60
61
60
60

Nun zeigten einige Kristalle Reißstellen, die aus zwei verschiedenen Flächen bestanden (vgl. Fig. 2). Das Ergebnis der goniometrischen Bestimmung des Winkels beider Flächen ist in Tabelle 1 enthalten.

* M. K. Slattery, Phys. Rev. **23**, 378, 1923 und **25**, 333, 1925; A. J. Bradley, Phil. Mag. (6) **48**, 477, 1924; S. v. Olshausen, ZS. f. Kristallographie **61**, 463, 1925; G. Wassermann, Dissertation Berlin, 1928.

von völlig unebener, rauher Beschaffenheit und zum Teil muscheligen Aussehen (Fig. 3). Daß es sich in diesen Fällen nicht um Polykristalle handelte, ließ sich durch Abschleifen der Bruchfläche und Ätzen nachweisen. Fig. 4 zeigt einen solchen geätzten Schliff, auf dem im Gegensatz zu einem ebenso behandelten Schliff eines Polykristalls keine Einzelkörner zu erkennen sind (Fig. 5). Es sind lediglich einige Risse zu bemerken, die sich unter Winkeln von nahezu 60° schneiden. Diese in dem spröden Material sehr leicht entstehenden Risse laufen in Richtung der gut



Fig. 3.
Querliegende, unebene Bruchfläche
eines Tellurkristalls. Vergr. = 11.

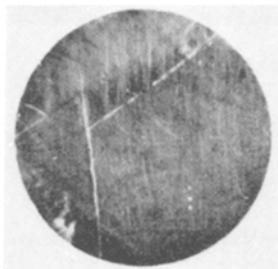


Fig. 4.
Schliff parallel einer querliegenden Bruchfläche.
(Geätzt mit konz. HNO_3 .) Vergr. = 11.



Fig. 5. Schliff von polykristallinem Tellur. (Geätzt mit konz. HNO_3 .) Vergr. = 11.

spaltenden Prismenflächen. Die nahezu 60° betragenden Winkel lassen darauf schließen, daß die Prismenflächen ziemlich senkrecht zur Schliffebene, also parallel zur Drahtachse liegen. Diese Annahme konnte durch Freilegen der drei Prismenflächen mittels Abspalten bestätigt werden. Fig. 6 zeigt eine solche Prismenfläche. Man sieht, daß sie nahezu parallel der Drahtachse verläuft, während die ursprüngliche, unebene Bruchfläche ziemlich quer liegt. Der Winkel zwischen beiden beträgt also ungefähr 90° , und es ist zu vermuten, daß die Bruchfläche, sofern es sich bei ihr überhaupt um eine Kristallfläche handelt, die Basis dar-

stellt. Wegen der unebenen Oberfläche war eine goniometrische Nachprüfung indessen nicht möglich.

III. Bestimmung der Kristallorientierung. Während die Lage der Spaltflächen zueinander bei allen Kristallen die gleiche sein muß, ist

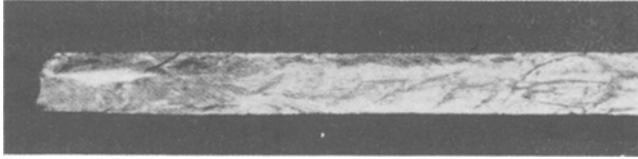


Fig. 6.

Durch Spalten freigelegte, längs im Kristall liegende Prismenfläche erster Art eines Tellurkristalls. Vergr. = 4.

die Lage der Flächen zur Längsachse des Kristalls, die Orientierung, im allgemeinen für jedes Exemplar eine andere. Die Bestimmung der Orientierung erfolgte am Goniometer, und zwar wurden jeweils die drei Winkel χ_1, χ_2, χ_3 , welche die drei Prismenflächen mit der Drahtachse bilden, ermittelt.

Zur Vereinfachung der Auswertung wurde mit Hilfe eines Wulffschen Netzes eine stereographische Projektion angefertigt. Der Mittelpunkt der Projektionsebene stellt den Durchstoßpunkt der hexagonalen Achse dar.

Das Ergebnis der Orientierungsbestimmungen mit Hilfe stereographischer Projektion für sämtliche untersuchten Kristalle zeigt Fig. 7*. (Eine Zusammenstellung der Zahlenwerte gibt die Tabelle 2.) Infolge der Symmetrie genügt zur Betrachtung ein Kreissektor von 30° , der von den Prismenflächen erster und zweiter Art begrenzt wird. Jeder der markierten Punkte stellt den Durchstoßpunkt einer Drahtachse dar.

