

Verlagerungshypothese und Röntgenforschung.

Von J. Czochralski, Frankfurt a. M.

Die Arbeit ist auf der Hauptversammlung der Deutschen Gesellschaft für Metallkunde in Essen 1922 vorgelesen worden, nachdem der Verfasser erstmalig darüber im Rekristallisations-Ausschuß der Gesellschaft berichtet hatte. Es handelt sich um Untersuchungen an Aluminium-Einkristallen mit Hilfe der Röntgenstrahlen zum Nachweis von Raumgitterstörungen beim Kaltrecken von Metallen.

Einleitung.

Über die Ursache der Verfestigung durch Kaltrecken liegen bereits sehr bemerkenswerte Hypothesen vor. Folgerichtig verfochten werden

die Amorphie-Hypothese,
die Translations-Hypothese und
die Verlagerungs-Hypothese.

Die Amorphie-Hypothese wird in Deutschland mit Recht ganz abgelehnt; im Brennpunkt des Interesses stehen die Translations- und die Verlagerungs-Hypothese, von denen die erste folgerichtig für die „Unversehrtheit“, die zweite in entschiedenem Gegensatz dazu für die „Zerstörbarkeit“ des Raumgitters eintritt. Die Translationshypothese hat die Tatsache der Gleitflächenbildung zur Grundlage, die Verlagerungshypothese geht über diese Erscheinung hinaus und spricht ihr nur den Wert einer unwirksamen Nebenerscheinung zu, die die Anfangsstufen der Deformation begleitet, um während des nun folgenden ungleich größeren Abschnitts des Fließens alsbald völlig auszubleiben. Als Stütze dient der Verlagerungshypothese also die Tatsache, daß

1. der Fließvorgang, wenn auch anfänglich durch die Neigung der Gleitflächenbildung ausgezeichnet, während des Hauptabschnittes des Fließens doch ohne nachweisbare Bildung von Gleitflächen vor sich geht und daß ferner
2. die Metallkörner nach starker Kaltbearbeitung ihre ursprünglichen Helligkeitsunterschiede (dislozierte Reflexion) einbüßen und Ätzfiguren auf diesen Kristallen nicht mehr auftreten.

Abb. 1 bis 8 mögen als Belege dienen. Das Schliffbild eines Metalles mit nachträglich durch überelastische Beanspruchung erzeugten Gleitlinien ist in Abb. 1 wiedergegeben. Die Höhenabnahme beim Stauchen betrug nur 25 vH, die Belastung etwa 6 kg/mm². Als Ausgangsstoff diente Reinaluminium im Gußzustand; die Abmessungen der Proben waren 10 × 10 × 20 mm. Die Gleitlinien sind in der Abbildung deutlich ausgebildet, sie verlaufen im Winkel von fast 45° zur Druckrichtung. Diese Probe wurde nunmehr einer starken Kaltbearbeitung durch langsames Walzen unterzogen, so daß der quadratische Querschnitt der Stirnfläche nur noch ein Viertel des ursprünglichen betrug, darauf erneut mit einer polierten Fläche versehen und um 10 vH gestaucht. Abb. 2 zeigt, daß während des nunmehr viel größeren Fließabschnittes, bei dem die Last bis auf etwa 12 kg/mm² anstieg,

das Auftreten von Gleitlinien selbst bei sehr starker Vergrößerung (im Original 1500×) nicht mehr wahrzunehmen ist. Versuche bei den Metallen Zink, Zinn, Kupfer, Eisen und Blei führten grundsätzlich zu den gleichen Ergebnissen.

Das Gefüge von nichtgereckten Metallen, also in gegossenem Zustand, veranschaulicht Abb. 3. Das Bild entspricht dem Gefüge von α -Messing mit 30 vH Zn. Die einzelnen Kristallkörner sind an den Helligkeitsunterschieden (dislozierte Reflexion) deutlich zu erkennen. Wie Abb. 4 zeigt, gehen diese Helligkeitsunterschiede bei starker Kaltbearbeitung völlig verloren, während der Kornverband im allgemeinen noch erhalten bleibt. Die ursprünglichen Korngrenzen lassen sich in der Abbildung eben noch verfolgen. Die Streckung der einzelnen Körner ist etwa vierfach; die Querschnittabnahme beim Kaltwalzen betrug rd. 75 vH. Ähnlich verhalten sich gemäß Abb. 5 und 6 (Aluminium-Kupferlegierung mit 8 vH Al) auch andere Metalle und Legierungen. Die Helligkeitsunterschiede in Abb. 3 und 5 beruhen darauf, daß die Kristalle infolge ihres gesetzmäßigen Aufbaus in den verschiedenen Achsenrichtungen durch Ätzen verschieden angegriffen werden unter Bildung sogenannter Ätzfiguren, was Abb. 7 an einem Kupferkristall veranschaulicht. Diese Fähigkeit geht durch starkes Kaltrecken verloren, wie Abb. 8 an einem sehr stark kalt gewalzten Kupferkristall zeigt. Als Belege kristallographischer Natur mögen diese Hinweise genügen.

Die experimentellen Schlußfolgerungen der beiden Theorien werden zurzeit viel umstritten. In seiner sehr lesenswerten 1920 erschienenen Arbeit über „Die Verfestigung der Metalle durch mechanische Beanspruchung“ (Berlin 1920, Julius Springer) kommt W. F r a e n k e l, der diese Hypothesen einer kritischen Auswertung unterzieht, zu dem Schluß, daß man den für die Anschauung der Raumgitterstörung erbrachten Beobachtungen (Verschwinden der dislozierten Reflexion und Ätzbarkeit der Kristallfiguren) starke Beweiskraft nicht absprechen kann und daß die Anschauungen von der Unzerstörbarkeit der Raumgitter kaum aufrecht zu erhalten sein dürften. Es war naheliegend, für die Entscheidung der Fragen das Röntgenverfahren zu verwenden. Dank den großen Erfolgen dieses Verfahrens ist das Raumgitter heute keine Hypothese mehr: Der Abstand, die Verteilung und Anordnung der Atome im Gitter sind bereits von zahlreichen Kristallen bekannt. Die endgültige Lösung der gestellten Aufgabe war also nur eine Frage der

Zeit. Für Mineralkristalle hat auch F. Rinne im Jahre 1916 den Gedanken aufgeworfen. Fraenkel vertritt ebenfalls die Anschauung, daß die Entscheidung durch Beobachtungen im Röntgenlicht zu erbringen sei.

Auf der Hauptversammlung der Deutschen Gesellschaft für Metallkunde 1921 ist nun die

norme Erscheinungen“ nennt²⁾). Die von ihm gewonnenen Diagramme veranschaulichen folgende Abbildungen: Abb. 9 das gesetzmäßig angeordnete Diagramm des Kochsalzes, Abb. 10 das Diagramm für denselben Kristall nach schwacher Deformation, Abb. 11 für denselben Kristall, nachdem er sattelförmig gebogen wurde. Wäh-



Abb. 1 (links),
32 \times vergr.

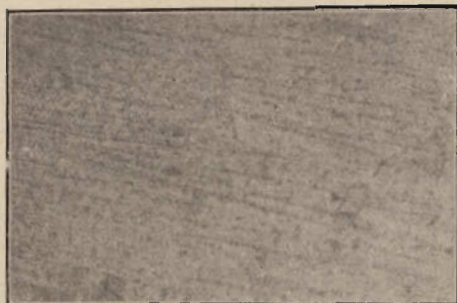


Abb. 2 (rechts),
1000 \times vergr.



Abb. 3.
 $\frac{3}{4}$ nat. Gr.



Abb. 4.
 $\frac{3}{4}$ nat. Gr.



Abb. 5.
 $\frac{3}{4}$ nat. Gr.



Abb. 6.
 $\frac{3}{4}$ nat. Gr.



Abb. 7.
150 \times vergr.



Abb. 8.
1000 \times vergr.

Frage, ob das Raumgitter der bildsamen Metalle durch Deformation verändert wird, eingehend erörtert worden.¹⁾ Rinne stellte 1915 bei der Aufnahme von Röntgen-Diagrammen nach v. Laue gewisse Unregelmäßigkeiten fest, die er „ab-

rend Abb. 10 in Wirrnis geratene Reflexionspunkte zeigt, weist Abb. 11 deutlich ausgeprägten Asterismus auf. Im Gegensatz zu seiner

¹⁾ Z. f. Metallk. 1921 S. 419.

²⁾ Berichte über die Verhandlungen der Kgl. sächs. Ges. der Wissenschaften zu Leipzig, Mathem.-physik. Klasse 1915, Bd. 67 S. 303.

früheren Ansicht, daß die Erscheinungen auf eine Deformation des Baues zurückzuführen seien, vertrat Rinne auf der erwähnten Hauptversammlung aber die Anschauung, daß Raumgitterstörungen bislang nach dem Röntgenverfahren noch nicht erwiesen worden seien. Die Unregelmäßigkeiten von Laue-Diagrammen, die er an deformiertem Steinsalz aufnahm, erklärt Rinne durch gröbere Dislokationen des Materials. Diesen Standpunkt teilt im großen und ganzen auch Tammann. Demgegen-

Ein wesentliches Hindernis bei Untersuchungen an Metallen nach dem Röntgenverfahren dürfte in der Beschaffung von geeignetem Versuchsmaterial liegen, insbesondere von einwandfreien Einkristallen. Dem kann aber durch ein bereits 1916 vom Verfasser⁴⁾ angegebenes Verfahren, beliebig große Kristalle durch Rekristallisation zu erzeugen, leicht abgeholfen werden. Aus einem Stück Aluminium, das durch Walzen oder Pressen in den Zustand einer starken und gleichmäßigen Kaltreckung gebracht wird, wer-

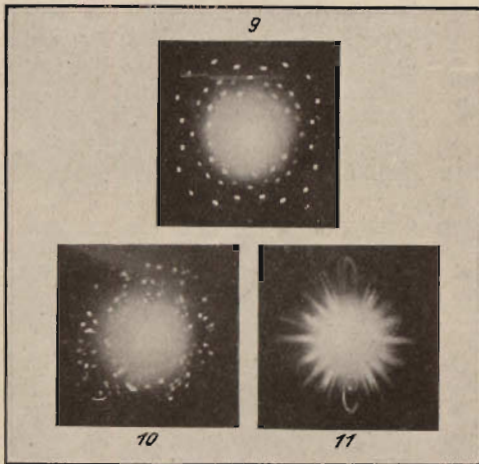


Abb. 9 bis 11.

