

# Die Grundlagen der Verfestigungsvorgänge.

Von J. Czochralski, Frankfurt a. Main.

*Aus den Ergebnissen von Kaltreckversuchen an einem Kupferkristall und einem Aluminium-Einkristall in den verschiedensten Achsenrichtungen entwickelt der Verfasser Folgerungen hinsichtlich der Verfestigungsvorgänge in metallischen Stoffen. Begründung in den Eigenschaften und in der Geometrie der Raumgitter. Begriffserklärung der Verfestigung. Wirkung in den verschiedenen Walzrichtungen. Das Wesen der Verfestigung. Aufstellung eines Zustandschemas. Zusammenhang zwischen den Fließ- und Verfestigungsvorgängen und der inneren Reibung. Ausblick.*

Das Wesen der Metallverarbeitung durch Recken sind bleibende Materialdeformationen. Die Kenntnis der gesetzmäßigen Zusammenhänge der Reckvorgänge ist für alle Gebiete der technologischen Mechanik und der technischen Materialkunde von gleich großer Wichtigkeit.

## Erscheinungen an Vielkristallproben.

Den besten Einblick in die Fließvorgänge gewähren wohl die  $\sigma_{\text{eff}}$ -Kurven. Eine solche von P. Ludwik<sup>1)</sup> für Weichkupfer aufgestellte Kurve ist in Abb. 1 veranschaulicht. Die Querschnittsverminderungen sind auf der Wagerechten, die effektiven Spannungen ( $\sigma_{\text{eff}}$ ), bezogen auf den Momentanquerschnitt, auf der Senkrechten abgetragen. Ludwik stellt nun fest, daß sich aus der so ermittelten vollständigen Kurve der „effektiven Zugspannungen“ ergibt, daß nach Erreichen der höchsten Belastung, die mit dem Abschluß der gleichförmigen Dehnung zusammenfällt, und der alsbald folgenden Bruchbildung die „effektive Zugspannung“ fast auf das Doppelte wächst. Der Momentanquerschnitt im

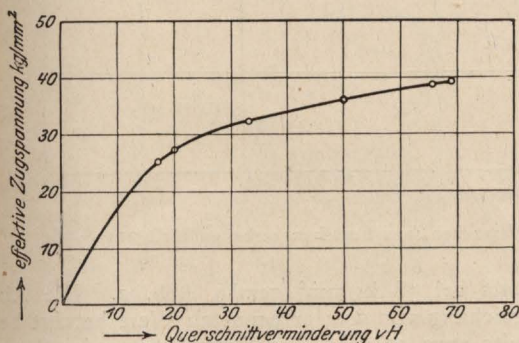


Abb. 1.  $\sigma_{\text{eff}}$ -Kurve für Kupfer (nach P. Ludwik).

Fließkegelbereich verjüngt sich währenddessen meist um das Vielfache. Dieser Verlauf der Kurve ist besonders bei sehr dehnbaren Metallen zu beobachten.

Ludwik stellt weiter fest, daß nach Überschreitung des Höchstlastpunktes (am Rückgang der Spannung erkennbar) die Einschnürung proportional der Spannungserhöhung, also in linearer Funktion zunimmt. Die Kurve nähert

sich um so mehr einer Geraden, je kleiner die Deformationsgeschwindigkeit ist. Bei größeren Geschwindigkeiten zeigt sie geringfügige Abweichungen vom geradlinigen Verlauf.

Die zwischen dem Querschnitt und der Spannung bestehende Beziehung hat W. v. Moellendorff<sup>2)</sup> dann als Erster in verallgemeinerter Form nachdrücklich vertreten. Er stützt sich

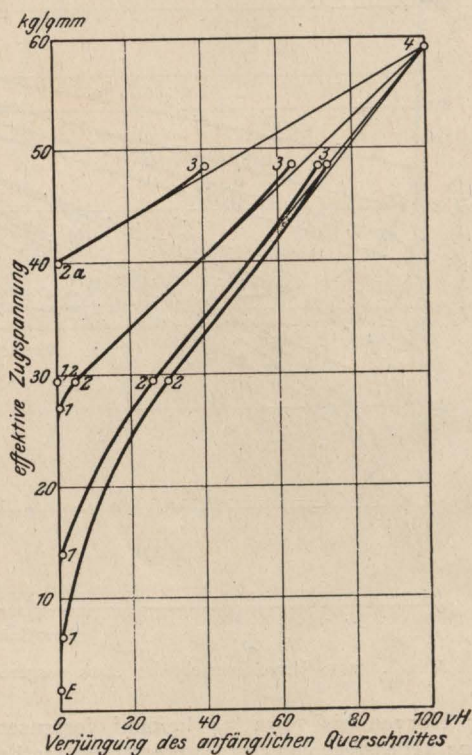


Abb. 2.  $\sigma_{\text{eff}}$ -Kurven verschieden stark vorgereckter Kupferproben (aus Z. d. V. d. I. 1913 S. 1018).

auf die in Abb. 2 wiedergegebenen Versuche an Zerreißstäben von verschieden vorgereckten Kupferproben. Nach seinen Versuchsergebnissen sollen die Kurven auch bei verschieden stark vorgereckten Proben den gleichen linearen Verlauf haben. Gestützt auf Ergebnisse von photographischen Feststellungen kam später auch Hauser<sup>3)</sup> an Zink- und Zinnproben zu ähnlichen Schlüssen. Moellendorff bringt die

<sup>1)</sup> Elemente der technologischen Mechanik, S. 18 u. f. Statt der Dehnungen  $\lambda$  ist auf der Wagerechten die Querschnittsverminderung abgetragen worden. Berlin 1909, Julius Springer.

<sup>2)</sup> Z. d. V. d. I. 1913 S. 938; vergl. hierzu Int. Z. f. Metallographie 1914 S. 44.

<sup>3)</sup> Berichte der Deutschen Physik. Gesellschaft 1913 S. 1278.



Beziehung in folgender Gleichung zum Ausdruck

$$\frac{s - s_2}{s_2} = \frac{q_2 - q}{q_2}$$

worin  $s$  die jeweilige Spannung,  $s_2$  die Höchstlastspannung,  $q$  den Momentanquerschnitt,  $q_2$  den Ursprungsquerschnitt bedeutet.