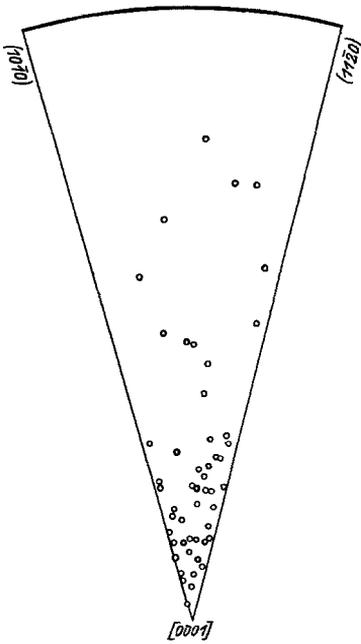


Fig. 7.

Orientierung der untersuchten Kristalle in stereographischer Projektion dargestellt.

* Diese Art der Darstellung ist analog der beispielsweise von G. J. Taylor, C. F. Elam und G. Sachs angewendeten.

Man erkennt, daß der Winkel zwischen hexagonaler Achse und Drahtachse in der Mehrzahl der Fälle sehr klein ist (vgl. Tabelle 2), d. h. die [0001]-Richtung ist als Wachstumsrichtung bevorzugt.

IV. Zerreißversuche. Zur Ausführung von Zerreiversuchen war es vor allem notwendig, eine geeignete Befestigungsart für die Kristalle zu finden. Bei der großen Sprödigkeit des Tellurs war ein Einklemmen in die Backen der Zerreißmaschine nicht möglich, ohne den Kristall zu zerstören. Deshalb wurde jeder Kristall vor dem Versuch in besondere Fassungen eingekittet, die mit genau zentrierten Spitzen auf Bgeln auflagen, welche ihrerseits in die Backen einer Schopperschen Zerreißmaschine eingeklemmt waren* (vgl. Fig. 8). Auf diese Weise wurde zentrische Belastung der Kristalle erzielt. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug etwa 2 kg in der Minute.

Der Bruch erfolgte stets ohne vorherige, plastische Dehnung. Bei der Mehrzahl der Kristalle bestand die Reißstelle aus einer Prismenfläche erster Art; zuweilen traten, wie bereits erwähnt, auch zwei Prismenflächen gleichzeitig auf. Bei Kristallen mit sehr längs liegenden Prismenflächen ($\chi_1 < 14^\circ$) zeigten sich die schon besprochenen, unregelmäßigen Flächen mit zum Teil muscheligen Bruch.

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Zerreißversuche sowie der goniometrischen Orientierungsbestimmungen zusammengestellt. χ_1 , χ_2 und χ_3 geben die Winkel zwischen Drahtachse und den drei Prismenflächen an, und zwar ist der größte der drei Winkel stets mit χ_1 , der kleinste mit χ_3 bezeichnet. Die Kristalle sind in der Tabelle nach fallendem χ_1 geordnet. Der Winkel zwischen Drahtachse und trigonaler Achse ist mit δ bezeichnet und kann aus der stereographischen Projektion mit Hilfe eines Wulffschen Netzes bestimmt werden. Aus der Zerreißfestigkeit (Z) und dem Winkel χ_1 sind für die querste Prismenfläche, die stets als Reißfläche auftrat**, Normalspannung (N) und maximale Schub-

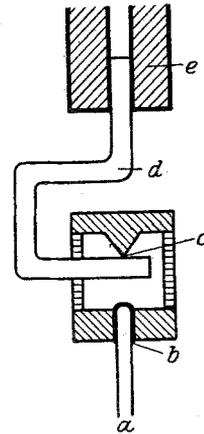


Fig. 8.

Schematische Darstellung der bei den Zerreiversuchen verwendeten Einspannvorrichtung.

- a) Kristall.
- b) Kitt.
- c) Fassung mit Spitzenlagerung.
- d) Stahlbgel.
- e) Backen der Zerreißmaschine.

* Als geeigneter, genügend tragfester Kitt hat sich eine Mischung von 75 % Kolophonium, 20 % Schellack und 5 % Bienenwachs bewährt.

** Ihr kommt die größte Normalspannung zu.

Tabelle 2. Zerreißversuche an Tellurkristallen.