über wurde vom Verfasser mitgeteilt, daß Versuche an Aluminium-Einkristallen, die von ihm durchgeführt worden sind, darauf hinweisen, daß Raumgitterstörungen vorliegen müssen. Die 1920 begonnenen Versuche des Verfassers³⁾ sind inzwischen mit den nachstehenden Ergebnissen fortgesetzt worden.

Das Verfahren.

Das Verfahren nach v. Laue besteht bekanntlich darin, daß ein dünnes Bündel Röntgenlicht durch die zu untersuchende Substanz geleitet wird und der Einstich dieses Primärstrahls sowie die Auftreffpunkte der im Objekt entstehenden Sekundärstrahlen auf einer photographischen Platte durch Entwicklung sichtbar gemacht werden. Bei isotropen Stoffen sind die Beugungserscheinungen anderer Art als bei Kristallen. In Abb. 12 und 13 sind solche Laue-Diagramme veranschaulicht. Abb. 12 ist einem Aluminium-Einkristall entnommen, Abb. 13 dem isotropen Bernstein. Während Abb. 12 ein symbolisches Bild mit symmetrisch angeordneten Einzelpunkten zeigt, ist in Abb. 13 deutliche Hofbildung zu beobachten.

³⁾ Die Arbeiten anderer Verfasser (u. a. E. Hupka, Phys. Zeitschrift 1913, S. 623; S. Nishikawa und G. Asahara, Bericht in Z. f. Metallk. 1921, S. 282), soweit sie nach dem Verfahren von Laue erhalten worden sind, sollen nicht näher herangezogen werden, da sie sich infolge mangelnder Planmäßigkeit in kristallographischer Hinsicht einer Auswertung entziehen.

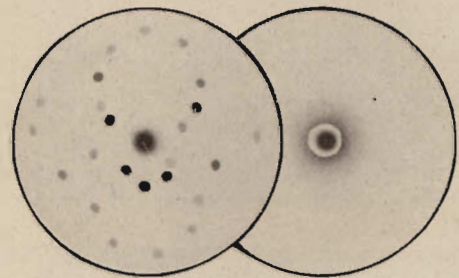


Abb. 12 und 13. Laue-Diagramme.

den entsprechende Proben entnommen und bei einer Temperatur von etwa 600° rekristallisiert. Man erkennt aus dem Gefügebild a in Abb. 14, daß der ganze Querschnitt einer so behandelten Probe mit Kristallkörnern gleichmäßig übersät ist. Die so vorbereiteten Proben werden nunmehr einem Biege- oder Zugversuch unterzogen und daraufhin erneut bei etwa der gleichen Temperatur mehrere Stunden lang rekristallisiert. Je nach dem Grad der Beanspruchung können auf diese Weise sehr große Kristalle erzeugt werden. Wie Abb. 14 zeigt, wurden die größten Kri-

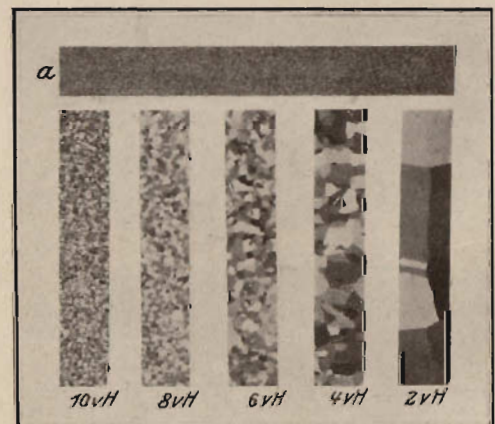


Abb. 14. (Die Zahlen in vH bedeuten die Dehnung).

stalle bei einer Dehnung von 2 vH erhalten. Solche Kristalle eignen sich für die Untersuchung im Röntgenlicht ganz besonders, weil sie 1. parallele Oberflächen haben, 2. in beliebig geringer Dicke hergestellt werden können und weil 3. ihre Oberfläche frei von kristallographischen Störungen ist. Man kann auf diese Weise

⁴⁾ Internationale Zeitschr. f. Metallographie 1916 S. 1.

geeignete Kristallindividuen beliebig auswählen. Die Untersuchung wurde fast ausschließlich an so gewonnenen Kristallen durchgeführt, und zwar an solchen des Reinaluminiums. Bei der

Erscheinungen, die man bei der überelastischen Beanspruchung von Metallen und ihrer Prüfung im Röntgenlicht erhält, soll in ihren Hauptzügen besprochen werden.

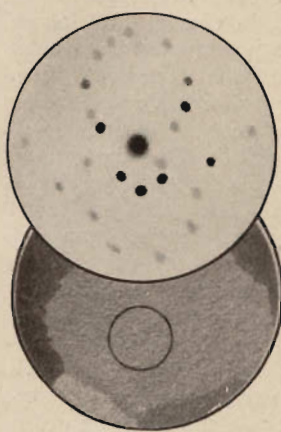
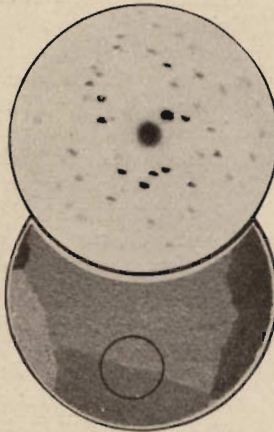
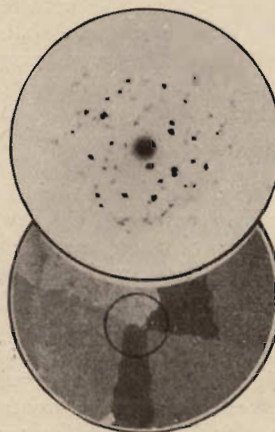
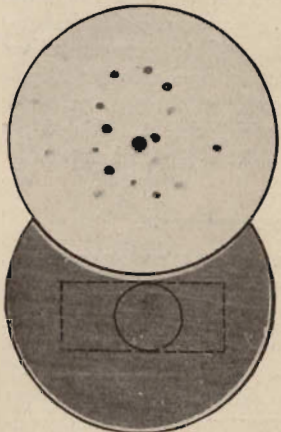
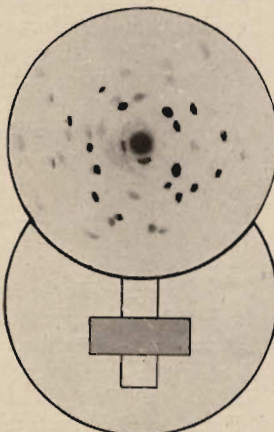
Abb. 15 u. 16. (32 \times vergr.)Abb. 17 u. 18. (32 \times vergr.)Abb. 19 u. 20. (32 \times vergr.)Abb. 21 u. 22. (32 \times vergr.)

Abb. 23 u. 24.

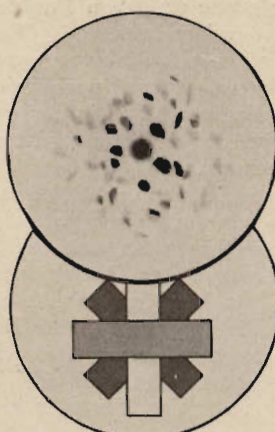
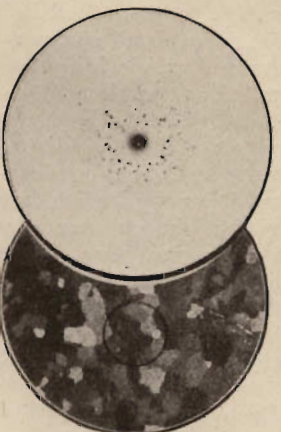
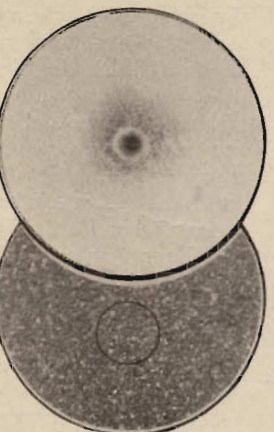
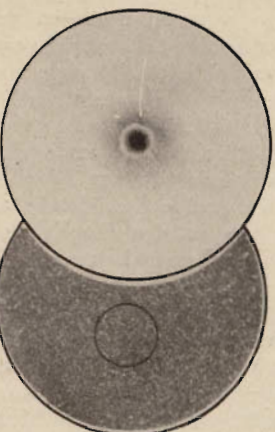


Abb. 25 u. 26.

Abb. 27 u. 28. (32 \times vergr.)Abb. 29 u. 30. (32 \times vergr.)Abb. 31 u. 32. (32 \times vergr.)

Einfluß der Anordnung und Dispersität.

Nebeneinanderlagerung.

Abb. 15 zeigt das von einem Aluminium-Einkristall erhaltene Laue-Diagramm, das schön ausgebildete Zonenkreise aufweist. Der zugehörige Kristall mit eingezeichnetem Durchstrahlungsfeld ist in Abb. 16 veranschaulicht. Wir wollen uns zunächst vergegenwärtigen, in welcher Weise nun dieses Diagramm beeinflusst wird, wenn ein zweiter Kristall in das Durchstrahlungsfeld eingeführt wird. Das erhaltene Laue-Diagramm ist in Abb. 17 und das Durchstrahlungsfeld in Abb. 18 wiedergegeben worden. Als Ergebnis erhält man also zwei Diagramme, die sich gegenseitig durchdringen und überdecken. Für diese Untersuchung wurde der für Abb. 15 und 16 benutzte Kristall gemeinsam mit einem Nachbar verwendet; die Zonenkreise sind daher ähnlich denen in Abb. 15. Stoßen mehrere Kristalle in dem Durchstrahlungsfeld zusammen, so gelangt man zu ähnlichen aber mehr verwickelten Bildern, so daß die

Zugehörigkeit der einzelnen Punkte wohl kaum noch festgestellt werden kann, wie dies aus Abb. 19 mit der zugehörigen Wiedergabe des Durchstrahlungsfeldes, Abb. 20, hervorgeht.

Auswertung der Ergebnisse sollen weder die Theorie der Interferenzerscheinungen noch weitere strukturtheoretische Fragen, die noch immer Gegenstand umfangreicher Forschungsarbeiten sind, näher berührt werden. Nur die Fülle von

Hintereinanderlagerung.

