

INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM

Wissenschaftlicher Film B 732/1957

Aus dem Institut für Theoretische Physik der
Universität Göttingen

**Entstehung von Deformationszwillingen in
Zink-Einkristallen**

Von
R. SIEMS

Mit 9 Abbildungen

GÖTTINGEN 1959

Der Film wurde aus Forschungsaufnahmen zur Veröffentlichung
der Ergebnisse zusammengestellt

Länge der Kopie (16-mm-Stummfilm, schwarz-weiß): 60 m
Vorführdauer: 5 1/2 Min. — Vorführgeschwindigkeit: 24 B/s

Die Herstellung des Films erfolgte mit Unterstützung der
Deutschen Forschungsgemeinschaft in den Jahren 1954 und 1956
durch das Institut für den Wissenschaftlichen Film, Göttingen

(Direktor: Dr.-Ing. G. WOLF)

Sachbearbeitung: Dr. G. BEKOW

Aufnahme: E. HEYSE

Entstehung von Deformationszwillingen in Zink-Einkristallen

Von R. SIEMS

Einleitend wird in einer schematischen Zeichentrickdarstellung die Entstehung von Deformationszwillingen erläutert. Es folgen dann die unter dem Mikroskop sichtbaren Oberflächenerscheinungen beim Auftreten von Deformationszwillingen in Zink-Einkristallen unter Zug in normaler Geschwindigkeit und Zeitdehnung (Aufnahmefrequenz 2000 B/s). Man sieht das Erscheinen von Zwillingen an der Oberfläche (Entstehung) und die Vergrößerung schon vorhandener Zwillinge (Wachstum).

I. Allgemeine Vorbemerkungen

Bei der mechanischen Zwillingsbildung in Metallen ändert sich in einem Teil des ursprünglichen Kristalls die Orientierung so, daß nach der Zwillingsbildung die beiden Teile zu einer für den betreffenden Kristall charakteristischen Ebene symmetrisch liegen. Dabei führt, makroskopisch gesehen, der sich umwandelnde Teil eine Scherbewegung in einer bestimmten Richtung parallel zu dieser Symmetrieebene aus. Wir bezeichnen den Teil des Kristalls mit der ursprünglichen Orientierung als Matrix, den mit der neuen als Zwilling, die Symmetrieebene als Zwillingsebene, die Richtung der Scherbewegung als Zwillingsrichtung (vgl. Abb. 1).

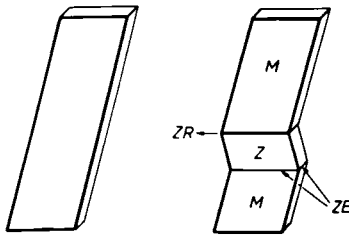


Abb. 1. Kristall vor und nach der Zwillingsbildung
M: Matrix, Z: Zwilling, ZR: Zwillingsrichtung, ZE: Zwillingsebene

Beim Zink kommen als Zwillings Ebenen die Ebenen $(10\bar{1}2)$, als Zwillingsrichtungen die Richtungen $(\bar{1}011)$ vor (vgl. Abb. 2). Abb. 3 zeigt die Atome in einer zur Zwillings Ebene senkrechten Gitterebene. Man sieht, daß bei Zink z.B. Druck auf die Basisebene oder Zug an den Prismenflächen zur Zwillingsbildung führen sollte. Für Zugversuche darf der Winkel zwischen Probenachse und Basisebene nicht zu groß sein, wenn Zwillige entstehen sollen.