Winkel zwischen Drahtachse und Prismenflächen			Winkel (δ) zw. Drahtachse und trigon. Achse	Zerreißfestigkeit (Z) kg/mm ²	Normalspannung (N) g/mm ²	Schubspannung (S) g/mm ²
χ_1	χ_2	χ_3				
Kristalle mit Prismenreiflchen.						
78	36	23	80	0,41	392	83
71	40	16	76	0,35	313	108
70	34	24	71	0,38	336	122
69	36	—	71	0,54	471	181
60	29	25	60	0,57	428	246
60	43	11	66	0,51	383	221
52	24	23	52	0,67	416	325
51	43	—	58	0,80	483	391
46	31	12	48	0,94	486	470
46	30	11	48	0,95	492	412
46	36	8	50	0,82	424	407
44	26	13	45	0,85	410	425
39	25	—	40	1,23	487	602
33	17	—	33	1,60	475	731
32	16	15	32	1,55	435	697
32	19	12	32	1,70	477	766
29	16	13	29	1,81	425	768
29	15	13	29	1,78	418	755
28	22	—	30	1,33	293	551
28	26	1	32	1,49	328	604
27	—	10	27	1,70	350	688
26	17	8	26	1,75	336	690
25	16	—	25	1,22	218	467
24	11	11	24	1,81	301	674
23	15	6	24	1,38	213	497
23	16	6	24	1,80	275	646
23	14	9	23	1,84	281	661
23	14	7	23	1,19	183	429
22	21	1	25	1,33	187	462
21	—	1	24	1,20	154	402
20	11	9	20	1,39	163	447
20	13	6	20	1,67	196	537
18	16	3	20	1,74	166	511
17	9	9	17	2,00	171	559
17	13	3	18	1,58	135	439
17	15	—	18	1,91	163	534
14	9	5	14	2,24	131	526
14	10	4	14	1,62	95	380
14	—	1	16	2,00	117	469
13	—	3	14	2,04	103	447
Kristalle mit unebener Bruchfläche.						
15	7	—	15	2,02	135	505
12	10	1	14	1,60	69	376
11	—	3	12	1,79	65	306
10	6	4	10	1,75	53	299
9	5	—	9	2,04	50	315
7	5	—	7	1,82	27	220
6	6	—	7	2,34	25	243
5	—	2	5	2,12	16	184
1	—	0	1	1,72	5	30

spannung (S) nach den Formeln $N = Z \cdot \sin^2 \chi_1$ und $S = Z \cdot \sin \chi_1 \cdot \cos \chi_1$ berechnet (Spalten 5, 6 und 7 der Tabelle 2). In Fig. 9 ist die Zerreißfestigkeit überdies noch graphisch als Funktion von χ_1 dargestellt.

Man erkennt, daß für χ_1 -Werte von 78° bis etwa 30° eine sehr starke Abhängigkeit der Zerreißfestigkeit von der Lage der Spaltfläche besteht. Die Zerreißfestigkeit steigt von etwa $0,4 \text{ kg/mm}^2$ auf mehr als das Vierfache. Bei weiterer Verkleinerung des Winkels (schrgerer Lage der Prismenspaltflche entsprechend) tritt nur noch eine sehr geringe Erhöhung der Zerreißfestigkeit ein. Auch bei solchen Kristallen, bei denen infolge noch schrgerer Lage der Prismenfläche ($\chi_1 < 14^\circ$) die

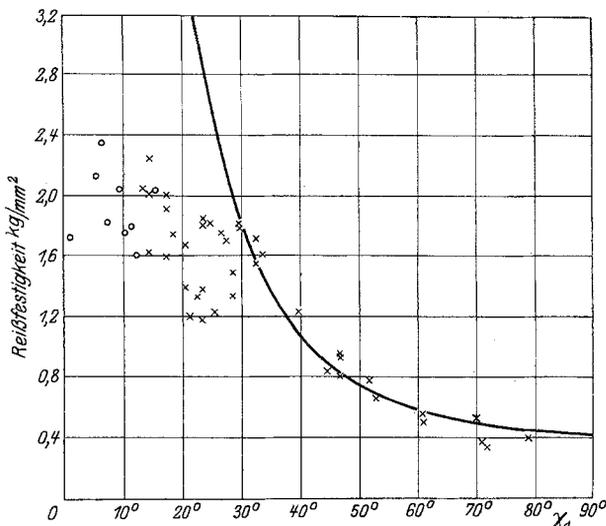


Fig. 9. Zerreißfestigkeit von Tellurkristallen als Funktion des Stellungswinkels χ_1 der querst liegenden Prismenfläche erster Art. Die ausgezogene Kurve ist mit einer konstanten Grenznormalspannung von 431 g/mm^2 senkrecht zur Prismenreiflche berechnet. In den mit \circ bezeichneten Fällen trat nur eine nahezu quer liegende, unebene Bruchfläche auf.