Bei der vorhergehenden Versuchsreihe waren die Kristalle (vergl. die Gefügebilder) nebeneinander angeordnet. Welche Ergebnisse bei einer Hintereinanderschaltung der Kristalle erhalten werden, zeigt die folgende Versuchsreihe. Abb. 21 veranschaulicht wiederum das Diagramm eines Aluminium-Einkristalls mit dem dazugehörigen Durchstrahlungsfeld, Abb. 22. Dieser Kristall wurde nunmehr in zwei gleiche Teile geschnitten, die für die Aufnahme um 90° versetzt hintereinander angeordnet wurden. Der Primärstrahl mußte also, nachdem er durch die erste Kristallplatte gegangen war, auch noch die zweite durchdringen. Gemäß Abb. 23 ist zu beobachten, daß beide Diagramme sich teils durchdringen, teils überdecken. Die Anordnung der Kristallplatten ist schematisch in Abb. 24 angedeutet. Abb. 25 zeigt endlich das Ergebnis, nachdem der Kristall weiter aufgeteilt worden war, so daß nunmehr vier Kristallplatten vom Röntgenlichtbündel durchdrungen wurden. Auch in diesem Bild ist eine große Zahl von Punkten sichtbar, die sich teils durchdringen, teils überdecken. Die Punkte sind bereits sehr verworren angeordnet und gestatten kaum noch eine Ermittlung der Einzeldiagramme. Die Anordnung der um etwa 45° versetzten Kristallplatten ist aus Abb. 26 zu entnehmen.

Aus den Versuchsergebnissen geht hervor, daß sowohl die Neben- als auch die Hintereinanderschaltung von Einzelkristallen eine um so mehr verworrene Widergabe der Einzelpunkte liefert, je mehr Kristalle in das Durchstrahlungsfeld eingeführt werden. Ein grundsätzlicher Unterschied, soweit er im Bereich unserer Betrachtungen liegt, scheint nicht zu bestehen, gleichgültig, ob die Kristalle nebeneinander oder hintereinander angeordnet sind.

Gemischte Anordnung.

Beim Durchstrahlen von Haufwerken von Kristallen, die eine sehr geringe Korngröße aufweisen, also in der Raumeinheit sehr viele Kristalle enthalten, werden die Kristalle stets beiderlei Anordnung aufweisen, d. i. sowohl nebeneinander als auch hintereinander angeordnet sein. Es wird also lediglich von der Blendenöffnung und von der Korngröße des Metalls abhängen, wieviel Kristalle in den Bereich des Durchstrahlungsfeldes zu liegen kommen. Die Ergebnisse an einer solchen Probe mit gemischter Kristallanordnung veranschaulicht Abb. 27, in der zahlreiche verworren angeordnete Reflexionspunkte sichtbar sind. Im Durchstrahlungsfeld, Abb. 28, lagern (der mittleren Korngröße nach) 120 Kristalle, woraus sich im Mittel etwa 2 Lagen von je 60 Kristallen berechnen lassen. Entsprechend der geringen Größe der Kristalle stellen sich die Reflexionspunkte in dem Diagramm auch als sehr kleine Flecken dar. Abb. 29 und 30 veranschaulichen die gleichen Verhältnisse für eine Vereinigung von etwa 2000 Kristallen, entsprechend etwa 4 Lagen mit je 500 Kristallkörnchen; das Diagramm, Abb. 29,

zeigt nach Maßgabe der geringen Korngröße der Probe, Abb. 30, eine immer größer werdende Anzahl winziger Reflexionspunkte. Endlich zeigen Abb. 31 und 32 die gleichen Ergebnisse an einem Kristallkomplex von etwa einer Million winziger Kristallindividuen. Auch in diesem Fall lassen sich die scheinbar diffusen Reflexe, wenn auch mit einiger Mühe, noch in Punktscharen auflösen.

Bei der Durchführung dieser Versuchsreihe wurde nun die Nebenbeobachtung gemacht, daß die Intensität der Bilder mit der Dispersität, d. i. mit der Verringerung des Kornes, außerordentlich stark abnimmt. Um Bilder von annähernd gleicher Stärke zu erhalten, mußte man die Durchstrahlungszeiten bei den feinkörnigen Proben sehr erheblich steigern. Bei hochdispersen Systemen können diese Zeiten um das zehnfache und darüber anwachsen. Die für die Durchstrahlung erforderliche Zeit nimmt nicht linear zu, sondern wahrscheinlich nach einer Exponentialkurve. Die Intensität der Bilder bzw. die erforderliche Durchstrahlungszeit gibt also gleichsam einen Maßstab der Korngröße. Weitere Anhaltspunkte für die Korngröße geben die Abmessungen der Reflexionspunkte selbst; ihre relative Größe verringert sich proportional mit der Korngröße, solange die Kristalle nicht größer sind als das Durchstrahlungsfeld selbst. Als Maß sind stets die jeweils größten Reflexionspunkte zu verwenden.

Deformationseinflüsse.

Kugeldruck- und Biegeversuche.

Als erste Deformationsart wurde der Kugeldruckversuch angewendet. Abb. 33 zeigt das Diagramm eines Aluminium-Einkristalls mit der zugehörigen Abbildung des Durchstrahlungsfeldes Abb. 34. Der Kristall wurde nunmehr einem Kugeldruckversuch unterzogen. Der Kugeldurchmesser betrug 2 mm, die Belastung etwa 1 kg der Durchmesser des Eindrucks etwa 0,3 mm. Er ist schematisch in der Abb. 34 bezeichnet. Bei der Laue-Aufnahme wurde der Kristall so eingestellt, daß der Kugeleindruck etwa die Mitte der Blendenöffnung einnahm. Das erhaltene Diagramm veranschaulicht Abb. 35. Das Ergebnis ist insofern überraschend, als die überelastische Beanspruchung des Kristalls im Diagramm deutlich zum Ausdruck kommt. Die ursprünglich fast kreisrunden Reflexionspunkte haben nunmehr deutliche Rautenform angenommen, der obere Zonenkreis hat beträchtlich an Umfang zugenommen, während die Punkte der unteren Zonenkreise dem Zentrum näher gerückt sind. Einige der Reflexionspunkte zeigen bereits strahlenförmige Ansätze.

Eine Erhöhung der Drucklast auf 3 kg (Kugeleindruck rd. 0,6 mm Dmr.) führt zu Veränderungen, die Abb. 36 veranschaulicht. Die rautenförmigen Reflexionspunkte sind beträchtlich gestreckt worden, so daß sie nunmehr fast linsenförmig erscheinen. Der Umfang des oberen Zonenkreises hat weiter zugenommen, die Punkte der untern Zonenkreise sind dem Mittelpunkt noch näher gerückt, ferner sind einige neue Re-

flexionspunkte aufgetaucht. In noch stärkerem Maße ist dies alles zu beobachten bei einer Erhöhung der Drucklast auf 5 kg (Kugeldruck rd. 0,8 mm Dmr.). Die strahlenförmige Verzerrung einzelner Reflexionspunkte hat in Abb. 37 besonders charakteristische Formen angenommen; ihre Intensität steht noch in be-

Aus den Versuchsergebnissen muß gefolgert werden, daß sehr geringfügige überelastische Beanspruchungen die Konfiguration und die Anordnung der Laue-Diagramme sehr beträchtlich zu beeinflussen vermögen. Um über den Grad der Empfindlichkeit einige Anhaltspunkte zu bekommen, hat man ein anderes Stück des gleichen Kristalls mit einem

feinen Nadelstich (0,1 mm Dmr. und Tiefe) versehen. Diese geringfügige überelastische Beanspruchung reichte bereits aus, um sich als Verzerrung der Reflexionspunkte deutlich bemerkbar zu machen, Abb. 39. Außerdem kann eine recht eigentümliche Wirkung dieser Deformationsart auf die Reflexionspunkte beobachtet werden:

Ein jeder der Reflexionspunkte weist nämlich einen kleinen runden hellen Fleck auf. Offenbar ist durch den Nadelstich eine Ausblendung erfolgt, und zwar derart, daß die Reflexionsintensität der durch die Deformation betroffenen Gitterebenen stark verringert worden ist.

Es erschien nun von Wert, den Versuch auch an einem plastischen Mineralkristall durchzuführen. Besonders geeignet schienen Gipskristalle, da sie bei Raumtemperatur leicht nach der (010)-Ebene gebogen werden können. Ein so gebogener Kristall ist in Abb. 40 veranschaulicht. Irgendwelche Zerstörungen konnten an den

Stellen stärkster Krümmung nicht wahrgenommen werden. Auch die am stärksten beanspruchten Teile waren klar und völlig durchsichtig. In Abb. 41 und 42 sind die Laue-Diagramme dieses Gipskristalls vor und nach der Beanspruchung veranschaulicht. Die Durchstrahlung war in beiden Fällen senkrecht zu (010). Während das Diagramm des unbeanspruchten Kristalls schön



Abb. 33.

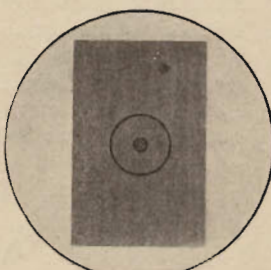


Abb. 34.

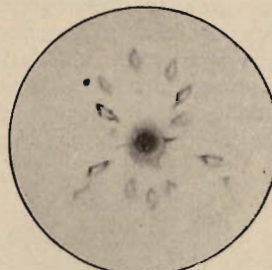


Abb. 35.



Abb. 36.



Abb. 37.



Abb. 38.



Abb. 39.



Abb. 40.

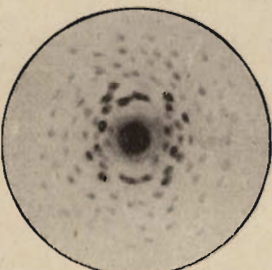


Abb. 41.



Abb. 42.

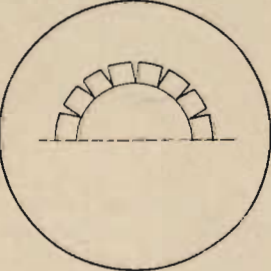


Abb. 43.

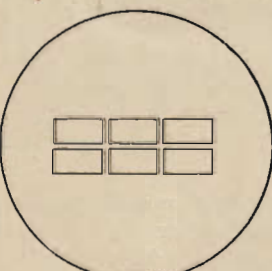


Abb. 43a.

stimmter Beziehung mit den Punkten des Diagrammes des nicht deformierten Kristalls.