Diese Folgerung scheint wohl auch zuzutreffen, wie es die sehr eingehenden, in Abb. 3 wiedergegebenen, ebenfalls an Kupfer durchgeführten Versuche von W. Müller<sup>4)</sup> dargetan haben. Während die in Abb. 2 gegebenen Kurven schon bei etwa 45 kg/mm<sup>2</sup> von der Geraden abweichen, gelang es Müller infolge sehr geringer Reckgeschwindigkeit den geradlinigen Teil

Geraden liegen. Auf den ersten Teil dieses Satzes hat unter ausdrücklicher Beschränkung auf sehr dehnbare Materialien, wie erwähnt, schon Ludwik hingewiesen, während der zweite Teil von W. Müller durch sehr umfangreiche Versuche widerlegt worden ist. Nach seinen Ergebnissen liegen die Höchstlastpunkte  $s_2$  nicht auf einer der Abszisse parallelen Geraden, sondern auf einer hyperbelähnlich gekrümmten Linie (vgl. Abb. 3,  $\sigma_{HL}$ -Linie; die Kurve für die Erweichung gibt die Lage der Höchstlastgrenze nach dem Anlassen). Bei Kupfer, bei dem die Dehnung fast erschöpft ist, liegt die Höchstlastgrenze bei 44 kg/mm<sup>2</sup> und darüber, demnach müßte der Punkt  $s_4$  bei etwa 88 kg/mm<sup>2</sup> liegen,

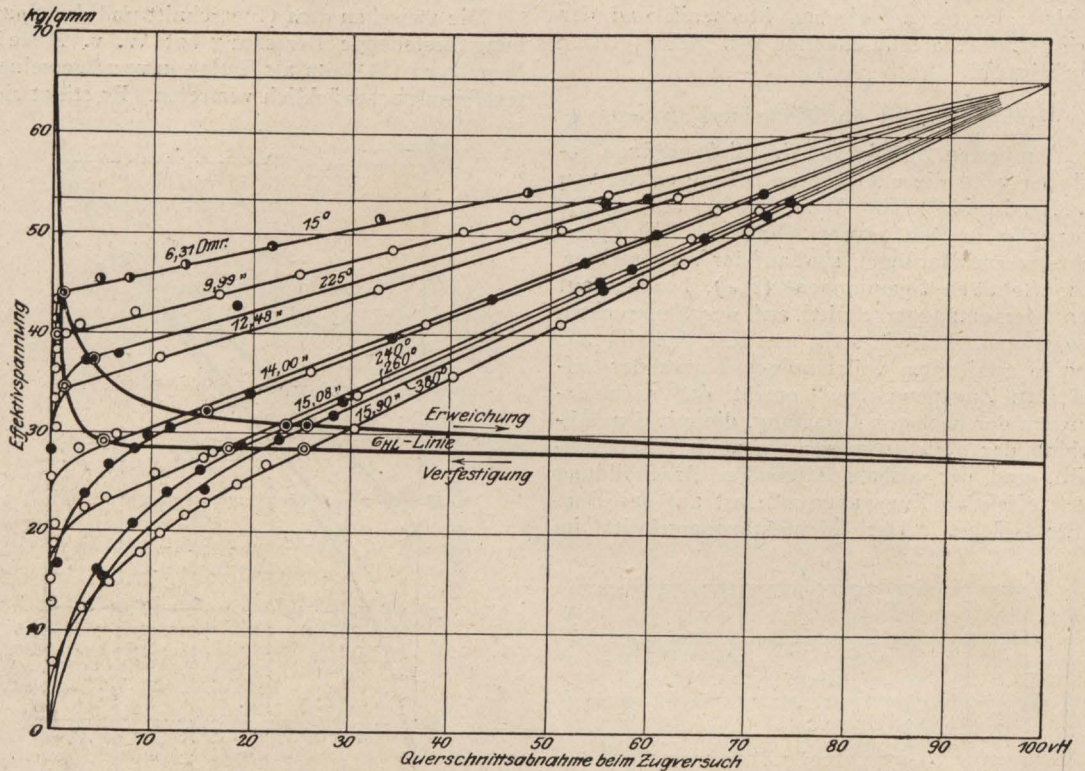


Abb. 3.  $\sigma_{eff}$ -Kurven verschieden stark vorgereckter Kupferproben (aus Forschungsarbeiten Heft 211 S. 38)

der Kurven bis etwa 54 kg/mm<sup>2</sup> fortzusetzen. Ganz abgesehen von der Frage streng mathematischer Beziehungen kann also dieser Beobachtung eine gewisse Gesetzmäßigkeit nicht abgesprochen werden.

Darüber hinaus zieht Moellendorff aus seinem Diagramm den Schluß, daß auch die  $\sigma_{eff}$ -Kurven verschieden stark im Ziehen vorgereckter Drähte, die in einen geradlinigen Ast münden, einander in einem gemeinsamen virtuellen Endpunkt 4 (Abb. 2) schneiden, dessen effektive Spannung  $s_4$  doppelt so groß ist, wie die effektive Spannung  $s_2$  im Punkte 2. (Die Punkte 3 zeigen die Spannung bei der Bruchlast an.) Die Höchstlastpunkte  $s_2$  sollen gemäß Abb. 2 auf einer der Abszisse parallelen

statt bei 58 kg/mm<sup>2</sup> gemäß Abb. 2. Die Abweichung von dem errechneten Wert beträgt bereits etwa 52 vH. Die Formulierung des Spannungsverhältnisses  $s_4 = 2 s_2$  wäre demnach wohl wieder zu beschränken auf die von Ludwik für Weichmetalle gegebene Annäherungsform.

### Eigenschaften der Kristalle in den verschiedenen Achsenrichtungen.

Dennoch können kaum Zweifel darüber bestehen, daß den zunächst von Ludwik und Moellendorff gedeuteten Punkten  $s_2$  und  $s_4$  der  $\sigma_{eff}$ -Kurve irgendwelche besondere Auszeichnung zukommt. Es ist ohne weiteres zu verstehen, daß die Erklärung für das Auftreten dieser hervorstechenden Punkte wohl in den Eigenschaften der Kristalle selbst zu suchen sein dürfte.

<sup>4)</sup> Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Ingenieurwesens Heft 211 S. 38.



Während nun über die Eigenschaften elastisch beanspruchter Kristalle die physikalische Forschung zu einem gewissen Abschluß gelangt ist, herrscht über deren Zustand und Verhalten bei überelastischer Beanspruchung völliges Dunkel. Umfangreiche Untersuchungen über die elastischen Eigenschaften sind an einer großen Anzahl von Mineralien durchgeführt worden. Die Eigenschaften werden am besten durch besondere Körper dargestellt, deren Halbmesser die Werte der Eigenschaftsziffern wiedergeben. Über die Flächen der Koeffizienten  $\epsilon$  der elastischen Dehnung von Flußspat und Baryt<sup>5)</sup>

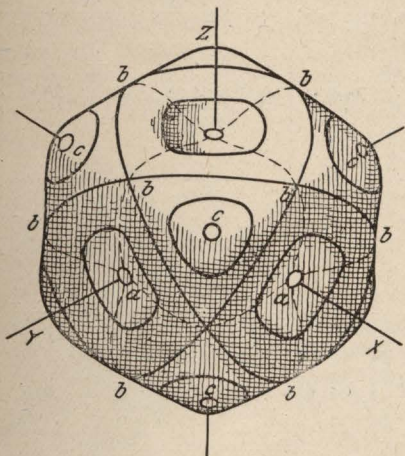


Abb. 4. Oberfläche des Koeffizienten  $\epsilon$  der elastischen Dehnung eines Flußspatkristalls (nach Liebisch).