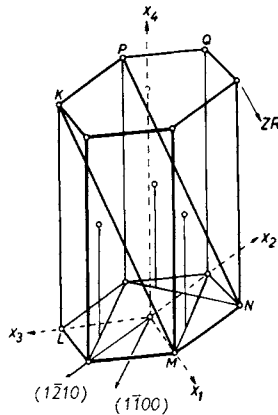


Abb. 2. Hexagonales Gitter

$KPMN$: Zwillings Ebene $(10\bar{1}2)$, ZR : Zwillingsrichtung (parallel zu KM)

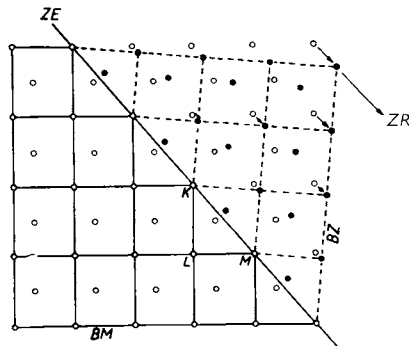


Abb. 3. Atomlagen vor (○) und nach (●) der Zwillingsbildung

ZE : Zwillings Ebene, ZR : Zwillingsrichtung, BM : Basisebene in der Matrix, BZ : Basisebene im Zwilling

Nun erstrecken sich im Zink im allgemeinen die Zwillinge nicht, wie in Abb. 1 gezeigt, über den ganzen Kristallquerschnitt. Sie haben viel-

mehr zunächst die Form einer Linse, oder, wenn sie auf einer Seite die Kristalloberfläche erreicht haben, einer halben Linse (vgl. Abb. 8a u. 8d, S. 9). Die Zwillingsgrenze verläuft also nicht mehr überall parallel zur Zwillingsebene. An den Stellen, wo die Zwillingsgrenze eine zur Zwillingsebene parallele Gitterebene schneidet, etwa bei *A* und *B* in Abb. 8a (S. 9), liegen Versetzungen, deren Burgersvektor in Zwillingsrichtung weist. (Die Versetzungslinien stehen in Abb. 8a senkrecht auf der Zeichenebene.) Wenn diese Versetzungen, etwa unter dem Einfluß einer äußeren Zugspannung, nach außen laufen, und in den darüberliegenden Ebenen gleichfalls Versetzungen laufen, wächst der Zwilling¹⁾.

Der zeitliche Verlauf des Dickenwachstums eines solchen Zwillings soll näher untersucht werden.

Die ersten Versuche in dieser Richtung stammen von FÖRSTER und SCHEL [2], welche an Wismut die mit der Zwillingbildung verbundene Änderung des elektrischen Widerstandes mit einem Kathodenstrahl-Oszillographen sichtbar machten. Sie fanden, daß die mit der Bildung eines Zwillings verbundenen Ausschläge etwa $(0,5 \text{ bis } 35) \cdot 10^{-5} \text{ s}$ dauern.

JILLSON [3] untersuchte unter Druck entstehende und verschwindende Zinkzwillinge kinematographisch und gab für je einen Fall den zeitlichen Verlauf der Umwandlung an. Man liest aus seiner Kurve ein Anfangswachstum mit einer jedenfalls 4 mm/s überschreitenden Geschwindigkeit und ein sich anschließendes stufenförmiges²⁾ Wachstum mit einer Geschwindigkeit von ungefähr 1 mm/s auf den Stufen ab. Dabei handelt es sich um einen verhältnismäßig dicken Zwilling (etwa 125 μ).

Für den vorliegenden Film wurden zylindrische Einkristalle von etwa 2,8 mm Durchmesser benutzt, die aus 99,995% Zink aus der Schmelze in Glasröhren gezüchtet wurden. Kristalle mit brauchbarer Orientierung wurden in Chromsäurelösung elektrolytisch poliert und dann in Aluminiumfassungen gelötet. Die freie Länge der Kristalle betrug 1 bis 3 cm. — Die Kristalle wurden in der in Abb. 4 dargestellten Apparatur belastet. In den meisten Fällen wurden Teile der Scheitelfläche aufgenommen. (Die Scheitelfläche ist der Teil der Oberfläche, der in der Umgebung der Schnittlinie zwischen der Oberfläche und einer durch Probenachse und Zwillingsrichtung bestimmten Ebene liegt.) Die Zwillinge heben sich durch eine andere Oberflächenneigung von der Matrix ab (Abb. 8d). Dieser Effekt ist auf der Scheitelfläche deutlicher als auf der dazu senkrechten „Seitenfläche“. Die Last wurde schrittweise erhöht, bis die ersten Zwillinge entstanden. Dann wurde die Kamera eingeschaltet und eine Zusatzlast von 2 bis 10 kg aufgelegt.