Werden noch größere Belastungen verwendet (Kugel-Dmr. = 4 mm, Belastung rd. 10 kg, Eindruck rd. 1 mm Dmr.), so verschwinden die vereinzelter Reflexionspunkte völlig, so daß eine Sternfigur (man bezeichnet diese Erscheinung mit Asterismus) zurückbleibt, Abb. 38.

ausgebildete Zonenkreise aufweist, die aus vereinzelt Punkten bestehen, zeigt das Diagramm des gebogenen Kristalls Verzerrungen der einzelnen Reflexionspunkte zu deutlichen Strahlen. Die Zonenkreise haben mehr elliptische Formen angenommen, deren Längsachsen parallel zur Krümmungsebene liegen.

Die beiden Versuchsreihen sprechen eindeutig dafür, daß infolge der überelastischen Beanspruchung der Kristalle grundsätzliche Veränderungen in der Anordnung der Gitterebenen eingetreten sind, so daß die Netzebenen das Röntgenlicht nicht mehr in gesonderten Punkten, sondern in mehr oder weniger verzerrten Strahlen reflektieren. Hieraus muß zunächst auf Krümmungen der Gitterebenen geschlossen werden. Die Krümmung der Gitterebenen muß bei den durch Kugel-eindruck überelastisch beanspruchten Proben etwa der Kugelkalotte entsprechende, also muldenförmige Gestalt angenommen haben. Dies geht aus den rauten- bzw. linsenförmigen Reflexionsfiguren, die inwendig deutliche Ausblendungen zeigen, hervor. Ist der

Krümmungshalbmesser der Kalotte sehr groß, wie in Abb. 38, so erhält man nur noch strahlenförmige Reflexionsbilder. Dagegen muß sich die Krümmung der Gitterebenen bei dem durch einfache Biegungsbeanspruchten Gipskristall nach entsprechenden Zylinderflächen vollzogen haben, weil die Reflexionspunkte nur Verzerrung zu Strahlen aufweisen.

Es könnte vielleicht eingewendet werden, daß ähnliche Erscheinungen auch ohne Störung des Raumgitters auftreten können, nämlich dann, wenn die Kristalle bei der überelastischen Beanspruchung eine Aufteilung erleiden würden, und zwar so, daß die Bruchstücke im Hinblick auf die Orientierung der Kristallachse eine der Kalotte oder Zylinderfläche ähnliche Lage einnehmen, wie dies Abb. 43 schematisch andeutet. Sind solche Bauteilchen klein genug, so könnten durch sie gleiche Wirkungen vorgetäuscht werden, wie

durch eine stetige Krümmung von Gitterebenen.

Eine solche Anordnung der Bauelemente hat aber zur Voraussetzung, daß zahllose Spalten den so umgebildeten Kristall durchsetzen müßten. Diese Anschauung ist aber schon deswegen wenig wahrscheinlich, weil der Kristall dadurch stark an Festigkeit einbüßen müßte. Die Festigkeit beanspruchter Kristalle liegt aber in der Regel höher als die von unbeanspruchten. Des weiteren müßte die Dicke der Spalten geringer sein als 0,0001 mm, da sie sonst mikroskopisch noch nachweisbar wären.



Abb. 44.

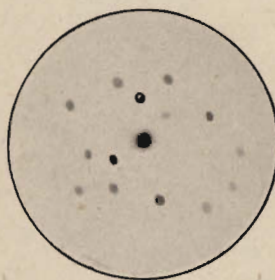


Abb. 45.



Abb. 46.



Abb. 47.

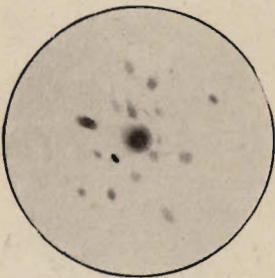


Abb. 48.

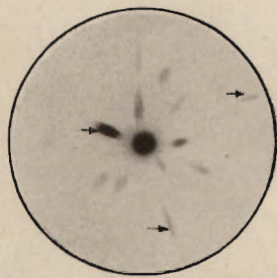


Abb. 49.



Abb. 50.

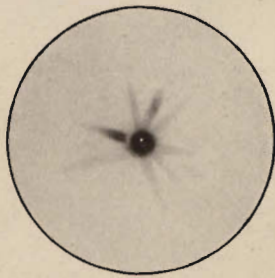


Abb. 51.

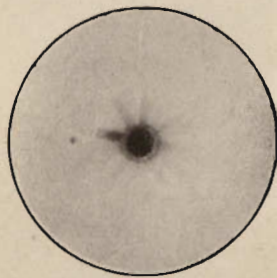


Abb. 52.

Aber auch amikroskopische Interpositionen müßten (bei der diese Vorstellung rechtfertigenden Zahl von Milliarden) Störungen in der Reflexionsfähigkeit so beanspruchter Kristalle hervorrufen. Solche Kristalle müßten zum mindesten deutlich getrübt erscheinen. An dem gebogenen Gipskristall und an zahlreichen andern durchsichtigen Kristallen kann aber keine Spur einer solchen Trübung wahrgenommen werden: alles Erscheinungen, die gegen eine Diskontinuität in der Anordnung der Reflexionselemente sprechen.

Die Frage läßt sich aber auch noch in anderer Weise prüfen.

Zugversuch.

Bis jetzt sind Deformationsarten behandelt worden, bei denen der Geometrie des Fließvorganges nach Krümmungen der Gitterebene eingetreten waren; ob kontinuierlicher oder diskontinuierlicher Art sei zunächst noch dahingestellt. Es war nun naheliegend, für die weitere Prüfung dieser Frage Deformationsarten zu wählen, bei denen die Parallelität der Bruchteilchen, falls solche auftreten sollten, ungestört erhalten bleiben müßte, wie dies das Schema Abb. 43 a veranschaulicht. Die günstigsten Bedingungen für eine solche Geometrie des Fließens dürfte der Zugversuch an einem Einkristall, und zwar im Bereiche der sogenannten prismatischen Dehnung bieten. In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse dieser Versuche veranschaulicht.

Die erste Stufe der Dehnung betrug etwa 1 vH, und zwar am Kristall selbst gemessen. Das Ergebnis ist neben den Diagrammen des unbeanspruchten Aluminiumkristalls, Abb. 44, und des Durchstrahlungsfeldes, Abb. 45, in Abb. 46 wiedergegeben. Der Pfeil gibt bei dieser und den andern Abbildungen die Streckrichtung an. Eine Veränderung im Aufbau des Diagramms ist kaum wahrzunehmen. Bei genauer Betrachtung kann man indes in den einzelnen Reflexionspunkten bereits deutliche Streifung wahrnehmen, besonders aber in den mit einem Pfeil versehenen Punkten. Worauf diese Änderung zurückzuführen ist, läßt sich vorerst nicht absehen.

Bei einer Steigerung der Dehnung auf rd. 5 vH können bereits stärkere Veränderungen in der Gestalt und der Anordnung der Punkte beobachtet werden, die sich sowohl in einer Radial- als auch Tangential-Verschiebung der einzelnen Diagrammpunkte bemerkbar machen, Abb. 47. Die fünf Diagrammpunkte in Abb. 46, die sich durch stärkste Intensität auszeichnen und eine spitzwinklige Anordnung aufweisen, zeigen nunmehr eine Vergrößerung dieses Winkels um mehrere Grad. Außerdem ist der Reflexionspunkt, der den Angelpunkt des Winkels bildet, dem Mittelpunkt beträchtlich näher gerückt, während die Punkte, die die Enden der beiden Schenkel bilden, in gleichem Maße vom Mittelpunkt abgerückt sind. Fast alle Punkte zeigen eine Verzerrung in radialer Richtung.

In noch stärkerem Maße tritt dies alles in Erscheinung bei einer Dehnung von 25 vH, wie Abb. 48 zeigt. Die Anordnung der Punkte, die den Angelpunkt und die Enden der beiden Schenkel bilden, entspricht nunmehr genau einem gleichseitigen Dreieck. Die Einzelpunkte zeigen noch größere Verzerrungen, die aber teils in radialer, teils in tangentialer Richtung verlaufen. Die beiden zu der soeben beschriebenen Konfiguration der Reflexionspunkte quer verlaufenden

Punktreihen, die anfänglich gebrochene Linien bilden, haben sich beinahe zu Geraden ausgerichtet unter Ausgleichung ihrer Abstände. Neu hinzugekommen sind einige Reflexe in der Nähe des Einstiches.

Eine weitere Beanspruchung dieses Kristalls durch Zug war nicht mehr möglich, da bereits beim letzten Versuch die Bruchdehnung erreicht und der Kristall senkrecht zur Zugrichtung gerissen war.

Beanspruchung durch Strecken (Zug und Walzen).

Um den Einfluß weiterer Deformationsstufen ähnlicher Art wie beim Zugversuch prüfen zu können, wurde derselbe Kristall nunmehr in gleichsinniger Richtung einem Walzversuch unterworfen. Die zusätzliche Beanspruchung wurde durch die Querschnittsabnahme ausgedrückt; sie betrug bei dem ersten Versuch 10 vH; das erhaltene Diagramm zeigt Abb. 49. Bei einigem Willen kann man die drei Reflexionspunkte, die im letzten Bild die Spitzen des gleichseitigen Dreiecks bildeten, noch eben herausfinden (durch Pfeile bezeichnet). Die Abstände der Punkte haben sich weiter verändert; der Angelpunkt ist dem Zentrum noch näher gerückt, während der Punkt rechts noch weiter abgerückt ist. Die beiden Ansätze in der Nähe des Einstiches haben sich wesentlich verlängert. Die Intensität des Angelpunktes hat bedeutend zugenommen.

In noch stärkerem Maße ist dies nach einer Querschnittsabnahme von 25 vH der Fall, wie Abb. 50 veranschaulicht. Der Angelpunkt und die beiden Ansätze in der Nähe des Einstiches haben sich bereits unter beträchtlicher Erhöhung der Intensität zu Strahlen verzerrt.

Eine weitere Querschnittsabnahme von 75 vH, Abb. 51, verzerrt weitere Punkte zu Strahlen, hebt die Intensität der einen und verringert die Intensität der andern Punkte. Nur der Reflex des Angelpunktes bleibt fast ungeschwächt bestehen. Als neue Erscheinung tritt bei diesem Deformationsgrad eine sehr kräftige Drehung des Strahls (der sich von dem Angelpunkt herleitet) um den Mittelpunkt auf. Er erreicht bei einer Querschnittsabnahme von 90 vH eine fast parallele Lage zur Walzrichtung, was Abb. 52 zum Ausdruck bringt.