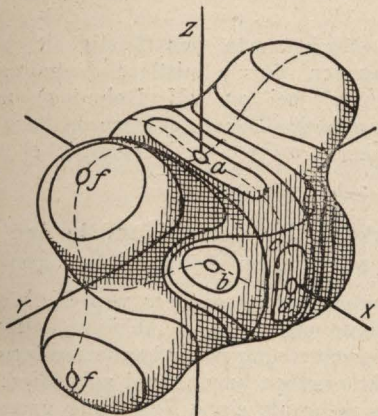


Abb. 5. Oberfläche des Koeffizienten  $\epsilon$  der elastischen Dehnung eines Barytkristalls (nach Liebisch).

geben z. B. Abb. 4 und 5 Aufschluß. Aber schon die Angaben über die Festigkeitseigenschaften sind äußerst spärlich. Für Steinsalz sind einige Zahlenwerte von Sella und Voigt<sup>6)</sup> angegeben worden.

Nach den Ergebnissen ändert sich bei Steinsalz der Wert der Festigkeit ähnlich wie der Wert des Koeffizienten  $\epsilon$  der elastischen Deh-

nung mit der kristallographischen Orientierung der Richtung, in welcher der Zug ausgeübt wird. Bei Steinsalz verhalten sich die am meisten von einander abweichenden Werte der Festigkeit etwa wie 1 : 10.

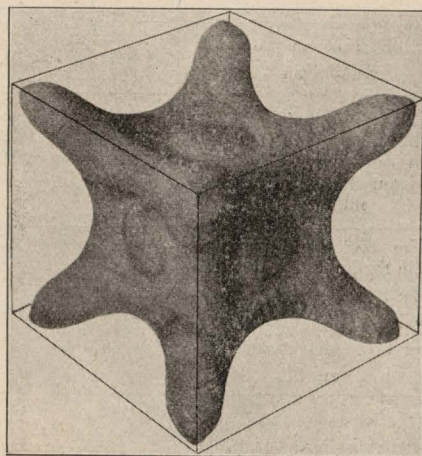


Abb. 6. Oberfläche der Festigkeit (Höchstlastgrenze) eines Kupferkristalls.

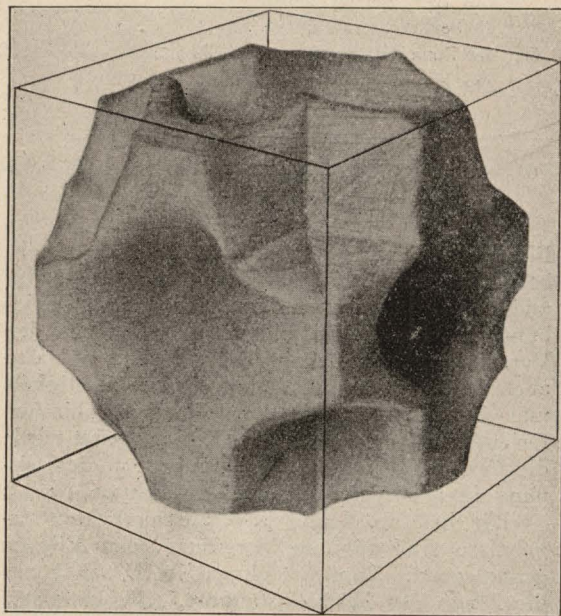


Abb. 7. Oberfläche der (gleichförmigen) Dehnung eines Kupferkristalls.

Wie liegen nun diese Verhältnisse bei Metallkristallen? Die Antwort auf die Frage sei in den in Abb. 6 und 7 und Zahlentafel 1 zusammengefaßten Versuchsergebnissen des Verfassers an einem Kupferkristall gegeben. In Abb. 6 ist die Oberfläche, die die Festigkeitszahlen, in Abb. 7 die Oberfläche, die die Dehnungsziffern miteinander verbindet, dargestellt. Für die Festigkeit sind die Höchstlastgrenzen eingesetzt worden. Von der Höchstlastgrenze an fiel nämlich die Spannung bei diesen Versuchen unter plötzlicher

<sup>5)</sup> Vergl. u. a. Liebisch, Grundriß der physikalischen Kristallographie, Leipzig 1896, S. 435 u. 441.

<sup>6)</sup> Annalen der Physik, Neue Folge, 1893, S. 636.



Zahlentafel 1. Zerreißversuche an unbeanspruchten und kaltgereckten Kupfer-Einkristallen.

Bezeichnung der Probe	Orientierung des Kristallstreifens zur Zugrichtung.	Abmessungen der Probe mm	Höchstlastgrenze kg/mm <sup>2</sup>	Gleichförmig. Dehnung vH	Dickenabnahme beim Walzen mm	Abmessungen der Probe mm	Höchstlastgrenze kg/mm <sup>2</sup>	Gleichförmig. Dehnung vH
1	Senkrecht zu 110 und parallel zu $\bar{1}\bar{1}0$	$1,5 \times 2,00 \times 10$	20,15	50	1,46/0,15	$0,15 \times 3,60 \times 30$	34,0	< 1
2	Um $22\frac{1}{2}^\circ$ geneigt gegen die Senkrechte auf 001 in der Zone 001 zu 100 gegen $10\bar{1}$ hin und parallel zu 010	$1,44 \times 2,00 \times 10$	12,9	20	1,44/0,175	$0,175 \times 3,0 \times 30$	36,2	< 1
3	Um $35^\circ$ geneigt gegen die Senkrechte auf $\bar{1}\bar{1}0$ in der Zone $\bar{1}\bar{1}0$ zu $00\bar{1}$ gegen $00\bar{1}$ hin und parallel zu $\bar{1}\bar{1}0$ , gleich senkrecht zu $1\bar{1}\bar{1}$	$1,46 \times 2,00 \times 10$	35,0	33	1,36/0,12	$0,12 \times 4,25 \times 30$	39,6	< 1
4	Um $18^\circ$ geneigt gegen die Senkrechte auf $\bar{1}\bar{1}0$ in der Zone $\bar{1}\bar{1}0$ zu $00\bar{1}$ gegen $1\bar{1}\bar{1}$	$1,47 \times 2,00 \times 10$	24,4	55	1,44/0,13	$0,13 \times 3,7 \times 30$	34,0	< 1
5	Um $25^\circ$ geneigt gegen die Senkrechte auf 001 in der Zone $\bar{1}\bar{1}0$ zu $00\bar{1}$ gegen $1\bar{1}\bar{1}$ hin und parallel zu $\bar{1}\bar{1}0$	$1,49 \times 2,00 \times 7,0$	22,6	50	1,49/0,25	$0,25 \times 3,2 \times 30$	39,5	< 1
6	Senkrecht zu 001 und parallel zu 010	$1,49 \times 1,98 \times 10$	14,6	10	1,49/0,15	$0,15 \times 3,9 \times 30$	36,8	< 1

Fließkegelbildung jäh ab; wahrscheinlich besteht bei Einkristallproben zwischen der Spannung und der Einschnürung eine ganz andere Beziehung als bei Vielkristallproben. Wie aus den Versuchsergebnissen hervorgeht, ändern sich also auch bei Kupfer die Werte für die Festigkeit und die Dehnung mit der kristallographischen Orientierung, in welcher der Zug ausgeübt wird; die Festigkeit etwa im Verhältnis 1 : 3, die Dehnung in höherem Maße und zwar etwa 1 : 5,5.