querliegende, muschelige Fläche als Bruchfläche auftritt, ist eine deutliche Änderung der Reifestigkeitswerte nicht zu bemerken. Die Streuung der Einzelwerte nimmt jedoch mit fallendem χ_1 erheblich zu.

Die Normalspannung auf die Spaltfläche ist dagegen in dem Bereich $78^\circ \geq \chi_1 \geq 29^\circ$ merklich konstant geblieben (vgl. Fig. 10). Ihr Mittelwert aus 18 Bestimmungen* beträgt 431 g/mm^2 . Für χ_1 -Werte $< 29^\circ$ erfolgt sodann eine deutliche, systematische Abnahme. Bei einem

* Da die Ausbeute an Kristallen dieses Orientierungsbereichs nur gering ist, standen mehr Werte nicht zur Verfügung.

Stellungswinkel von 14° beträgt N nur noch ein Viertel des früheren Wertes. Für noch schrägere Lage der Prismenflächen, bei denen diese als Reißflächen gar nicht mehr auftreten, setzt sich der Abfall der Normalspannung fort.

Für Tellurkristalle mit Neigungswinkeln der Prismenspalftfläche zur Zugrichtung von 78° bis etwa 29° hat sich somit dieselbe Gesetzmäßigkeit, nämlich Konstanz der Grenznormalspannung, ergeben, die auch an anderen Kristallen beobachtet worden war. Bei schrägerer Lage der Spaltfläche hingegen ist diese Gesetzmäßigkeit keineswegs mehr erfüllt. Die Normalspannung zur Spaltfläche fällt mit abnehmendem Neigungswinkel zur Zugrichtung stetig ab.

In gleicher Weise versagt das Gesetz von der Konstanz der Normalspannung für jene Orientierungen, bei denen eine Prismenreißfläche nicht

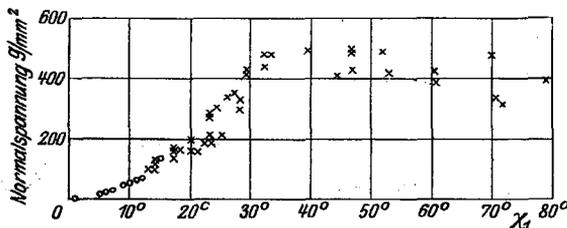


Fig. 10. Orientierungsabhängigkeit der Grenznormalspannung auf die Prismenfläche erster Art. (Darstellung analog der Fig. 9.)

mehr auftritt. Falls nämlich die hier vorhandene Reißfläche eine Kristallfläche ist, so kann es sich nur um die Basis handeln. Wäre nun aber die Normalspannung auf die Basis konstant, so müßte die Zerreißfestigkeit mit abnehmendem χ_1 -Winkel (Fig. 9) sinken, um bei $\chi_1 = 0^\circ$ den Wert für die Normalspannung zu erreichen. In Wirklichkeit steigt jedoch auch für diese Orientierungen die Zerreißfestigkeit im Mittel noch an.

Es entsteht nun die Frage, auf welche Weise das für gewisse Gitterorientierungen anormale Verhalten der Kristalle zu erklären ist. Für den Fall, daß für alle Orientierungen das Zerreißen entlang einer Prismenfläche erster Art nach Erreichung einer konstanten, kritischen Normalspannung von 431 g/mm^2 erfolgen würde, ist in der in die Fig. 9 eingezeichneten Kurve die Abhängigkeit der Zerreißfestigkeit von der Lage der Spaltfläche dargestellt. Man sieht, daß für $\chi_1 \geq 29^\circ$ die Übereinstimmung mit der Beobachtung gut ist. Mit abnehmendem χ_1 -Winkel bleibt dann aber die beobachtete Kristallfestigkeit weit hinter der be-

rechneten, die einen sehr steilen Anstieg aufweist — und bei 15° bereits $6,43 \text{ kg/mm}^2$ beträgt — zurück*.