Bei der Prüfung der überelastisch beanspruchten Metalkristalle konnte wie beim Studium des Einflusses der Dispersität die Beobachtung gemacht werden, daß die Intensität der erhaltenen Diagramme mit dem Grade der Streckung ganz erheblich abnahm. Die Durchstrahlungszeiten mußte man vielfach auf das Zehnfache und darüber erhöhen, um Bilder gleicher Intensität zu erhalten.

(Schluß folgt.)

Verlagerungshypothese und Röntgenforschung.

Von J. Czochralski, Frankfurt a. M.

(Schluß von S. 67.)

Beanspruchung allein durch Walzen.

Um nun die Veränderung in der gesetzmäßigen Anordnung der Laue-Diagramme bei ununterbrochen gleichartiger Formänderung festzustellen, wurde zusätzlich noch eine Versuchsreihe durchgeführt, bei der die Querschnitte lediglich durch Walzen verringert wurden.

Abb. 53 und 54 veranschaulichen wiederum das Diagramm eines Aluminium-Einkristalls und das zugehörige

Durchstrahlungsfeld. Das Diagramm zeigt besonders schön ausgebildete Zonenkreise.

Bei einer Querschnittabnahme von rd. 5 vH, wie sie Abb. 55 zeigt, ist der Zonenkreis noch ziemlich erhalten geblieben; die einzelnen Punkte zeigen aber sowohl eine Radial- als auch Tangential-Wanderung. Einige sind bereits zu Strahlen verzerrt; ihre Intensität hat einen starken Wechsel zugunsten der Strahlen erlitten, die sich parallel und quer zur Walzrichtung ausgebildet haben. In noch stärkerem Maß ist dies alles in Abb. 56, die einer Querschnittabnahme der Probe von 50 vH entspricht, zu beobachten.

Die Geometrie des Strahlenbildes des Endzustandes ist wiederum fast die gleiche wie bei der vorhergehenden Versuchsreihe (Abb. 51 und 52), nur tritt das Bild jetzt in einem diametral entgegengesetzt gelegenen Quadranten auf.

Wechsel des Kraftangriffes.

Es dürfte nun nicht ohne Reiz sein, zu erfahren, ob ein Wechsel der Deformationsrichtung folgerichtig eine Veränderung des Strahlenbildes bedingt. In der Tat läßt sich eine solche Veränderung feststellen, wie Abb. 57 zeigt. Die zusätzliche Querschnittabnahme betrug nur 15 vH, die Walzrichtung war quer zu der ursprünglichen. Die Bildung eines neuen Reflexionsstreifens mit einer Neigung von etwa 30° C zu der neuen Walzrichtung ist das Ergebnis. Eine weitere Drehung der Strahlen wird

durch eine zusätzliche Querschnittabnahme von 40 vH hervorgerufen. Abb. 58; der untere Strahl hat ebenfalls eine starke Drehung erfahren, zu einer völligen Umlenkung genügt der Grad der Formänderung noch nicht. Eine weitere Querschnittverringering konnte infolge der nunmehr sehr geringen Dicke des Kristallstreifens nicht mehr vorgenommen werden.



Abb. 53.

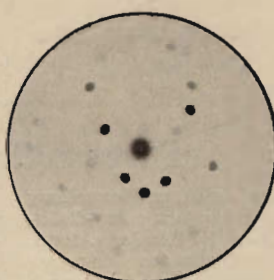


Abb. 54.



Abb. 55.



Abb. 56.

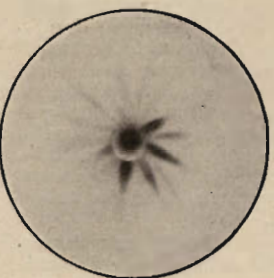


Abb. 57.

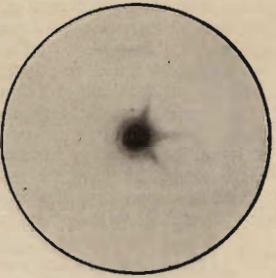


Abb. 58.

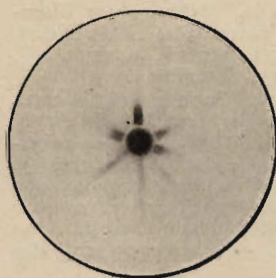


Abb. 59.



Abb. 60.

Einfluß der Kristallorientierung.

Die Tatsache, daß die Strahlenbilder nur in bestimmten Quadranten auftreten, erscheint, weil sie auf unsymmetrischen Bau schließen läßt, ziemlich unbegründet. Die Asymmetrie ließe sich nur schwer mit den üblichen geometrischen Vorstellungen vereinbaren. Zur Nachprüfung wurden daher noch weitere Kristalle anderer Orien-

tierung geprüft, die in der Tat eine andere Anordnung des Strahlenbildes ergaben. Abb. 59 zeigt das Ergebnis eines dieser Versuche nach einer Querschnittabnahme der Probe beim Walzen um 70 vH. Das Laue-Diagramm des nicht deformierten Kristalls ist in Abb. 60 wiedergegeben. Der Aufbau des Strahlenbildes zeichnet sich, abgesehen von der Intensität, durch fast völlige Symmetrie aus.

Die Gestalt der Strahlenbilder ist also in weitem Maße von der Orientierung des Kristalls bei der Deformation abhängig. Die erhaltenen Diagramme setzen sich gewissermaßen aus vier Quadranten zusammen; je nach der Orientie-

die Untersuchung in diesen Richtungen wurde der gleiche Kristall wie vorher für Abb. 59 und 60 verwendet. Hatte die Durchstrahlung die Richtung 2 nach Abb. 61, so wurde gemäß Abb. 62 ein neunstrahliger Stern erhalten, von dessen Strahlen sich nur drei durch starke Intensität auszeichnen, in Richtung 3 dagegen gemäß Abb. 63 ein halbiertes regelmäßiger sechsstrahliger Stern.

Man gelangt also zu dem bemerkenswerten Ergebnis, daß der Charakter des Sternbildes in den verschiedenen Raumachsen verschieden ist. Die früher beobachtete Asymmetrie (Abb. 51, 52, 56) tritt hier in der Richtung 3 wieder zu-

tage. Dies ist nicht besonders bemerkenswert, da gezeigt werden konnte, daß der Charakter des Sternbildes mit der ursprünglichen Kristallorientierung in Zusammenhang

steht, dessen Gesetzmäßigkeit zunächst nicht bekannt ist. Um die bestehenden Beziehungen genau zu erkennen, müßte man eine große Anzahl verschieden orientierter Kristalle prüfen. Offenbar gelangt man aber zu dem gleichen Ergebnis, wenn für die Prüfung an Stelle von Einkristallen Kristallhaufwerke benutzt werden.

Abb. 64, 65, 66 zeigen die Ergebnisse an einem Haufwerk von Aluminiumkristallen. Die Querschnittabnahme des Probestückes beim Walzen betrug 80 vH, die Zahl der Kristalle im Durchstrahlungsfeld war etwa 2000. Die Konfiguration des Bildes in der Richtung 1 entspricht einem deutlichen

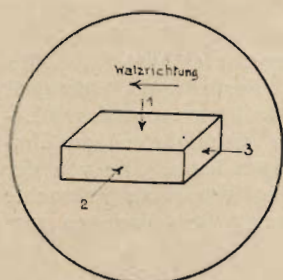


Abb. 61.



Abb. 62.

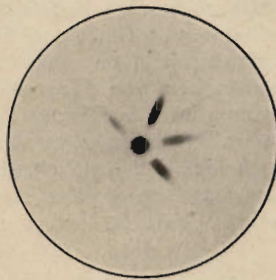


Abb. 63.



Abb. 64.

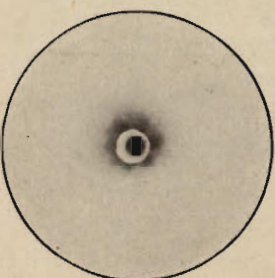


Abb. 65.

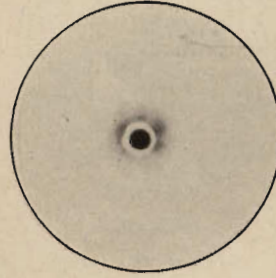


Abb. 66.

zung gelangen ein oder mehrere solcher Quadranten zur Ausbildung. Eine Gesetzmäßigkeit kann aber immer wieder beobachtet werden, nämlich die, daß sich die Strahlen stärkster Intensität mit dem Grade der Deformation mehr und mehr parallel bzw. senkrecht zur Walzrichtung einstellen.

Anisotropie des Endzustandes.

Als Hauptergebnis werden also stets Beugungsbilder, erhalten, die sich in einer bestimmten einfachen Sternform ausdrücken. Hieraus dürften sich wichtige weitere Schlußfolgerungen ergeben. Vor der Erörterung dieser Frage muß aber zunächst nach dem charakteristischen Kennzeichen des Sternbildes in den drei Raumachsen gefragt werden. Bei allen bisher beschriebenen Proben wurde die Durchstrahlung senkrecht zur Oberfläche der Kristalle bzw. der Walzstreifen, also gemäß Richtung 1 der schematischen Abbildung 61 vorgenommen. In den Richtungen 2 und 3 wurden die Proben nicht geprüft. Für

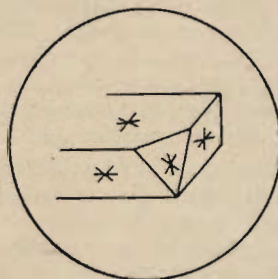


Abb. 67.

Sechsstern, Abb. 64, mit einer quer zur Walzrichtung liegenden Achse; in der Richtung 2, Abb. 65, liegt eine Achse parallel zur Walzrichtung, während in der Richtung 3 eine Achse senkrecht zur Walzrichtung verläuft; sie bilden ein senkrecht aufeinander stehendes Achsenkreuz. In Abb. 67 ist die Anordnung der Sternbilder in der Richtung der drei Raumachsen schematisch dargestellt, ergänzt durch das Bild

in der Körperdiagonale; im großen und ganzen besteht auch Kongruenz mit den in Abb. 59 bis 61 wiedergegebenen Bildern. Man darf wohl, ohne einen Fehler zu begehen, annehmen, daß die an Haufwerkkrystallen gewonnenen Ergebnisse die Erscheinung in ihrer allgemeinen Form treffen, d. h. daß sie die Häufigkeit der Symmetrie, welcher Art sie auch sein mag, zum Ausdruck bringen.

Rekristallisation.