Die in Abb. 6 und 7 veranschaulichten Ergebnisse sind für die Vorgänge beim Fließen grundlegend. Zunächst einmal im Hinblick auf die Frage der Höchstlastpunkte. Sie beweisen, daß der Höchstlastpunkt je nach der Kristallorientierung in sehr weiten Grenzen schwanken kann (12 bis 35 kg/mm<sup>2</sup>) und zwar fast bis hinauf zu den an Vielkristallproben beobachteten Höchstwerten, aber auch tief unterhalb der bei diesen gefundenen niedrigsten Zahlen (28 bis 44 kg/mm<sup>2</sup>).

Des weiteren, und das ist das überraschendste Ergebnis, treten im großen und ganzen die Niedrigstwerte der Festigkeit und Dehnung zugeordnet auf, während man nach den üblichen Vorstellungen wohl Entgegengesetztes zu erwarten hätte. Bei der Prüfung von Vielkristallproben stehen Festigkeit und Dehnung in umgekehrter Proportion zueinander.

Die Höchstwerte der Festigkeit zeichnen sich dagegen durch mittlere Dehnungszahlen (35 kg/mm<sup>2</sup> bei 33 vH Dehnung) aus, die Höchstwerte der Dehnung durch mittlere Festigkeitszahlen (50/55 vH Dehnung bei 20/23/25 kg/mm<sup>2</sup>).

#### Wirkung der Verfestigung in den verschiedenen Achsenrichtungen.

Es dürfte nun besonders von Wert sein, die Verfestigungswirkung in Abhängigkeit von der Kristallorientierung näher kennen zu lernen. Wie Versuche ergeben haben, sind auch diese Ergebnisse in mehr als einer Beziehung grundlegend, wenn auch ebenso unerwartet.

Bei der Verfestigung der Stäbe, die in der Kristallrichtung größter Festigkeit und mittlerer Dehnung entnommen wurden, konnte nämlich durch stärkstes Kaltrecken eine nennenswerte Erhöhung der Festigkeit nicht erzielt werden; die Dehnung wurde dagegen in starkem Maß beeinflusst und zwar fast bis auf Null vermindert.

Bei allen Stäben, die in den Kristallrichtungen niedrigerer Festigkeit entnommen wurden, konnte dagegen durch starkes Kaltrecken die Festigkeit auf einen bei allen Proben sehr nahe übereinstimmenden Endwert gesteigert werden. Bei Herabminderung der Dehnung



auf den Wert Null entspricht der Endwert der Festigkeit etwa demjenigen der Kristallrichtung größter Festigkeit (senkrecht zur Oktaederfläche).

Wie aus diesem Ergebnis der Kaltreckversuche hervorgeht, wird die Oberfläche der Abbildung 6, die die Festigkeitszahlen miteinander verbindet, gewissermaßen in eine Kugelfläche verwandelt, deren ursprüngliche Würfel- und Dodekaederflächen durch kleine Senkungen gemäß Abb. 8 eben noch angedeutet werden. Die äußerste Begrenzung der Kugelfläche geht etwas über die früheren Höchstwerte der Festigkeit hinaus. Der Kristallkörper verhält sich nunmehr Zugbeanspruchungen gegenüber schlechthin ähnlich einem isotropen Stoff; seine Festigkeit ist in allen Achsenrichtungen praktisch gleich, seine Dehnbarkeit für Zug in allen

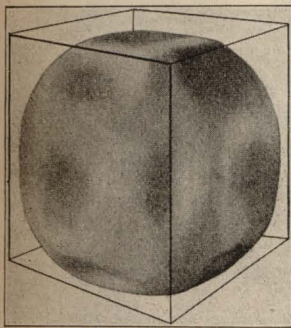


Abb. 8.  
Oberfläche der Festigkeit  
(Höchstlastgrenze)  
eines kaltgereckten  
Kupferkristalls.

Achsenrichtungen erschöpft. Diese Tatsache allein macht alle Bestrebungen einer rein kristallographischen Deutung der Verfestigungsvorgänge gegenstandslos.

### Unwirksamkeit der Gleitebenen.

Welche Schlußfolgerungen ergeben sich nun aus diesem Verhalten eines Kupferkristalls in den verschiedenen Achsenrichtungen für den Verfestigungsvorgang metallischer Stoffe?

In erster Linie die grundlegende Tatsache, daß bei Kupfer die größte Dehnung in den Achsenrichtungen auftritt, in denen die Möglichkeit zur Gleitflächenbildung (Translations-ebenen)<sup>7)</sup> am geringsten ist. Nach den Untersuchungen von Mügge u. a.<sup>8)</sup> erfolgt die Gleitflächenbildung bei Kupfer parallel zu den Oktaederflächen und am leichtesten bei einem Kraftangriff parallel zu den Seiten dieser Flächen. Im Einklang mit dieser Tatsache müßten nun die größten Dehnungen in den Achsenrichtungen auftreten, in denen die Lage der Ebenen am meisten einem Winkel von rd.  $45^\circ$  entspricht<sup>9)</sup>. Dieser Forderung genügen in erster Linie die Stäbe in der Richtung der Hauptachsen.

<sup>7)</sup> Tammann, Lehrbuch der Metallographie, 2. Aufl. Leipzig 1921 S. 59/65.

<sup>8)</sup> Neues Jahrbuch für Mineralogie 1906 S. 1899, II, S. 55.

<sup>9)</sup> Vergl. Ludwik a. a. O. S. 11 u. f.

Zahlentafel 2. Lage der Gleitebenen in den verschiedenen Achsenrichtungen des Kupfers.

Bezeichn. der Probe	Orientierung des Kristallstreifens zur Zugrichtung	Winkel der Gleitflächen z. Zugrichtung
1	Senkrecht zu 110 und parallel zu 110	$55^\circ$ (2 Systeme) $0^\circ$ (2 " )
2	Um $22\frac{1}{2}^\circ$ geneigt gegen die Senkrechte auf 001 in der Zone 001 zu 100, gegen 101 hin und parallel zu 010	$18^\circ$ (2 Systeme) $48^\circ$ (2 " )
3	Um $35^\circ$ geneigt gegen die Senkrechte auf 110 in der Zone 110 zu 001 gegen 001 hin und parallel zu 110 gleich senkrecht zu 111	$90^\circ$ (1 System) $20^\circ$ (3 " )
4	Um $18^\circ$ geneigt gegen die Senkrechte auf 110 in der Zone 110 zu 001 gegen 111	$10^\circ$ (2 Systeme) $37^\circ$ (1 " ) $73^\circ$ (1 " )
5	Um $25^\circ$ geneigt gegen die Senkrechte auf 001 in der Zone 110 zu 001 gegen 111 hin und parallel zu 110	$10^\circ$ (1 System) $30^\circ$ (2 " ) $60^\circ$ (1 " )
6	Senkrecht zu 001 und parallel zu 010	$35\frac{1}{4}^\circ$ (4 Systeme)

Wie der Versuch lehrt, finden sich aber in diesen Achsenrichtungen die Niedrigstwerte der Dehnung.