Die Aufnahmefrequenz betrug bei den ersten Aufnahmen 50 B/s. Da diese Frequenz zur zeitlichen Auflösung der Vorgänge nicht ausreichte,

¹⁾ Siehe COTTRELL u. BILBY [1] sowie THOMPSON u. MILLARD [4] (Literaturverzeichnis am Ende des Textes).

²⁾ Da die Stufenhöhe an der Grenze des Auflösungsvermögens (etwa 25 μ) liegt, ist es möglich, daß diese Stufen durch Schwankungen der Meßergebnisse vorgetäuscht werden.

wurde sie auf 700 B/s und schließlich auf 2000 B/s erhöht. Auf den so erhaltenen Aufnahmen wurde dann Bild für Bild die Dicke der Zwillinge gemessen.

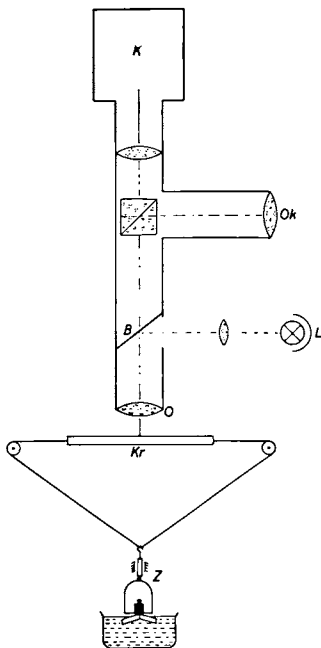
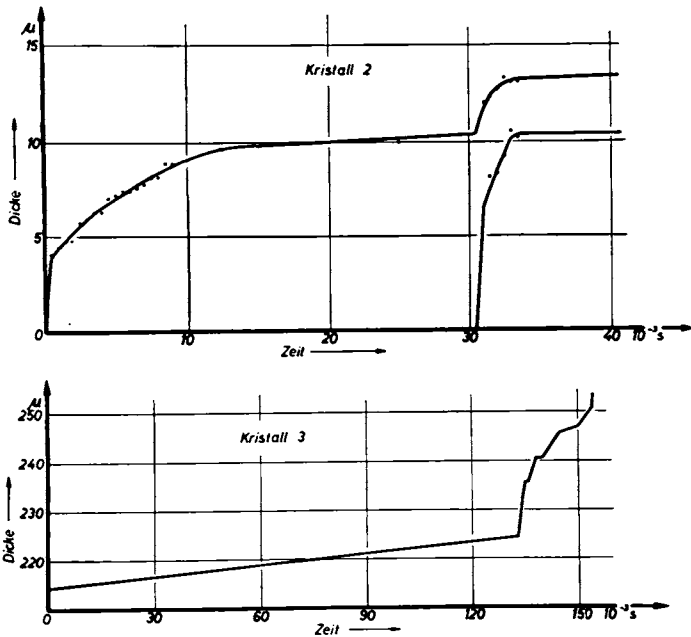


Abb. 4. Versuchsanordnung

K: Kamera, *Ok*: Okular, *L*: Lichtquelle, *B*: halbdurchlässige Platte,
O: Objektiv, *Kr*: Kristall, *Z*: Zugapparatur

Die Abbildungen 5, 6 und 7 zeigen einige der erhaltenen Kurven. Es handelt sich zum Teil um das Weiterwachsen schon vor der Belastung vorhandener Zwillinge, zum Teil um das erste Sichtbarwerden neuer Zwillinge.