Es besteht nun die Möglichkeit, daß die in diesen Fällen auftretende, oft muschelige Reißfläche (Fig. 3) überhaupt nicht mit einer Kristallfläche identisch, sondern daß sie durch kristallographisch gesetzloses Reißen entstanden ist.

Nun tritt aber normales Reißen auch bei solchen Kristallen nicht ein, die noch Prismenflächen mit χ_1 -Winkeln zwischen 29° und 14° aufweisen. Es erscheint indessen durchaus möglich, daß bei diesen Stücken das Auftreten der Prismenflächen lediglich auf ein durch den Bruch verursachtes Aufspalten zurückzuführen ist. In der Tat weisen diese Kristalle häufig kleine, querliegende, sehr raue Flächen an der Spitze der Reißstelle auf, so daß man annehmen kann, der Bruch sei zuerst an dieser Stelle eingetreten und habe sich dann längs der Prismenflächen fortgesetzt.

Obwohl eine einwandfreie Entscheidung nicht vorliegt, scheint uns doch die Annahme erlaubt, daß die Basis des Tellurs als Reißfläche nicht

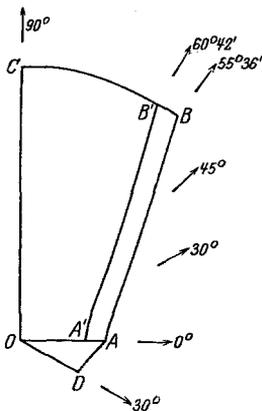


Fig. 11.

Schnitt des Festigkeitskörpers von Tellurkristallen mit den kristallographischen Hauptebenen.

- $OABCO$ = Schnitt mit einer Prismenfläche erster Art.
 $OA'B'CO$ = " " " " zweiter Art.
 $OADO$ = " " der Basis.

auftritt und daß für einen Bereich der Orientierungen, der durch Stellungswinkel der querliegenden Prismenfläche von 0 bis etwa 29° gekennzeichnet ist, das Reißen kristallographisch gesetzlos erfolgt, dadurch, daß die Materialfestigkeit vor Erreichung der für die Prismenfläche charakteristischen Normalspannung überschritten wird.

* Daß ferner auch für die sehr schrägen Lagen der Prismenflächen das Reißen nicht unter einer konstanten Normalspannung auf die Basis erfolgt, wurde bereits hervorgehoben.

V. Räumliche Darstellung der Orientierungsabhängigkeit der Zerreißfestigkeit. Eine besonders anschauliche Vorstellung von der Abhängigkeit der Kristalleigenschaften von der kristallographischen Orientierung gewinnt man durch Betrachtung von räumlichen Modellen von der Beschaffenheit, daß die Länge des Radiusvektors vom Mittelpunkt bis zur Oberfläche ein Maß der betreffenden Eigenschaft in der Richtung des Radiusvektors gibt. Solche Modelle sind beispielsweise für die Festigkeitseigenschaften von Metallkristallen wiederholt konstruiert worden*.

Für Tellurkristalle wurde nun ebenfalls ein Festigkeitskorper konstruiert, der die Verteilung der Zerreißfestigkeit auf die verschiedenen

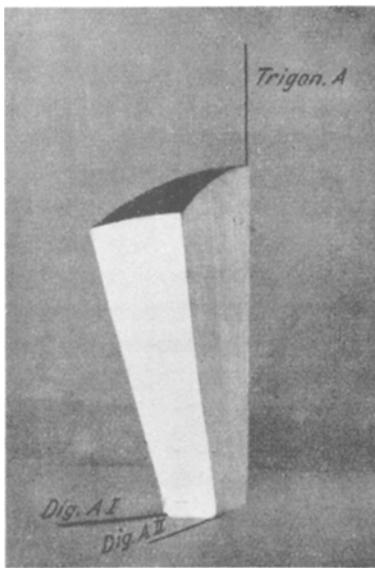


Fig. 12. Element des Festigkeitskorpers von Tellurkristallen.

kristallographischen Richtungen darstellt. Die Grundlagen für die Berechnung bilden 1. der Befund, daß für den Bereich von 29° bis 90° des Winkels zwischen querstliegender Prismenfläche und Langssache das Zerreißen an die Erreichung einer konstanten, kritischen Grenznormalspannung von 431 g/mm^2 auf diese Prismenfläche gebunden ist, und 2. die Annahme, daß für Winkel $< 29^\circ$ das Zerreißen mit konstanter Festigkeit von $1,8 \text{ kg/mm}^2$ Querschnitt erfolgt**.