In den Richtungen geringer, ja geringster Möglichkeit der Bildung von Gleitflächen, also senkrecht zu den Oktaeder- und Dodekaederflächen treten dagegen in vollem Gegensatz mit dieser Theorie die Höchstwerte der Dehnung auf. Gleitflächenbildung bei einer Gleitrichtung parallel zu den Seiten der Oktaederflächen ist infolge der Orientierung dieser Ebenen zu der Richtung des Kraftangriffes ( $0^\circ$ !) ebenfalls ausgeschlossen.

Eine Übersicht der Lage der Gleitebenen<sup>9a)</sup> gibt Zahlentafel 2, aus der die Widersprüche der Zahl nach noch beliebig erweitert werden können. Mit der Dehnung nimmt also nicht, wie man noch vielfach fälschlich glaubt, die Möglichkeit der Gleitflächenbildung proportional zu, sondern ganz im Gegenteil proportional ab, ein Ergebnis, das sich kaum voraussehen noch vorausahnen ließ.

Es ist auch versucht worden, in gleicher Weise die Verfestigung mit der Anzahl der gebildeten Gleitflächen in Beziehung zu bringen<sup>10)</sup>, aber auch hier macht sich die Verwechslung der

<sup>9a)</sup> Vereinzelte Angaben über Gleitflächensysteme senkrecht zu den Oktaederflächen beruhen zweifellos auf Täuschungen, die dadurch zu erklären sind, daß bei Kupfer zwei Gleitebenenpaare stets so zueinander stehen, daß sie nur um  $20^\circ$  von der senkrechten Lage abweichen.

<sup>10)</sup> Tammann a. a. O. S. 71/80.



funktionellen Beziehungen in gleicher Weise geltend. Demgemäß bestätigt der Versuch die frühere Auffassung des Verfassers<sup>11)</sup>, daß der Gleitflächenbildung nur der Wert einer unwirksamen Nebenerscheinung zukommt, die auf den Fließ- und Verfestigungsverlauf ohne nennenswerten Einfluß sei.

### Eigenschaften und Geometrie des Raumgitters.

Worin mögen nun eigentlich die Vorgänge des Fließens und der Verfestigung begründet sein? Zweifellos in der Geometrie des Raumgitteraufbaues. Ohne daß näher auf diese Fragen eingegangen sei, scheinen die Versuchsergeb-

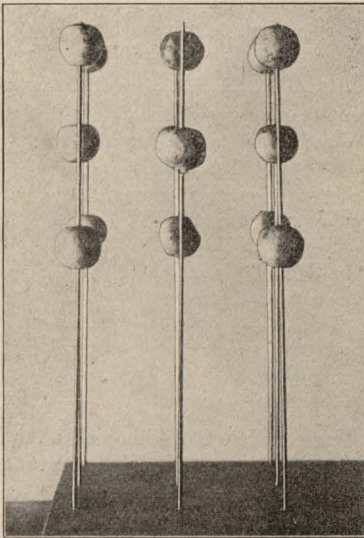


Abb. 9. Gitteraufbau des Kupfers senkrecht zu einer Würfel- oder Oktaederfläche.

nisse dafür zu sprechen, daß in den Achsenrichtungen größter Dehnung ein Gleiten der kleinsten Massenteilchen (Atome) aneinander viel leichter von statten geht als in den Richtungen geringster Dehnung. Dies wird leicht verständlich, wenn man sich den Aufbau des flächenzentrierten Raumgitters des Kupfers in Abhängigkeit von den Kristallachsen an Modellen vergegenwärtigt, wie es Abb. 9, 10 und 11 veranschaulichen. Abb. 9 gibt die Anordnung des Gitters in einem Stab in der Richtung der Hauptachse (Niedrigstwerte der Festigkeit und Dehnung), Abb. 10 in der Richtung senkrecht zu den Oktaederflächen (Höchstwerte der Festigkeit bei mittlerer Dehnung), Abb. 11 senkrecht zu den Dodekaederflächen (Höchstwerte der Dehnung bei mittlerer Festigkeit). In dem Gitteraufbau ist es begründet, daß ein Gleiten der Atome aneinander bei bestimmten Anordnungen besonders leicht eintreten kann. Auf diese Weise wird das Gitter gewissermaßen aufgetrieben und umgestaltet und die Dehnung kann infolge der Tangentialbewegung beträchtlich ansteigen.

<sup>11)</sup> Vergl. u. a. Stahl u. Eisen 1915 S. 1076.

Die Festigkeit wird in gewissen Verbänden dagegen viel höher liegen, da die Atomzahl für die Querschnitteinheit in bestimmten Richtungen besonders groß ist (Abb. 9) und zwar am größten in der Richtung senkrecht zu den Oktaederflächen. Dieser Tatsache entsprechen auch die Versuchsergebnisse.

Die Vorstellung, daß der gesetzmäßige Aufbau des Gitters beim Recken durchgreifende

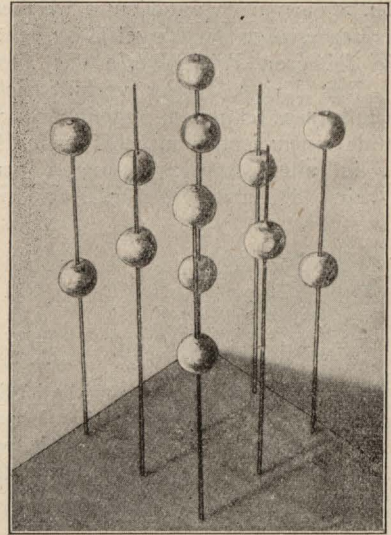


Abb. 10. Gitteraufbau des Kupfers senkrecht zu einer Oktaederfläche.

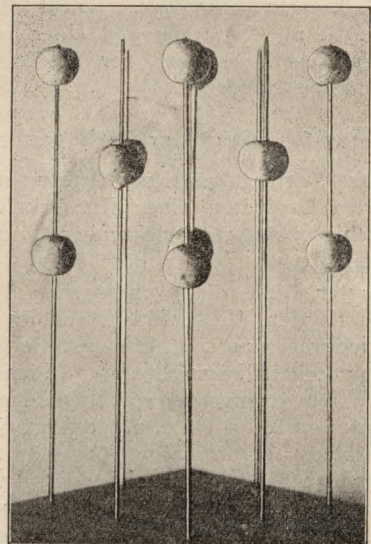


Abb. 11. Gitteraufbau des Kupfers senkrecht zu einer Dodekaederfläche.