Man sieht, daß im allgemeinen beim Entstehen zunächst eine sehr schnelle Zunahme der Dicke mit einer Geschwindigkeit von v_1 erfolgt, die sich nur hinsichtlich ihrer unteren Grenze abschätzen läßt. und in den einzelnen Fällen größer als etwa 10 bis 80 mm/s ist. Daran schließt sich ein langsames Weiterwachsen mit Geschwindigkeiten von v_2 um etwa 1 mm/s und schließlich häufig ein Kriechen über eine längere Zeit mit Geschwindigkeiten von v_3 um etwa 0,1 mm/s an. In einem Fall (Abb. 6) wurde ferner bei einem schon sehr dicken Zwilling zunächst ein Kriechen mit etwa 0,1 mm/s beobachtet, woran sich dann plötzlich ein sehr schnelles Wachsen mit etwa 15 mm/s anschloß.



Abn. 5 u. 6. Wachstumskurven von Zwillingen nach meßtechnischer Auswertung der Filmaufnahmen

Es gibt zwei Möglichkeiten, die beobachteten Oberflächenerscheinungen zu deuten:

A. Die Zwillinge entstehen an der Oberfläche, und zwar mit sehr großer Anfangsgeschwindigkeit, und zeigen den oben experimentell gefundenen Geschwindigkeitsverlauf. — Dann sind die ziemlich scharfen Übergänge zwischen den einzelnen Stadien des Wachstums schwer zu verstehen. Außerdem kann man sich nicht vorstellen, wie die für das Entstehen eines Zwillings nötige Spannung an der Oberfläche zustande kommen soll.

B. Die Zwillinge entstehen im Innern des Kristalls. — Ihr Wachstum spielt sich in folgenden Stadien ab (vgl. Abb. 8):

1. Der Zwillings ist an der Oberfläche noch nicht zu sehen (Abb. 8a). Es gibt zwei Effekte, welche der äußeren Schubspannung entgegenwirken und das Wachstum des Zwillings bremsen bzw. ganz abstoppen: die bei allen Versetzungen und natürlich auch den Zwillingsversetzungen wirksamen Hindernisse und die durch die Verzerrung der Matrix entstandene, einer weiteren Vergrößerung des Zwillings entgegenwirkende Spannung.

2. Ist die angelegte Schubspannung groß genug, um diese rücktreibenden Spannungen zu überwinden, so wächst der Zwillings und