Rekristallisiert man ein Metall, das durch überelastische Beanspruchung in der Weise verändert wurde, daß es im Laue-Diagramm mehr oder weniger deutlichen Asterismus zeigt, so gibt sich dies darin kund, daß allmählich mit steigendem Grade der Rekristallisation eine Auflösung des Sternbildes in Haufwerke von Einzelpunkten erfolgt. Es ist dabei gleichgültig, ob man von Einkristallen oder Haufwerken von Kristallen ausgeht. In Abb. 68 kann diese Auflösung des Sternbildes noch kaum wahrgenommen werden, Asterismus dagegen noch ziemlich deutlich, der die Anwesenheit noch vorhandener Spannungen (Restspannungen) anzeigt. Abb. 69 entspricht einer weiteren Stufe der Rekristallisation. An Stelle des Sternbildes ist ein Haufwerk von Einzelpunkten getreten, die keine Bevorzugung in ihrer Anordnung aufweisen. Schließlich gelangt man bei sehr grobkörnig rekristallisierten Proben

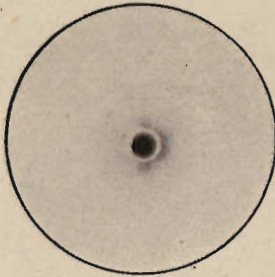


Abb. 68.

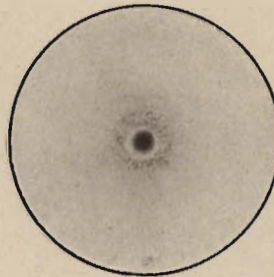


Abb. 69.



Abb. 70.

zu sehr deutlich ausgebildeten Haufwerken von Einzelpunkten, wie dies Abb. 70 zum Ausdruck bringt. Die Anzahl der Kristalle im Durchstrahlungsfeld betrug in den Abbildungen steigend rd. 1 000 000, 2000 und in der letzten Abbildung etwa 200. Die Auflösung des Sternbildes in Einzelpunkte ist ein Anzeichen dafür, daß jetzt erst eine Aufteilung der ursprünglichen Kristalle zu Einzelkristallen eingetreten ist.

Vielleicht wird es möglich sein, durch Prüfung mittels der Röntgenstrahlen die untere Rekristallisationsgrenze der Rekristallisationsdiagramme genauer zu bestimmen als mit den bisherigen Mitteln, mit denen nur Annäherungszahlen erhalten werden konnten. Ferner dürfte das Röntgenverfahren besser als jedes andere geeignet sein, zu entscheiden, ob sich ein Metall im Zustand mechanischer Verfestigung befindet (vorhandener Asterismus). Fehlender Asterismus deutet auf Gußmetall oder rekristallisiertes Material.

Begriffsbestimmung.

Es ist wiederholt versucht worden, die Vorgänge der überelastischen Beanspruchung, die

sich darin äußern, daß die Metalle eine Änderung ihrer physikalischen Eigenschaften erfahren, in einem erschöpfenden Begriff zum Ausdruck zu bringen. Der Reihe nach sind die Bezeichnungen: Hämmern, Schmieden, Drücken, Pressen, Walzen, Strecken, Ziehen mit dem Zusatz „warm“ oder „kalt“ benützt worden. In allgemeinerer Form sollten diese Vorgänge durch die Begriffe „Deformation“, „Recken“, „Strecken“, „mechanische Bearbeitung“ und ähnliche Wortbildungen gekennzeichnet werden. Aus neuerer Zeit stammen die Bezeichnungen „überelastische Beanspruchung“, „Umbildung“, „Plastizierung“, „Verformung“, ebenfalls mit dem Vorzeichen „warm“ oder „kalt“. Es ist ohne weiteres verständlich, daß keiner dieser Begriffe zur eindeutigen Kennzeichnung des Vorganges ausreichte, da darin eine nähere Beziehung zu dem Wesen des Vorganges nicht besteht. Den Begriffen „Härtung“, „Verfestigung“ mangelt ebenfalls Eindeutigkeit, weil man auch durch Legieren und Abschrecken (Stahlhärten) zu ähnlichen Wirkungen gelangen kann. Die von der Verlagerungshypothese in Vorschlag gebrachte Bezeichnung „Verlagerung“ fand dagegen zum

Teil gute Aufnahme, weil sie auf den molekularmechanischen Vorgang Bezug nimmt. Von vielen sachverständigen Forschern ist diese Benennung angenommen worden, und es dürfte wohl nicht unzweckmäßig sein, sie bis auf weiteres beizubehalten.

Schlußfolgerungen.

Überblickt man die Ergebnisse, so kommt man etwa zu folgendem Schluß. Bei sehr schwachen Deformationen treten Streifungen in einzelnen Reflexionspunkten auf. Bei weiteren Deformationsgraden tritt ziemlich gleichzeitig eine Radial- und Tangentialwanderung der Punkte ein. Die Verzerrung endet in Ausbildung von Strahlen, wobei einzelne dieser Strahlen stark an Intensität zunehmen, vielfach unter Bildung neuer Strahlen, erhöhter Intensität und schließlich einer starken Drehung der Strahlen, die die größte Intensität aufweisen, um den gemeinsamen Mittelpunkt parallel bzw. senkrecht zur Walzrichtung. Die Gestalt des Strahlenbildes ist von der Orientierung des Kristalls und der Richtung und Art der Deformation abhängig, die sich stets in einer gewissen Anisotropie des End-

zustandes kundgibt. Bei einem Wechsel der Deformationsrichtung tritt zwangsweise und gesetzmäßig eine Änderung der Konfiguration ein. Durch Rekristallisation wird das Sternbild in ungeordnete Haufwerke von Einzelpunkten aufgelöst.

Auch bei Deformationsarten, bei denen die Teilchen nur eine Parallelverschiebung gemäß Abb. 43a (S. 65) erfahren (Zugversuch), werden grundsätzlich die gleichen Beugungsbilder erhalten wie beim Auftreten von Krümmungen der Gitterebenen (Deformation durch einen Kugeldruck). Aus diesen Versuchsergebnissen folgt demnach, daß auch bei Deformationsarten, bei denen Parallelität der vermeintlichen Trümmerteilchen bestehen müßte, keine gesonderte Reflexion stattfindet, die zu Punktdiagrammen führt, sondern vielmehr typische Verzerrungen der Reflexe auftreten, die auf stetige Übergänge im Bau der Gitterebenen zurückgeführt werden müssen, daß sich also keine Anzeichen für die Unversehrtheit des Gitters oder die erhalten gebliebene Parallelität der Gitterelemente im Sinne der Translationshypothese ergeben.



Abb. 71.



Abb. 72.

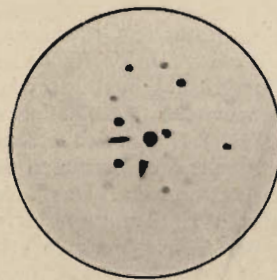


Abb. 73.

Die erhaltenen Diagramme setzen bei der Deformation unzertrümmert gebliebene, also homogene Kristallkörper geradezu voraus. Bei einer Kristallzertrümmerung (grobe Dislokation nach Rinne) müßten statt eines Diagrammes nach Maßgabe der Deformation eine geringere oder größere Anzahl solcher Diagramme auftreten. Solche Diagramme müßten je nach der Orientierung der Trümmerteilchen geringere oder größere Abweichungen aufweisen, ähnlich Abb. 15 bis 26 (S. 63). Wie man sich eine solche Zertrümmerung auch vorstellen mag, so müßte man mit einer Aufteilung des Kristalls zunächst in zwei und fortgesetzt steigend in eine immer größere Zahl von Teilen rechnen. Es ist dabei gleichgültig, ob man den Aufteilungsvorgang als linear zum Deformationsgrad verlaufend annimmt oder ihm andere Gesetzmäßigkeit zuschreibt. Die Aufteilung würde also alle Stufen von 0 bis ∞ durchlaufen müssen; dies müßte sich aber in den erhaltenen Diagrammen äußern. In keinem der beschriebenen zahlreichen Fälle konnte jedoch bei Metallkristallen etwas Ähnliches beobachtet werden.

Man kann aber noch weiter einwenden, daß die Bruchstücke nur eine so geringfügige Ände-

rung ihrer kristallographischen Orientierung erleiden, daß sie keinerlei merkliche Abweichung in der Anordnung der Reflexionspunkte hervorrufen. Wie aus den Versuchsergebnissen hervorgeht, ist dies aber keineswegs der Fall, und zwar auch dann nicht, wenn die günstigsten Vorbedingungen für eine solche Parallellagerung der Bruchstücke bei der Deformation vorgeherrscht haben, z. B. beim Zugversuch. Nicht nur eine deutliche Verzerrung der Diagrammpunkte kann auch in allen diesen Fällen nachgewiesen, sondern darüber hinaus können Reflexionserscheinungen beobachtet werden, die jeder Symmetrie sowie der Rationalität der Indices ganz und gar widersprechen. Die beiden Einwendungen erweisen sich daher als völlig unzureichend, um die aus den Versuchsergebnissen gezogenen Schlußfolgerungen in Frage zu stellen.

Man wird vielleicht auch geneigt sein, die Anomalien der Beugungserscheinung auf geringfügige Störungen im Raumgitteraufbau zurückzuführen, wie sie von den Physikern, Kristallographen und Mineralogen oft beobachtet worden sind. Die vorliegenden Versuchsergebnisse geben

aber dafür keinerlei Anhaltspunkte; im Gegenteil sprechen sie dafür, daß tiefgreifende Veränderungen im Gitteraufbau vorgegangen sein müssen, sofern es angebracht sein dürfte, von einem solchen überhaupt noch zu sprechen. Dar-

auf deutet insbesondere die Konfiguration der Diagramme der Endstufen der Deformation.

Diese Schlußfolgerungen stehen in schroffem Gegensatz zu den Ergebnissen derjenigen Forscher, welche die Fragen mit Hilfe des Scherrer-Debye-Verfahrens zu lösen versucht haben. Diese Forscher sprechen sich für ein unverändert gebliebenes Raumgitter aus, geben aber zumeist zu, daß gewisse sekundäre Erscheinungen beobachtet werden können, die im allgemeinen verschieden gedeutet werden. Von einigen werden sogar Raumgitterstörungen zugegeben, die allerdings nicht bedeutend sein sollen⁵⁾. Die ganze Frage spitzt sich vielleicht darauf zu, die Mengenteile der gestörten bzw. unversehrten Gitterelemente, wenn auch der Größenordnung nach, zahlenmäßig zu bestimmen.