Störungen erleidet, gewinnt also auch durch diese geometrischen Überlegungen anschaulich an Untergrund.

### Zwischenstufen der Verfestigung.

Als Folge der angestrebten Einfachheit in der Darstellung muß noch einmal auf die Frage der



Zwischenzustände, wie sie sich in den verschiedenen Graden der Kaltreckung darbieten, kurz zurückgegriffen werden. Es wurde schon gesagt, daß die Höchstlastpunkte je nach der Kristallorientierung in sehr weiten Grenzen schwanken können, ferner daß bei einer Herabminderung der Dehnung durch Kaltrecken auf den Wert Null die Höchstlastgrenze der Proben auf einen nah übereinstimmenden Endwert gesteigert werden konnte. Dies besagt, daß die Höchstlastgrenze von bis jetzt unbekannt niedrigen Werten unter Einbuße der Dehnung bis zur Grenze der effektiven Zerreißfestigkeit ansteigen kann. Wenigstens dürfte dies für den Endzustand der Verfestigung gelten. Eine Erweiterung der Versuche auf die Zwischenstufen der Verfestigung schien daher sehr geboten.

Die Versuche wurden an einem Aluminium-Einkristall von 20 cm Länge, 26 mm Breite und 2 mm Dicke fortgesetzt. Zu diesem Zwecke wurde der Kristallstreifen in sechs Zerreißstäbe aufgeteilt. Die kristallographische Orientierung war bei allen sechs Stäben gleich. Zwei Stäbe wurden unbeanspruchte geprüft, zwei nach einer Querschnittabnahme um 30 vH, die beiden letzten nach einer solchen um 60 vH. Die Versuchsergebnisse sind in Abb. 12 und Zahlentafel 3 zusammengefaßt worden. Die Höchstlastgrenze

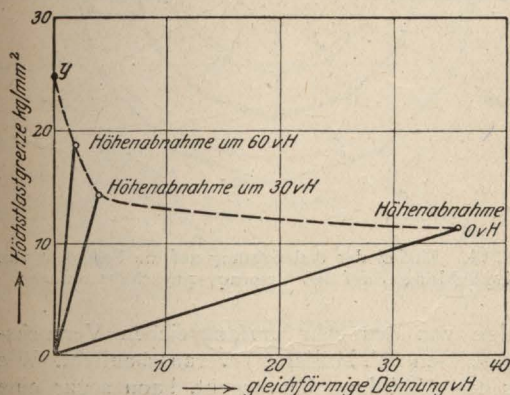


Abb. 12. Höchstlastkurve eines Aluminium-Einkristalls.

Zahlentafel 3. Abhängigkeit der Höchstlastpunkte vom Grade der Kaltreckung.

Bezeichnung der Probe	Abmessungen des Einkristallstreifens mm	Höhenabnahme des Einkristallstreifens beim Walzen vH	Höchstlastgrenze kg/mm²	Gleichförmige Dehnung vH
1	5,02 × 2,03 × 50	0	11,27	36
2	5,02 × 2,03 × 50	0	nicht geprüft	
3	5,06 × 1,31 × 50	30	14,3	4
4	4,85 × 1,31 × 50		14,2	4
5	4,87 × 0,77 × 50	60	18,6	2
6	5,04 × 0,77 × 50		18,8	2

steigt demnach auch bei den Zwischenstufen der Kaltreckung gleichmäßig an (11,3, 14,25, 18,7 kg/mm²), während die Dehnung in viel stärkerem Maße verringert wird (36, 4, 2 vH). Also auch beim Aluminium kann ähnlich wie beim Kupfer eine gesetzmäßige Steigerung der Höchstlastgrenze beim Kaltrecken beobachtet werden.

Werden nun die für Kupfer gefundenen Werte in eben dieser Weise zeichnerisch dargestellt, wie dies in Abb. 13 geschehen ist, so kommt die Verschiedenheit der Eigenschaften in Abhängigkeit von der Orientierung in dem Diagramm deutlich zum Ausdruck. Der Punkt y soll den größtmöglichen Verfestigungswert bei 0 vH Dehnung andeuten. Bringt man nun die Höchstlastpunkte mit diesem in Verbindung, wie dies die Abbildung zeigt, so erhält man Kurvenzüge, die etwa den Anstieg der Höchstlastgrenze durch Kaltrecken andeuten, wie er, abhängig von der Lage des Ausgangspunktes, in nicht näher bekannter Weise zum Punkte y hin fortschreitet.

Auf Grund der mitgeteilten Versuchsergebnisse erweist sich die seither beobachtete Höchstlastgrenze als das Mittel aus den Höchstlastgrenzen der einzelnen Kristallindividuen, aus

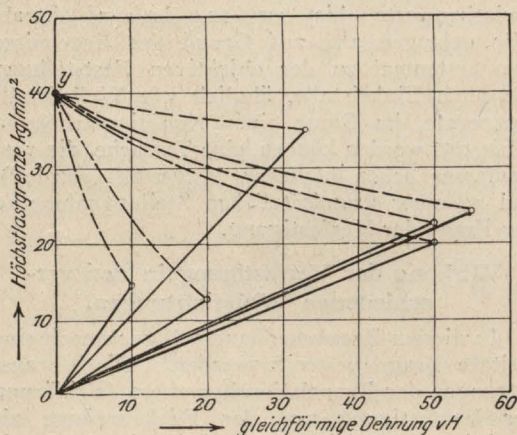


Abb. 13. Höchstlastkurven von verschieden orientierten Kupfer-Einkristallen.

denen sich eine Vielkristallprobe zusammensetzt. Da nun nach Abb. 12 und 13 zu urteilen, im allgemeinen die Dehnung viel schneller abnimmt, als die Festigkeit ansteigt, so erklärt es sich, warum es den Anschein hat, als bliebe die Höchstlastgrenze schlechthin konstant.

Bemerkenswert ist noch die Tatsache, daß die bei Kupfer und Aluminium ermittelten Höchstlastgrenzen nicht die Werte erreichen, die bei der Prüfung von Vielkristallproben regelmäßig beobachtet werden können (bei Kupfer 40 bis 60, bei Aluminium 18 bis 24 kg/mm²), obwohl die höchstverfestigten Proben keine Dehnung mehr zeigten. Um auf diese Fragen einzugehen, reicht der Umfang der Versuche nicht aus. Es sei also offen gelassen, ob diese Erscheinung mit der noch ungenügenden Erforschung der Eigenschaften in den verschiedenen Achsenrichtungen der







sind die an einem Aluminiumkristall erhaltenen Werte wiedergegeben. Unterschiede der Festigkeit in den verschiedenen Walzrichtungen konnten bei einer Querschnittsabnahme um 63 vH nicht gefunden werden. Im unverfestigten Zustand betrug die Festigkeit in der Lage parallel und quer zur Walzrichtung 14,6 und 9,2 kg/mm<sup>2</sup> bei 30 bzw. 20 vH Dehnung.