In Fig. 11 ist der Schnitt des Festigkeitskorpers mit der Basis, einer Prismenfläche erster Art und einer Prismenfläche zweiter Art wiedergegeben. Die Kurvenzüge AB , $A'B'$ und AD entsprechen einem Zerreißen entlang einer Prismenfläche erster Art, der Kreisbogen BC gesetzslosem Reien mit konstanter Zerreißfestigkeit von $1,8 \text{ kg/mm}^2$. Das

* J. Czochralski, ZS. f. Metallkde. **15**, 7, 1923; E. Schmid, Verhandl. d. Intern. Kongr. f. angew. Mechan. S. 342, Delft 1924; ZS. f. Metallkde. **19**, 154, 1927.

** Allerdings weist die Zerreißfestigkeit auch in diesem zweiten Orientierungsbereich im Mittel noch einen leichten Anstieg mit sinkendem χ_1 -Winkel auf. Die Berücksichtigung dieses Umstandes würde jedoch die Form des Festigkeitskorpers nicht typisch verändern.

räumliche Modell ist in Fig. 12 dargestellt. Fig. 13 zeigt schließlich den durch Anwendung der Symmetriebedingungen aus dem Element Fig. 12 hervorgegangenen, vollen Festigkeitskörper, der die starke Orientierungsabhängigkeit der Zerreißfestigkeit klar erkennen läßt. Die durch kristallographisches Zerreißen ausgezeichneten Orientierungsbereiche sind von den dem gesetzlosen Bruch entsprechenden Kugelkalotten deutlich zu unterscheiden.

VI. Plastizität. Bei den normalen Zerreiversuchen war, wie bereits hervorgehoben, eine plastische Dehnung der Kristalle nicht beobachtet worden. Bei geeigneter Versuchsführung, insbesondere bei Biegung, kann jedoch auch für die spröden Tellurkristalle plastische Deformation nachgewiesen werden. In Fig. 14 sind einige Biegungskurven wiedergegeben, die bei orientierenden Versuchen, bei denen Last und Durchbiegung gemessen wurden, erhalten worden sind*. Die bleibenden Durchbiegungen betragen bis zu 0,7 mm bei einer Gesamtlänge der untersuchten Kristalle von 5 cm.

In einigen Fällen konnte auch schon beim Durchbrechen von Hand eine geringe Biegung der Kristalle beobachtet werden. Unter dem Mikroskop waren deutlich Translationslinien erkennbar (Fig. 15 und 16), die, wie aus Fig. 16 ersichtlich ist, parallel einer Bruchfläche verlaufen. Die Translationsfläche ist also eine Prismenfläche erster Art.

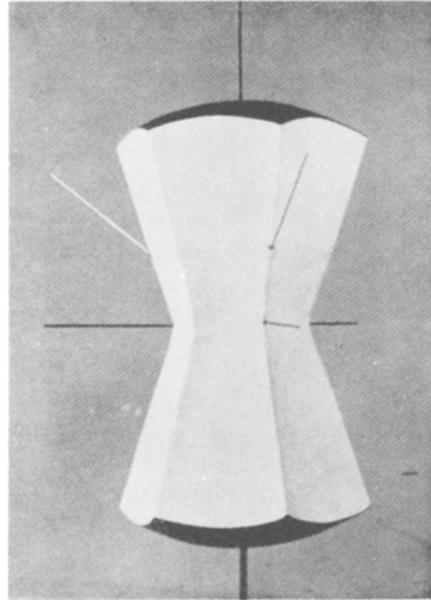


Fig. 13. Festigkeitskörper von Tellurkristallen. (Durch Anwendung der Symmetrieelemente aus dem Element — Fig. 12 — erhalten.) Außer der hexagon. Achse und den digon. Achsen erster Art sind auch die Rhomboederachsen ersichtlich gemacht.

* Die Kristalle wurden an den Enden auf Rollen gelagert und in der Mitte belastet. Die Belastung erfolgte durch einen Schwimmkörper und konnte durch Änderung des Wasserstandes vermehrt oder vermindert werden. Die Lagenänderung der Kristallenden wurde mit Hilfe von aufgekitteten Spiegeln, Skale und Fernrohr beobachtet.

