

Über eine Art Gitterstörung, die einen Kristall plastisch machen könnte¹⁾.

Von M. Polanyi in Manchester, England.

Mit 1 Abbildung. (Eingegangen am 2. Mai 1934.)

Wenn an einer Gleitfläche eine „Gitterversetzung“ vorliegt, in der n Atome des einen Ufers $n + 1$ Atome des anderen Ufers gegenüberstehen, so wird dadurch der Schubwiderstand entlang der Gleitfläche ungefähr auf den n -ten Teil geschwächt.

Man weiß noch immer nicht, wieso das Gleiten in Kristallen zustande kommt. Daher mag die folgende Anregung gestattet sein, die einen Teil der Erklärung enthalten mag.

Die Hauptschwierigkeit ist, wie schon oft betont wurde, die niedrige Spannung, bei der das Gleiten einsetzt. Gegenüber den amorphen Körpern, die beim absoluten Nullpunkt wahrscheinlich mehrere hundert kg/mm² vertragen, ohne plastisch nachzugeben, gleitet ein Cd-Kristall bei den Temperaturen des flüssigen Heliums schon bei einigen hundert g/mm²*). Auch ist die Schubfestigkeit der verschiedenen Netzebenen des Cadmiums außerordentlich verschieden. Alle Netzebenen im Cadmiumgitter sind mindestens zehnmal fester als die am besten gleitende Basisfläche. Die starke Bevorzugung einer Gleitebene findet man auch bei vielen anderen Kristallen, wobei es sich — genau wie bei Cadmium — stets um besonders dicht besetzte Ebenen handelt oder zumindest solche, die eine sehr dicht besetzte Gittergerade enthalten. Das geht so weit, daß W. L. Bragg und V. M. Goldschmidt diese Regel als wichtigen Anhaltspunkt bei ihren Strukturanalysen benutzen konnten.

Das alles ist freilich durchaus plausibel: sowohl, daß der Kristall, in dem ebene Flächen präformiert sind, leichter gleitet als der amorphe Körper, als auch, daß im Kristall jene Flächen am besten rutschen, in denen die

¹⁾ Die im gleichen Heft dieser Zeitschrift erscheinenden Mitteilungen „Zur Kristallplastizität“ von E. Orowan geben mir den Anlaß, diese vor längerer Zeit gemachten Aufzeichnungen zu veröffentlichen. Der von E. Orowan geführte Nachweis, daß die Gleitung von Keimen ausgeht, die spontan im Kristall entstehen, scheint mir ein wichtiger Schritt zur Aufklärung der Plastizität zu sein, welcher eine gewisse Berechtigung des nachfolgenden Gedankenganges erweist. — *) W. Meissner, M. Polanyi u. E. Schmid, ZS. f. Phys. **66**, 477, 1930.

kürzesten Identitätsperioden liegen, denn das sind die Richtungen, entlang derer der Kristall am kürzesten Wege mit sich zur Deckung gebracht werden kann. Nur das *Ausmaß* dieser Abstufungen ist weit größer, als man es erwarten sollte.

Man erkennt dies an der Schätzung der „theoretischen“ Schubfestigkeit, die ich hier wiederhole, weil ich nachher auf gleiche Weise auch das gestörte Gitter betrachten werde. Die Größenordnung der Schubfestigkeit des unversehrten Gitters erhält man, indem man sich parallel zur Gleitrichtung eine so starke elastische Scherung erzeugt denkt, daß die Gitter

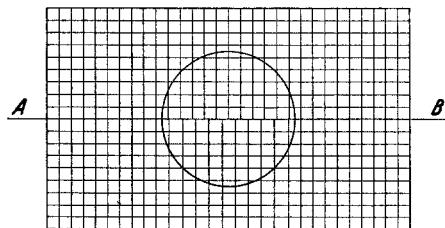


Fig. 1. Schema einer Gitterversetzung.

gerade um eine halbe Periode gegeneinander verschoben sind. Das wäre z. B. bei dem in Fig. 1 angedeuteten einfachen Gitter eine Scherung um etwa 45° . Die Größenordnung der Schubspannung ergibt sich¹⁾ durch Extrapolation nach dem Hookeschen Gesetz zu:

$$0,2 \text{ Schubmodul} \sim 100 \text{ kg/mm}^2 \quad (1)$$

Man sieht, daß eine sehr große Festigkeit herauskommt. Diese ist zwar für verschiedene Kristallrichtungen etwa in der richtigen Weise abgestuft, doch gibt die Gleichung nicht entfernt die tatsächliche Größenordnung der Abstufung wieder.