Die Annahme, daß die Kristalle beim Strecken eine bestimmte Umlenkung zur Zugrichtung erfahren, die in etwas abweichender Form u. a. auch Polanyi und Körber aus der Translationshypothese übernommen haben<sup>15)</sup>, fällt also in sich zusammen.

### Zustandschema.

Versucht man nun die gesamten Ergebnisse in ihren Zusammenhängen zeichnerisch darzustellen, so gelangt man zu dem in Abb. 15 wiedergegebenen Schaubild der Fließ- und Verfestigungsvorgänge. In ihrem grundsätzlichen Ver-

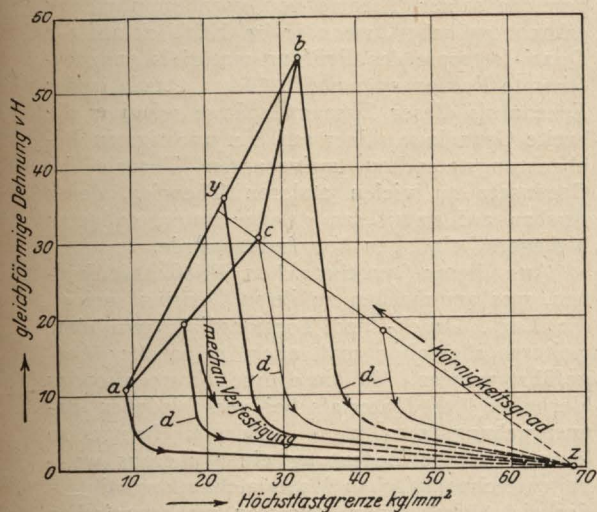


Abb. 15. Schaubild der Fließ- und Verfestigungsvorgänge.

lauf ist die Abhängigkeit der Festigkeits- und Dehnungseigenschaften der natürlich kristallisierten Metalle (ungereckten Gußmetalle) von der mittleren Korngröße ( $\varphi_m$ ) in der Schaulinie  $y-z$  wiedergegeben, also Festigkeitsanstieg neben Erniedrigung der Dehnung. Die wiedergegebene Schaulinie ist nur unter der Voraussetzung gleichförmigen mechanischen Verhaltens des Materials streng gültig. Bekanntlich macht sich aber auch die Körnigkeit, also das Verhältnis der mittleren Korngröße zum Volumen ( $\frac{\varphi_m}{v}$ ) auf das mechanisch gleichförmige Verhalten eines Stoffes bemerkbar. Am größten sind diese Einflüsse innerhalb eines Kristallkornes selbst.

Den Grenzfall, daß der Körper nur aus einem einzigen Kristall bestehe ( $\varphi_m = v$ ), bezeichnet Punkt  $y$ . In diesem Fall wird die Festigkeit und Dehnung, je nachdem, ob die Beanspruchung in den Achsenrichtungen größter bzw. geringster

Festigkeit und Dehnung erfolgt, alle möglichen Werte etwa zwischen den Punkten  $a$  und  $b$  aufweisen können. Mit wachsender Kornzahl wird der Abstand dieser Punkte immer kleiner, bis er endlich ganz zusammenschrumpft; dieser Punkt, der in dem Schaubild mit  $c$  bezeichnet ist, wird bei den meisten Metallen erreicht, wenn die Korngröße  $\varphi_m$ , geometrische Gleichachsigkeit des Arbeitsgutes vorausgesetzt, auf  $\frac{1}{1000}$  des gesamten Volumens sinkt. Die Zahl entspricht einem groben Erfahrungswert. Verbindet man die Höchst- und Niedrigstpunkte  $a$  und  $b$  der Festigkeit und Dehnung für  $\varphi_m = v$ , so schneidet die Verbindungslinie die Kurve des Körnigkeitsgrades, und man erhält unter Einschluß des Punktes  $c$  eine Dreiecksfläche  $abc$ , die das Gebiet mangelnder Quasi-Isotropie begrenzt.

Der Einfluß der Kaltbearbeitung macht sich dagegen in dem Diagramm in der Weise bemerkbar, wie dies die Transversalkurven  $d$  ausdrücken. Sie deuten den Anstieg der Höchstlastgrenze an, wie er abhängig von der Lage des Ausgangspunktes in nicht näher bekannter Weise zum Punkte  $z$  hin fortschreitet. Anlassen übt auf die Eigenschaft rückläufige Wirkungen aus, indem die Höchstlastgrenze etwa nach Maßgabe der Transversalkurven erniedrigt wird.

Die stark ausgezogenen Kurven geben die Verhältnisse für Einkristalle und für solche Vielkristallproben wieder, bei denen sich der Einfluß der Kristallnatur noch deutlich bemerkbar macht (Gebiete mangelnder Quasi-Isotropie), die dünn ausgezogenen Kurven für Vielkristallproben, in denen die Einflüsse der Kristallnatur praktisch unwirksam sind. Das Diagramm gibt also die Beziehungen der Festigkeits- und Dehnungseigenschaften zu den verschiedenen Zuständen und dem Grad der Körnigkeit in möglichst umfassender Weise wieder.

### Das Wesen der Verfestigung.

Wie bereits wiederholt dargetan, schlagen mithin alle Versuche fehl, die Fließ- und Verfestigungsvorgänge rein kristallographisch zu deuten. Alle die Vorgänge sind nur dann verständlich, wenn ihnen Störungen im gesetzmäßigen Aufbau des Gitters zugrunde gelegt werden. Dieser Standpunkt wird von der Verlagerungshypothese seit langem nachdrücklich vertreten. Die Beziehungen, die sich zwischen den Eigenschaften und der Geometrie des Raumgitteraufbaues ergeben, scheinen geeignet, in besonderer Weise die Vorgänge der Umgestaltung des Raumgitters zu erhellen. Offensichtlich sprechen sie dafür, daß die Atome nach und nach in der Weise verlagert werden, daß die Abstände der Gitterpunkte in den verschiedenen Netzebenen durch den Umbildungsvorgang zunächst einmal mehr oder weniger stark ausgeglichen werden. Dadurch wird die ursprüngliche Symmetrie der Netzebenen und damit des Raumgitters zerstört. Das Wesen der Verfestigung würde also gewissermaßen in dem Ausgleich der Atomabstände zu erblicken sein, vielleicht in loser Anlehnung an die Geometrie der dichtesten Kugelpackung. Die Ab-

<sup>15)</sup> Z. f. Physik 1921 S. 61 und Stahl u. Eisen 1922 S. 368.



stände dürften immerhin aber noch so beträchtlich schwanken, daß wohl nur eine durchschnittliche Isometrie vorliegen dürfte. Dieser Vorstellung scheinen auch Ergebnisse der Röntgenforschung keineswegs zu widersprechen<sup>16)</sup>.