Eine ganz besonders starke Durchbiegung zeigte der in Fig. 17a wiedergegebene Kristallsplitter. Man erkennt deutlich die von zwei Prismenflächen gebildete, in Richtung der hexagonalen Achse liegende,

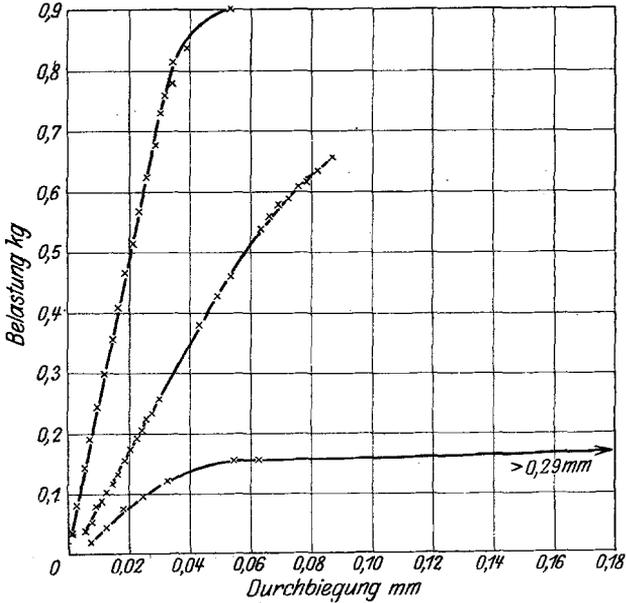


Fig. 14. Plastische Verformung von Tellurkristallen durch Biegung.



Fig. 15.



Fig. 16.

Fig. 15 und 16. Translationslinien an gebogenen Tellurkristallen. Vergr. = 7.

scharfe Kante (vgl. die Nachzeichnung Fig. 17b). Da die Richtung, in der sich der Kristall bog, senkrecht zu dieser Kante liegt, kann die hexagonale Achse als Translationsrichtung nicht in Betracht kommen. Auch bei den Stücken mit Translationslinien lag die Krümmungsrichtung

etwa senkrecht zu der hexagonalen Achse. Es ist also anzunehmen, daß die Translation in Richtung einer digonalen Achse erster Art erfolgt.

VII. Zusammenfassung. 1. Ein einfaches Verfahren zur Herstellung von Metallkristallen, das bei Tellur und einigen anderen Metallen gute Erfolge zeitigt, wird beschrieben.

2. In Übereinstimmung mit älteren kristallographischen Angaben werden die an Tellurkristallen auftretenden, gut spaltenden Kristallflächen als Prismenflächen erster Art bestimmt.

3. Im Bereich von 90° bis 29° für den Winkel χ_1 zwischen querstliegender Prismenfläche erster Art und der Drahtachse erfolgt das Zer-



Fig. 17 a.

Stark gebogener Tellurkristallsplitter.
Vergr. = 3.

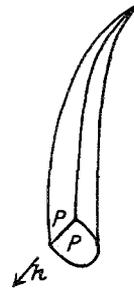


Fig. 17 b.

Nachzeichnung. P = Prismenfläche erster Art,
 h = hexagonale Achse.

reißen bei einer konstanten, kritischen Normalspannung senkrecht zur Reißfläche von 431 g/mm^2 . Für χ_1 -Winkel von 29° bis 0° fällt sodann die im Moment des Zerreißen wirksame Normalspannung systematisch zu sehr kleinen Werten ab. Es scheint, daß für diese Orientierungen vor Erreichung der kritischen Normalspannung senkrecht zur Prisma die Kristallfestigkeit überschritten wird und daß auch das im Bereich von 15° bis 29° noch beobachtete Auftreten der Prismenfläche als Reißfläche sekundärer Natur ist.

4. Eine plastische Deformation von Tellurkristallen konnte nur durch Biegung nachgewiesen werden. Es scheint sich die Prismenfläche erster Art als Translationsfläche und die digonale Achse erster Art als Translationsrichtung zu betätigen.

Die Versuche zu dieser Arbeit wurden in den Jahren 1924 bis 1925 im Kaiser Wilhelm-Institut für Faserstoffchemie in Berlin-Dahlem ausgeführt.

Frankfurt a. M., im November 1927.