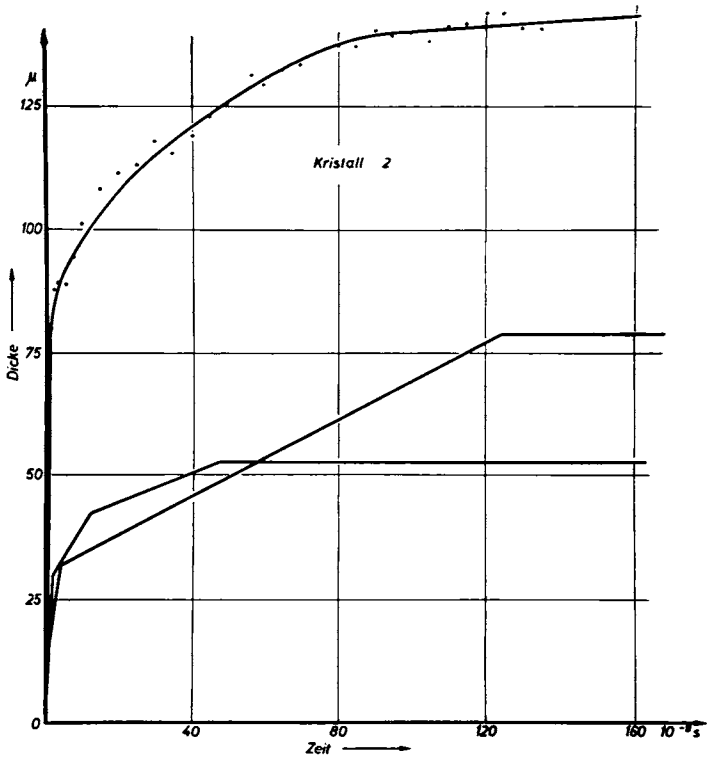


Abb. 7. Wachstumskurven von Zwillingen
nach meßtechnischer Auswertung der Filmaufnahmen

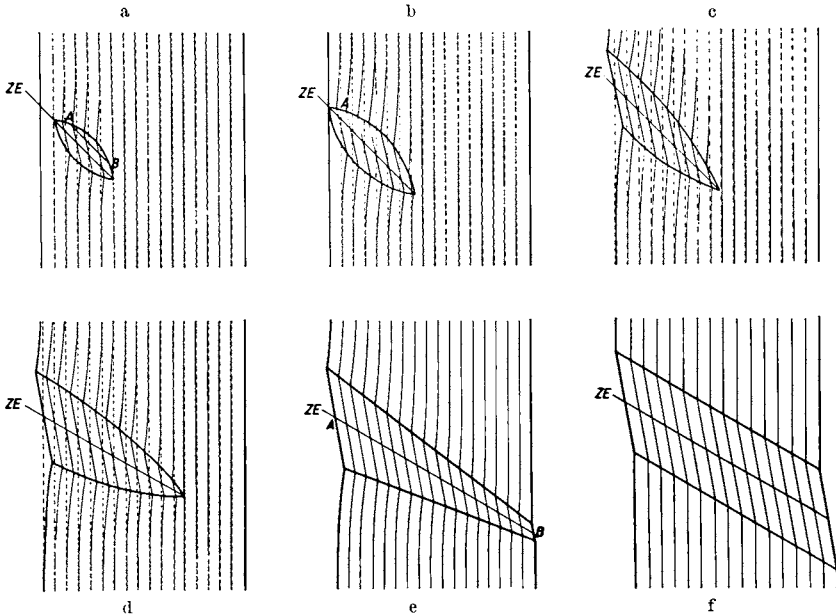
erreicht schließlich die Oberfläche (Abb. 8b). Jetzt können die äußeren Atomreihen dem Druck von innen ausweichen. Damit verschwindet die Gegenspannung, und die etwa bei A liegenden Versetzungen können unter der großen Spannung des hinter ihnen liegenden verzerrten Gitters schnell an die Oberfläche laufen. Oder anders ausgedrückt: Der Zwilling geht schnell von der instabil gewordenen Linsenförmigkeit in die Form einer halben Linse über, d.h. er wächst sehr schnell, bis er etwa die in Abb. 8c wiedergegebene Gestalt hat. — Der Übergang von Abb. 8b nach Abb. 8c tritt an der Oberfläche als das sehr schnelle Anfangswachstum in Erscheinung (Geschwindigkeit v_1).

3. Im Anschluß daran wird der Zwilling unter der äußeren Spannung an der Oberfläche mit einer Geschwindigkeit v_2 weiterwachsen, da vorläufig noch keine Gegenspannung vorhanden ist, bis sich im Zustand entsprechend Abb. 8d eine stabile Form des Zwillinges ausgebildet hat.

4. Jetzt folgt ein stationäres Weiterkriechen mit einer Geschwindigkeit v_3 , wobei gleichzeitig Länge und Dicke des Zwillinges zunehmen. —

Schließlich hört das Wachstum auf Grund der Bildung von Hindernissen auf.