Dies dürfte in der Weise möglich sein, daß man Versuche an geeigneten Proben durchführt, indem man das Verhältnis der gestörten zu den unversehrten Gitterelementen künstlich veränderlich macht. Abb. 71 bis 73 veranschaulichen die Ergebnisse solcher Versuche. Abb. 71 gibt das

⁵⁾ Tammann, Nachr. der Ges. der Wissenschaften Göttingen 1914/18.

Laue-Diagramm eines fast unversehrten Aluminium-Einkristalls, Abb. 72 das eines weitgehend (65 vH) kaltgereckten Aluminiumkristalls wieder. Das Diagramm der hintereinander geschalteten Kristallplatten ist in Abb. 73 veranschaulicht. Das Ergebnis ist eine deutliche Überdeckung des Punktdiagramms und des Sternbildes. Das Dickenverhältnis des verlagerten zum nichtverlagerten Kristall war 1 : 5. Man kann die Dickenverhältnisse noch weitgehend verändern und trotzdem beide Erscheinungen nebeneinander beobachten.

So deutlich der Zusammenhang der beiden Arten von Wirkungen aus Abb. 71 bis 73 zu ersehen ist, so geht er aus den Abbildungen, die die Ergebnisse der Kugeldruckversuche wiedergeben, nicht hervor. Der Unterschied zwischen der vorangehenden Reihe, Abb. 71 bis 73, und diesem Ergebnis besteht darin, daß die beiden Arten der Effekte nicht, wie bei der vorangehenden Reihe, gesondert auftreten, sondern sich zu einer gemeinsamen Wirkung addieren. Dies ist aber darin begründet, daß die Reflexionsebenen hier stetig ineinander übergehen und nicht, wie in der Versuchsreihe Abb. 71 bis 73, völlig voneinander verschieden sind. Das Mengenverhältnis der gestörten zu den ungestörten Gitterebenen ist aus dem Verhältnis der Projektionsfläche des Kugeleindrucks zum Durchstrahlungsfeld ermittelt worden. Bei den geringsten überelastischen Beanspruchungen (z. B. Nadelstichversuch, Abb. 39 S. 65) konnten bereits Verzerrungen des Laue-Diagramms beobachtet werden. Das Mengenverhältnis der gestörten zu den ungestörten Gitterelementen betrug bei diesem Versuch etwa 1 : 800, also 0,12 vH.

Beim Kugeldruckversuch, dessen Ergebnis das Diagramm Abb. 35 (S. 65) veranschaulicht, war das Verhältnis von gestörten zu ungestörten Gitterelementen wie etwa 1 : 100, also 1 vH. Die einzelnen Reflexionspunkte sind rautenförmig verzerrt, die Anordnung der Punkte läßt aber noch weitgehende Gesetzmäßigkeit im Aufbau erkennen.

In Abb. 36 ist das Verhältnis der gestörten Gitterelemente zu den ungestörten etwa 1 : 20, also gleich 5 vH. Noch immer kann deutliche Gesetzmäßigkeit im Aufbau wahrgenommen werden.

In Abb. 37 beträgt der Anteil der gestörten Gitterelemente zu den ungestörten etwa 1 : 10, gleich 10 vH. Auch hier machen sich noch immer die Einflüsse beider Arten von Gitterelementen bemerkbar.

In Abb. 38 war das Verhältnis der gestörten zu den ungestörten Gitterelementen endlich etwa wie 1 : 6, gleich 16,6 vH. In dieser Abbildung ist zwar nur noch Asterismus zu beobachten, die einzelnen Strahlen des Sternbildes haben aber noch immer die Richtung der ursprünglichen Reflexionspunkte.

Die verwendete Auswertungsart ist deswegen statthaft, weil das dünne Kristallplättchen bei allen angestellten Kugeldruckversuchen durchgedrückt wurde, die Deformation erstreckte sich

also bis auf die Rückseite. Die in vH angegebenen Anteile an verlagerten Gitterelementen sind in Wirklichkeit größer, als für die Auswertung angenommen wurde, und zwar aus dem Grunde, weil die Wirkung der Deformation erfahrungsmäßig stets über die Grenzen des Kugeleindrucks hinausgeht. In besonders starkem Maß ist dies der Fall, wenn die Proben beim Kugeldruckversuch durchgeführt werden. Durch Rekristallisation kann der Bereich der gestörten Gitterelemente genau ermittelt werden. Bei der Probe, deren Diagramm Abb. 38 veranschaulicht, erstreckte sich der Bereich der gestörten Gitterelemente fast auf das gesamte Durchstrahlungsfeld. Das Verhältnis der gestörten zu den ungestörten Gitterelementen betrug also fast 100 vH. Bei den andern Proben (Abb. 35 bis 37) dürften diese Zahlen mindestens doppelt so hoch liegen, als aus den Kugeleindrücken errechnet worden ist. Voll ausgebildeter Asterismus kann als Anzeichen dafür angesehen werden, daß ungestörte Gitterelemente in dem Durchstrahlungsfeld nicht mehr zugegen sind.

Über den Grad der Störung sagen diese Erscheinungen zunächst nichts aus. Sie geben nur das Mengenverhältnis der beiden Arten der Gitterelemente zueinander an.

Mit steigendem Deformationsgrad treten alsdann noch weitere bereits beschriebene Veränderungen in der Anordnung des Sternbildes auf, die in der Drehung der einzelnen Strahlen um den gemeinsamen Mittelpunkt angezeigt werden und die im Zustand höchster Verlagerung einem gleichbleibenden Endzustand zustreben. Der Grad dieser Drehung der Strahlen hat offenbar als Maß des Grades der Deformation zu gelten, wenn die Orientierung und die Richtung des Kraftangriffes eindeutig bestimmt sind.

Die widersprechenden Schlußfolgerungen der auf Grund des Scherrer-Debye-Verfahrens einerseits und des Laue-Verfahrens andererseits erhaltenen Ergebnisse sind offenbar in der grundsätzlichen Art dieser Verfahren begründet. Durch das Scherrer-Debye-Verfahren werden wohl noch Interpositionen winziger Gitterbereiche, die möglicherweise durch Blockierung u. dgl. vor einer Zerstörung geschützt wurden, angezeigt. Das Scherrer-Debye-Verfahren gibt gewissermaßen nur eine statistische Übersicht über die Anwesenheit von Gitterkomplexen übereinstimmender Orientierung.

Strukturtheoretisches.

Es ist von Wichtigkeit, daß das Endergebnis der Verlagerung stets Beugungsbilder sind, die sich in einem bestimmten einfachen Sternbild ausdrücken.

Versucht man, diese Bilder geometrisch mit einem einfachen Reflexionskörper in Zusammenhang zu bringen, so scheinen sie in roher Annäherung in den Richtungen 1 und 3 dem Durchdringungskörper einer sechsseitigen Pyramide (mit allen möglichen Neigungswinkeln der Flächen) zu entsprechen. Für Richtung 2 reicht diese Konstruktion insofern nicht mehr hin, als

eine der Durchdringungspyramiden eine Drehung um eine halbe sechszählige Achse erfordern würde. Ähnliches dürfte sich wohl auch aus bestimmten Kugelpackungen herleiten lassen. Offenbar handelt es sich hier nicht mehr um die Wirkung von Netzebenen, sondern vielleicht um Erscheinungen, die sich bereits aus der Atomnatur ableiten.

Vom Standpunkt der Verlagerungshypothese sind — über die Vorstellung der Raumgitterstörung hinaus — bereits bestimmte Annahmen über den molekularen Endzustand der überelastisch beanspruchten Metalle gemacht worden. Sie bestehen im wesentlichen in der Annahme, daß durch das Auftreten von Scherspannungen eine Gleichlagerung der polar gedachten Atome quer zu der Richtung des Schubes hervorgerufen werde. Wenngleich die erhaltenen Ergebnisse auf Vorgänge dieser Art hinweisen, so muß es der künftigen Forschung vorbehalten bleiben, über die Berechtigung dieser Vorstellungen zu entscheiden.

Die Art der Raumgitterstörungen auf Grund dieser Versuchsergebnisse schon heute näher begrifflich festzulegen, erscheint verfrüht. Hier kann das bereits früher⁶⁾ Geäußerte nur wiederholt werden:

„Es wäre falsch, irgendwelche Schlüsse (über das Gesagte hinaus) über die Art der Raumgitterstörungen aus den hier beschriebenen Erscheinungen ableiten zu wollen. Ob die Bewegungen der Atome im Gitter (bei überelastischen Beanspruchungen) in Richtung der Kristallachsen oder schief zu diesen und in beiden Fällen unter gemeinsamer Drehung erfolgen, muß dahingestellt werden. Es ist auch für unsere Zwecke gleichgültig, ob wir von materiellen oder energetischen Kraftzentren ausgehen und ob wir die Verlagerungsfähigkeit der Atome (im Gitter) auf Störungen periodischer Atom- oder Elektronenschwingungen zurückführen oder sie in dem Begriff des Richtwiderstandes oder der inneren Reibung zum Ausdruck bringen. Es kann ferner gefolgert werden, daß die kleinsten Gleitsysteme Atome oder Molekel sein müssen. . . . Der natürliche Kristallzustand wird charakterisiert durch ein vollkommenes Gleichgewicht der beteiligten molekularen Kräfte. In Frage kommen also Gleichgewichte 1. des molekularen Abstandes, 2. der molekularen Lage (Orientierung) und 3. der molekularen Gestalt Art und Größe der molekularen Verlagerungssphäre sowie das Verhältnis der wirksamen Molekularkräfte zueinander sind bestimmend für das mechanische Verhalten eines gegebenen Stoffes sowohl in qualitativer als auch in quantitativer Hinsicht⁷⁾).

Die Ausführungen werden vielleicht alle diejenigen unbefriedigt lassen, welche genaue Ableitungen über die Art der Raumgitterstörungen auf Grund dieser Untersuchungen erwartet

haben. Grundsätzlich sind aber wohl alle möglichen Arten der Raumgitterstörungen in den angeführten Literaturstellen erwähnt. Auf verschiedene Anregungen hin sollen diese Möglichkeiten in folgendem noch schematisch angedeutet werden.

Vom Gitterbau aus gesehen, stellt sich eine Translation etwa dar, wie sie Abb. 74 veranschaulicht. Dieses Schema (in etwas veränderter Darstellung) rührt von E. Heyn⁸⁾ her. Es dürfte wohl der allgemeinen Vorstellung am meisten entsprechen. Es besagt, daß bei der Ausbildung von Gleitflächen eine Substitution der Atome erfolge, und zwar in der Weise, daß die Bewegung der Gitterpunkte immer ganzen Atomabständen entspricht⁹⁾, wobei sowohl die Gitterabstände als auch die Gitterwinkel unverändert beibehalten werden.