Unbeantwortet bleibt aber wie bisher stets die Frage, warum die Atome in dieser Zwangslage verharren sowie die Begründung der Erhöhung der inneren Reibung. Hierüber bestehen zurzeit nur vage Annahmen. Eine Erklärung der Molekularmechanik ist vermutlich der exakten Röntgenforschung, die formale Auslegung der Vorgänge wohl den Arbeitsgebieten der Thermodynamik vorbehalten. Für beide Wege bestehen zurzeit aber nicht einmal elementare Ansätze.

### Verfestigung und innere Reibung.

Läßt man nun die Gleitflächen auf Grund ihrer eindeutig erwiesenen Unwirksamkeit bei den Fließ- und Verfestigungsvorgängen außer Betracht, so führen unsere Folgerungen auf einen Weg, den unsere namhaftesten Technologen Rejtö, Martens, Heyn, vor allem aber Ludwik<sup>17)</sup> durch ihre Forschungen gewiesen haben, nämlich die gesamten Fließ- und Verfestigungsvorgänge zu der inneren Reibung in Beziehung zu bringen. Ein bemerkenswerter Versuch der mathematischen Fassung der inneren Reibung ging nach den Vorarbeiten Rejtös von Martens aus. Er bezeichnet als Zähigkeit die Arbeit, die der Volumeneinheit des Stoffes zugeführt werden muß, um die Reibung zwischen den Körperelementen gänzlich zu überwinden. Bei Heyn ist der Begriff der inneren Reibung durch verborgen elastische innere Spannungen ersetzt worden. Erst Ludwik hat durch seine klassischen Untersuchungen die Richtung gewiesen, die Vorgänge der inneren Reibung in der Weise zu deuten, daß ihm die Aufstellung einer hypothetischen Fließkurve gelang. Die Fließkurve eines Materials läßt sich sowohl aus dem Zug-, Druck- als auch aus dem Torsionsdiagramm ableiten. Alle diese Fließkurven wei-

chen nur wenig voneinander ab. Das beweist, daß die Deformationsdiagramme bei einfachen Beanspruchungsarten in gesetzmäßiger gegenseitiger Beziehung stehen und daß die Fließkurve nur wenig von der Art der Beanspruchung beeinflusst wird.

Es läßt sich voraussehen, daß diese Kurve mit dem Auftreten mangelnder Quasi-Isotropie in dem Maße an Gültigkeit verlieren wird, wie diese zunimmt. Bei Einkristallen werden sich zwar unter einander übereinstimmende, in den verschiedenen Achsenrichtungen dagegen ganz verschiedenartige Kurvenzüge unbekannter Gesetzmäßigkeit ergeben. Die Errechnung der Fließkurve aus diesen Linienzügen dürfte nur bei vollkommener Erforschung der Verhältnisse der inneren Reibung in den verschiedenen Kristallachsen möglich sein. Dem Auswertungsverfahren liegt also gewissermaßen eine durchschnittliche innere Reibung zugrunde. Ludwik scheint die Gültigkeitsbereiche seiner Theorie von vornherein richtig erkannt zu haben, wenn er im Hinblick auf die Quasi-Isotropie des Prüfungsmaterials ganz bestimmte Forderungen stellt. Aber gerade in der Erkenntnis dieser Zusammenhänge schuf er die breite Grundlage seiner auf den wichtigsten Beobachtungstatsachen aufgebauten Theorie im Gegensatz zu vielen anderen Theorien, deren Ausbau auf unwirksamen oder untergeordneten Nebenerscheinungen begründet wurde.

Aus dieser hypothetischen Fließkurve können, was am meisten zu ihren Gunsten spricht, die Zug-, Druck- und Torsionsdiagramm ohne weiteres abgeleitet und auch ineinander übergeführt werden. Da diese eine Kurve also das Verhalten des Materials bei verschiedenen Beanspruchungsarten zum Ausdruck bringt, so kommt ihr die Bedeutung einer überaus wertvollen technologischen Materialcharakteristik zu, die sich durch einen gewissen mathematischen Inhalt auszeichnet. Leider werden diese grundlegenden Untersuchungen Ludwiks von der einschlägigen Forschung meist nicht gebührend berücksichtigt. Durch die vorliegende Studie mögen die Wege für eine innige Verknüpfung der Vorgänge der inneren Reibung im Sinne Ludwiks mit den innerkristallinen Vorgängen, wie sie der Verlagerungshypothese zugrunde liegen, an Hand neuer experimenteller Tatsachen gewiesen sein.

[873]

### Thalliumamalgame.

Bei ihren Untersuchungen über Thalliumamalgame gehen Theodore W. Richards und Charles P. Smyth (Journ. Amer. Chem. Soc. Bd. 44, 1922 Heft 3 S. 524/45) von reinem Thallium aus. Der Schmelzpunkt wird bei 303,5° gefunden und der Umwandlungspunkt der bei Zimmertemperatur stabilen  $\alpha$ -Modifikation in die  $\beta$ -Modifikation bei 235,3°. Die Schmelzpunktniedrigung des Thalliums durch Zusatz von Quecksilber ist bis zu 18 vH Hg eine lineare Funktion der Quecksilberkonzentration. Die Bestimmung der Dichte und der Brinellhärte von thalliumreichen Mischungen zeigt, daß bei etwa 5 vH Hg in der Kurve eine Diskontinuität vorhanden ist. Besonders wichtig sind die Potentialmessungen, wobei

der Potentialunterschied der Mischungen gegen gesättigtes Thalliumamalgame (bei 20° etwa 15 vH Hg enthaltend) für die weiteren Untersuchungen zugrunde gelegt wird. Diese nimmt von 0 bis 4 vH Quecksilber linear ab, bleibt bis 9,7 vH Hg konstant, um dann bis zur Sättigungskonzentration wieder linear abzufallen und den Wert Null zu erreichen. Aus diesem Verhalten geht hervor, daß in dem Konzentrationsgebiet von 4 bis etwa 10 vH Hg eine neue feste Phase auftritt; und zwar wird angenommen, daß es die feste Lösung von Quecksilber in  $\beta$ -Thallium ist, die mit der festen Lösung: Quecksilber +  $\alpha$ -Thallium im Gleichgewicht steht. Von 10 vH ab verschwindet diese feste Phase wieder, so daß die feste Lösung: Quecksilber +  $\beta$ -Thallium allein übrig bleibt.

A. Schulze.

<sup>16)</sup> Vergl. Czochralski, Verlagerungshypothese und Röntgenforschung, Vortrag auf der Hauptversammlung der Deutschen Gesellschaft für Metallkunde 1922. Veröffentlichung in einem der nächsten Hefte der Z. f. Metallk.

<sup>17)</sup> A. Rejtö, Die innere Reibung der festen Körper, Leipzig 1897, Artur Felix; Baumaterialienkunde 1900 S. 305 u. f.; A. Martens, Mitteilungen a. d. Kgl. Technischen Versuchsanstalten zu Berlin 1884 S. 93; E. Heyn, Metall u. Erz 1918 S. 411 u. 436; Ludwik, insbesondere: Elemente der technologischen Mechanik.