5. Falls der Zwilling jedoch eine gewisse Mindestgröße überschreitet, die vom Kristallquerschnitt abhängt, wird die Halblinsenform instabil, der Zwilling breitet sich sehr schnell über den ganzen Querschnitt aus (vgl. Abb. 8 e) und wächst auch an der Oberfläche bei A — der ursprünglichen Berührungsstelle — mit der großen Geschwindigkeit von v_4 weiter: an der gegenüberliegenden Stelle B wird er dagegen als mit sehr großer Geschwindigkeit v_5 entstehender Zwilling in Erscheinung treten („Durchschlag“). — Abb. 8 f zeigt die endgültige Gestalt des Zwillings.



Abbn. 8 a bis 8 f. Die verschiedenen Stadien des Zwillingswachstums

..... Gitterebenen vor der Zwillingsbildung

- - - - - Gitterebenen nach der Zwillingsbildung

Eine Abschätzung der Energie der verschiedenen Zwillingsformen (Linsen, Halblinsen, Scheiben) führt zu ähnlichen Ergebnissen wie diese qualitativen Überlegungen.

II. Erläuterungen zum Film

Der Film beginnt mit einer schematischen Zeichentrickdarstellung, die — in mehrfacher Wiederholung — den Vorgang der Zwillingsentstehung nach der oben ausführlich beschriebenen Vorstellung ver-

anschaulicht (vgl. Abb. 8a—f). Bei den daran anschließenden Mikroaufnahmen wurden insgesamt drei Kristalle verwendet, deren Orientierung aus der folgenden Tabelle zu ersehen ist:

Kristall	ϱ	χ_0
1	21°	15°
2	16,8°	13,6°
3	4,8°	2,5°

Dabei ist χ_0 der Winkel zwischen Zugrichtung und Basisfläche (0001) und ϱ der Winkel zwischen Zugrichtung und der Richtung (10 $\bar{1}$ 0).

Die Ausdehnung des Gesichtsfeldes vom oberen Rand bis zum unteren beträgt etwa 0,5 mm.

Normale Geschwindigkeit¹⁾ mit Wiederholung

Die hier folgenden Aufnahmen zeigen drei Versuche an Kristall 1. Da die Vorgänge sehr rasch verlaufen, ist jedem der Versuche eine gezeichnete Darstellung des Ablaufs vorangestellt, um den Betrachter darauf hinzuweisen, an welcher Stelle im Bild ein Zwilling erscheint bzw. vorhandene Zwillinge sich verändern: die Vorgänge selbst werden jeweils zweimal gezeigt.

Im ersten Versuch werden zwei benachbarte schon vorhandene Zwillinge plötzlich größer, vereinigen sich und erscheinen dadurch nachher als ein breiter Zwilling. — Äußere Schubspannung in der günstigsten Zwillingsebene und in Zwillingsrichtung vor der Belastung: $\tau = 410$ p/mm², Belastungsschritt $\Delta\tau = 35$ p/mm².

Im nächsten Versuch entstehen rechts neben einigen schon vorhandenen Zwillingen gleichzeitig mehrere neue ($\tau = 300$ p/mm², $\Delta\tau = 35$ p/mm²).

Schließlich wird ein kleiner Zwilling plötzlich dicker: etwas später entsteht rechts davon in unmittelbarer Nachbarschaft ein zweiter Zwilling, während der erste sich gleichzeitig noch etwas verbreitert ($\tau = 380$ p/mm², $\Delta\tau = 35$ p/mm²).

30 fache Zeitdehnung Aufnahmefrequenz 2000 B/s

Ein ähnliches Phänomen wie in der vorhergehenden Aufnahme sieht man jetzt am Kristall 2 (Abb. 5), nur kann man in diesem Fall den zeitlichen Verlauf wegen der hohen Aufnahmefrequenz genauer verfolgen: zunächst entsteht ein einzelner Zwilling: $30 \cdot 10^{-3}$ Sek. später, während das Wachstum dieses Zwillings schon fast aufgehört hat, entsteht in etwa 75μ Entfernung links vom ersten ein zweiter Zwilling,

¹⁾ Die *Kursiv*-Überschriften entsprechen den Zwischentiteln im Film.

während genau gleichzeitig der erste sich noch einmal sehr schnell verbreitert ($\tau = 560 \text{ p/mm}^2$, $\Delta\tau = 70 \text{ p/mm}^2$).