Von diesem Schema ausgehend, wird man eine Raumgitterstörung im Sinne der Verlagerungshypothese etwa so aufzufassen haben, wie dies

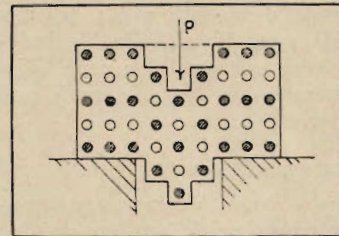


Abb. 74.
Darstellung einer
Translation.

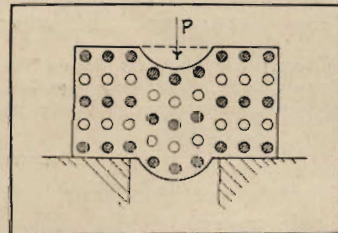


Abb. 75.
Raumgitterstörung
im Sinne der Ver-
lagerungshypothese.

Abb. 75 zum Ausdruck bringt. Punktreihen, die ursprünglich eine gerade Linie bildeten, werden nach und nach in solche umgewandelt, die irgend-einer nach Maßgabe der inneren Kräfte ununterbrochen verlaufenden Raumkurve folgen. Hieraus folgt, daß die Bewegung der Teilchen nicht ganzen Atomabständen entspricht, sondern beliebigen Bruchteilen von Atomabständen entsprechen kann, d. h. daß die Atome von Gitterpunkt zu Gitterpunkt beliebige Zwischenlagen einnehmen können, sobald ein Metall überelastisch beansprucht wird, und zwar so, daß die physikalischen Eigenschaften verändert werden.

Eine Raumgitterstörung wäre demnach in erster Linie als eine Veränderung der Gitter-

⁸⁾ Handbuch der Materialkunde 1912, Bd. 2A S. 222.

⁹⁾ Heyn stellt damit nur eine bestehende Ansicht fest, ohne daraus Schlußfolgerungen anderer Art abzuleiten. Er ist vielmehr der Ansicht, wie auch andere namhafte Forscher auf diesem Gebiete (Ludwik u. a.), daß noch ganz andere unbekannte Umstände den Vorgang überelastischer Beanspruchung, so wie er sich in der Verfestigung äußert, beeinflussen müssen. Die Translationshypothese ist auch als Ursache der Verfestigung von diesem Forscher nie anerkannt worden.

⁶⁾ Czochralski, Int. Zeitschr. f. Met. 1916, S. 43.

⁷⁾ Da früher die Einatomigkeit der Metalle noch nicht als erwiesen betrachtet werden konnte, ist hier statt von Atomen von molekularen Eigenschaften gesprochen worden.

winkel aufzufassen. Offenbar wird die Tangentialbewegung auch von Drehungen der Atome um ihren Schwerpunkt begleitet. Ob auch die Gitterkonstante verändert wird, läßt sich vorerst nicht absehen. Aus der Verminderung des spezifischen Gewichtes bei der überelastischen Beanspruchung müßte freilich mit einer Vergrößerung der Abstände gerechnet werden.

Aufschluß über alle diese Fragen ist zu erwarten, wenn die Röntgenforschung auf diesem Sondergebiete in einen produktiven Zeitabschnitt gerückt sein wird. Bis jetzt war ihre Bestätigung ganz ausschließlich reproduktiv, indem sie eine Bestätigung der auf anderem Wege gewonnenen Erkenntnisse gebracht hat.

Von allen Seiten mehrten sich mit Macht die Arbeiten über diesen Gegenstand. Trotz aller Widerstände gewinnen die neuen Anschauungen von Tag zu Tag an Boden. Es ist nicht zuviel damit gesagt, wenn auf den bereits früher im Zusammenhang mit der Verlagerungshypothese geäußerten Standpunkt verwiesen wird: daß aus diesen dunklen Anfängen, die auf die Veränderung des Gitters Bezug nehmen, eine neue Wissenschaft der Zustände der Materie nach und nach emporblühen wird¹⁰⁾.

Zusammenfassung.

Die Translations- und Verlagerungshypothese werden einer experimentellen Prüfung an der Hand des Laueverfahrens unterzogen und die Wege für die Erzeugung geeigneter

¹⁰⁾ Mit der Durchführung der Versuche waren Fr. Rassow und Dr. W. Irmer betraut, für deren rege Teilnahme an der Bearbeitung der gestellten Probleme ich ihnen bestens danke.

Wärmeausdehnung verschiedener Legierungen.

Untersuchungen von Wilmer H. Sonder und Peter Hindert an Nickel, Monelmetall, Stellite, Aluminium, Ni-Cr-Stahl und Aluminiumlegierungen ergaben verschiedene bemerkenswerte Feststellungen¹⁾.

Handelsnickel mit 94 bis 99 vH Ni-Gehalt. 10 Proben wurden untersucht und bis 600° erwärmt. Sämtliche Proben waren heiß gezogen, je eine Vergleichsprobe wurden vor der Untersuchung gegläht; demnach wurde von jeder Nickelsorte je eine geglähte und eine ungeglähte Probe untersucht. Fast sämtliche Proben zeigten bei 350° kleine Unregelmäßigkeiten, doch waren keine so ausgesprochenen Abweichungen im Verlauf der Schaulinien festzustellen, wie solche von verschiedenen Forschern bei Reinnickel nachgewiesen worden sind. Die geglähten Proben zeigten etwas höhere Ausdehnungswerte.

Monelmetall mit 60 bis 69 vH Ni. Untersucht wurden 10 Proben und zwar paarweise 2 × 2 gegossene und 2 × 3 heißgewalzte Stäbe. Von jedem Paare wurde 1 Stück vor der Prüfung gegläht. Die Schaulinien der Ausdehnungswerte verlaufen durchwegs ganz regelmäßig. Innerhalb der Wärmegrenzen von 25 bis 300° ergab sich kein Unterschied zwischen den geglähten und den ungeglähten Proben. Beim Wärmeabstande von 25 bis 600° zeigten die gegossenen Proben größere Ausdehnung als die heiß gewalzten.

¹⁾ Nach dem Scientific Paper Nr. 426 des U. S. Bureau of Standards, vergl. auch Z. f. Metallk. 1922 S. 77, 132 u. 373.

Kristalle angegeben. Die Beugungserscheinungen von neben- und hintereinander gelagerten und von gemischt angeordneten Kristallen werden planmäßig einander gegenübergestellt. Als dann werden die Einflüsse der Deformation an Kugeldruckversuchen, Biege-, Zug- sowie Walzversuchen und der Einfluß der Rekristallisation eingehend geprüft. Der Einfluß der Deformation auf die Beugungsbilder macht sich im Auftreten von Streifungen, Radial- und Tangentialwanderung der Punkte und schließlich in einer Verzerrung zu Strahlen bemerkbar, die zu bestimmten Sternbildern führen. Bei steigender Verlagerung tritt eine Drehung um den gemeinsamen Mittelpunkt ein. Die Kristallorientierung ist von Einfluß, ebenso der Wechsel der Deformationsrichtung. Rekristallisation ruft eine Auflösung des Sternbildes in ungeordnete Punkte hervor. Mit zunehmender Dispersität und zunehmendem Deformationsgrad wird die Intensität der Bilder verringert. Alles dies deutet auf Raumgitterstörungen hin, die als „Verlagerung“ bezeichnet werden. Der Endzustand, in den die Kristalle übergeführt werden, ist anisotrop, ohne aber Kristallcharakter zu haben. Durch die Verfahren konnten die bereits auf anderem Wege gewonnenen Erkenntnisse bestätigt werden. Eine Zertrümmerung und Umorientierung der Kristalle als solche tritt bei der Deformation nicht ein. Aus der Anordnung und Intensität der Beugungsbilder kann die Bestimmung der Orientierung, der Korngröße und vielleicht auch des Grades der Verlagerung ermittelt werden.

(Der Meinungsaustausch, der sich an diesen und den von Prof. Groß gehaltenen Vortrag schloß, wird demnächst veröffentlicht werden.)

Stellite von verschiedener Zusammensetzung²⁾. Innerhalb des Wärmebereiches von 300 bis 500° zeigen sich Unregelmäßigkeiten. Die geringste Ausdehnung hat Stellite mit 10 vH W. Geschmiedete (gehämmerte) Proben haben geringere Ausdehnung als nicht derart behandelte Stücke.

Chrom-Nickel-Stahl³⁾. 2 Proben, eine davon gegläht, die andere gehärtet. Beim langsamen Erwärmen zeigten beide Proben zwischen 825 und 855° ein kritisches Gebiet. Der Umwandlungspunkt beim Abkühlen liegt etwa bei 800°. Bis zur Erreichung des kritischen Gebietes verläuft die Ausdehnungsschaulinie der geglähten Probe durchaus regelmäßig. Bei der gehärteten Probe ergaben sich dagegen zwischen 200 und 400°, innerhalb welcher Grenzen sich die durch das Härten hervorgerufenen Spannungen auslösten, Unregelmäßigkeiten. Über 400° war der Verlauf bei beiden Proben gleichmäßig. Die Ausdehnungsziffern von Cr-Ni-Stahl sind durchweg niedriger als die von gewöhnlichem Eisen und Stahl.

Aluminium. 2 Proben mit 99,74 vH Reingehalt. Die Ausdehnung der beiden durch Gießen gewonnenen Proben innerhalb der Grenzwerte von Zimmerwärme und 600° ist völlig regelmäßig und ergab folgende Gleichung

$$L^1 = L^0 (1 + (21 \cdot 10^{-6} t + 0,0120 t^2) 10^{-6}).$$

Irresberger.

²⁾ Nach „Die Werkzeugmaschine“ 1916, Heft 2 hat für Schneidzwecke verwendetes Stellite folgende Zusammensetzung: 52,03 vH Co, 29,36 vH Cr, 12,71 vH W, 5,35 vH Fe, 0,45 vH Ni, 0,24 vH Mn, 0,09 vH Si und Spuren Mo.

³⁾ Stainless steel (Zusammensetzung nach Dr. M. v. Schwarz) „Legierungen“ S. 58: 89,2 vH Fe, 7 vH Ni, 2,9 vH Mn, 0,4 vH Cr, 0,1 vH Si, Spuren S und P