In einem neuen Beispiel erscheinen links neben einem dicken, schon vorhandenen Zwilling mit sehr großer Anfangsgeschwindigkeit mehrere neue. Hier, wie auch in der folgenden Aufnahme sowie in der letzten Aufnahme des Films, kann es sich vielleicht um den oben beschriebenen Durchschlag eines Zwillings über den ganzen Querschnitt handeln (vgl. Abb. 8e, Beobachtung bei B). Daß man zunächst noch mehrere getrennte Zwillinge wahrnimmt, ist nicht verwunderlich, da in der Regel Zwillinge, die auf der Scheitelfläche aus einem dicken Stück bestehen, nach den Seiten hin auffächern (vgl. Abb. 9); ($\tau = 490 \text{ p/mm}^2$, $\Delta\tau = 70 \text{ p/mm}^2$).

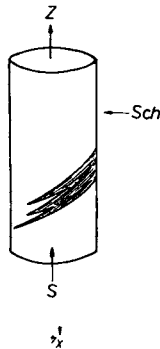


Abb. 9. Auffächerung eines dicken Zwillings

Z: Zugrichtung Sch: Scheitelfläche S: Seitenfläche

Im nächsten Versuch erscheinen wieder sehr schnell dicht beieinander mehrere Zwillinge. In dieser, wie auch in einigen anderen Aufnahmen, macht sich die bei der Zwillingsbildung stattgefundene Scherung durch ein deutliches Abknicken der (schon vorher vorhandenen) Gleitlinien an den Zwillingsgrenzen bemerkbar. In den Fällen dagegen, wo nach der Zwillingsbildung im Zwilling noch eine Gleitung stattfand, geht diese in der Basisebene des Zwillings vonstatten, d.h. die neuen Gleitebenen im Zwilling stehen in diesem Fall nahezu senkrecht auf denen in der Matrix ($\tau = 560 \text{ p/mm}^2$, $\Delta\tau = 35 \text{ p/mm}^2$).

Nun folgt eine Aufnahme an Kristall 3 (Abb. 6). Ein schon vorhandener Zwilling wächst zuerst langsam und dann plötzlich sehr schnell nach rechts weiter. Hier könnte es sich um einen Durchschlag über den ganzen Querschnitt handeln (vgl. Abb. 8e), der bei A beobachtet wird ($\tau = 1000 \text{ p/mm}^2$, $\Delta\tau = 200 \text{ p/mm}^2$).

Den Abschluß bildet ein Vorgang ähnlich dem der vorletzten Aufnahme an Kristall 2. Bei dem ganz links entstandenen Zwilling findet noch längere Zeit ein deutliches Weiterwachsen statt ($\tau = 420 \text{ p/mm}^2$, $\Delta\tau = 70 \text{ p/mm}^2$).

Literatur

1. COTTRELL, A. H., and B. A. BILBY. A Mechanism for the Growth of Deformation Twins in Crystals. *Phil. Mag.* **42** (1951), S. 573.
2. FÖRSTER, F., u. E. SCHEIL. Untersuchung des zeitlichen Ablaufs von Umklappvorgängen in Metallen. *Z. Metallkunde* **32** (1940). S. 165.
3. JILLSON, D. C., An Experimental Survey of Deformation and Annealing Processes in Zinc. *Trans. AIME* **188** (1950), S. 1009.
4. THOMPSON, N., and D. J. MILLARD. Twin Formation in Cadmium. *Phil. Mag.* **43** (1952), S. 422.

(Eingegangen am 16. 9. 1955)