Will man das hohe Gleitvermögen der Kristalle auf Gitterstörungen zurückführen, so muß demnach die Störung, die man annimmt, eine solche sein, die das geordnete Wesen des Kristalles noch stärker zum Ausdruck bringt, als es die Gleichung (1) vermag. Es muß eine „kristallographische“ Störung sein.

¹⁾ M. Polanyi und E. Schmid, Naturwissenschaft. **17**, 301, 1929.

In diesem Sinne liegen die Hypothesen, wonach der Kristall in seinem Inneren Spalte enthält, die vorzugsweise entlang der dichtesten Netzebenen auftreten. Bei Anlegen einer Schubspannung würde an den Rändern dieser Spalte eine Anhäufung der Spannung, also ein Kerbeffekt einsetzen, wodurch der Widerstand des Gitters überwunden werden könnte. G. J. Taylor¹⁾, der diese Hypothese am ausführlichsten entwickelt hat, leitet aus ihr auch die Verfestigung ab, die bei der Gleitung eintritt: Durch die Schiebung sollen die Enden der Spalten verkrümmen und dadurch soll ihre Kerbwirkung herabgemindert werden.

Man kann sich aber kaum denken, daß ein Metallkristall, der aus der Schmelze wächst, von spaltförmigen Räumen durchsetzt sein kann. Wenn man an die Leichtigkeit denkt, mit der Metallpulver unter dem Schmelzpunkt zusammensintern, so versteht man nicht, wieso die Ufer der angenommenen Spalte am Zusammenwachsen gehindert sein sollen. Auch ist zu bedenken, daß die Spalte von makroskopischer Größe sein müßten, um die Schubfestigkeit auf den tatsächlichen Wert herabzusetzen.

Wirkung von Gitterversetzungen auf die Schubfestigkeit. Viel plausibler als die Annahme von spaltförmigen Löchern scheint mir die Eventualität zu sein, daß die geringe Schubfestigkeit durch das Vorhandensein einer Art Störung verursacht wird, die ich als „Gitterversetzung“ bezeichnen möchte²⁾. Man sieht in Fig. 2 eine solche Störung inmitten eines sonst unversehrten Gitters eingebettet: auf beiden Seiten der mit einem dickeren Strich angedeuteten Linien sind die Atome gegeneinander versetzt, den zehn Atomen auf der einen Seite stehen elf Atome an der anderen Seite des Striches gegenüber. Unterwirft man ein Gitter mit einer solchen Fehlstelle einer Schiebung, welche die Atomzeilen um $\frac{1}{10}$ der Gitterperiode gegeneinander verschiebt (Fig. 1), so wird diese homogene Deformation die

¹⁾ G. J. Taylor, Trans. Faraday Soc. **24**, 121, 1928. — ²⁾ Diese Art Gitterstörung ist zuerst wohl von L. Prandtl (vgl. ZS. f. angew. Math. u. Mech. **8**, 85—106, 1928) zur Erklärung der elastischen Nachwirkung angenommen worden. Vom Verfasser (Ergebn. d. exakt. Naturw. **2**, 224, 1923; ZS. f. Metallk. **17**, 94, 1925; ZS. f. Kristallogr. **61**, 49, 1925) ist dann gezeigt worden, daß solche Versetzungen (damals „innere Trennungsflächen“ genannt) sich notwendig ausbilden müssen an den Gleitflächen von Kristallen die durch Biegegleitung plastisch deformiert wurden. Sie sollten die Verfestigung der latenten Gleitflächen erklären. Die Versetzungen sind auch von U. Dehlinger (Ann. d. Phys. **2**, 749, 1929) (unter dem Namen „Verhakung“) diskutiert und als Ursache der Rekristallisation angenommen worden.

Wirkung haben, daß sie die Konfiguration der Versetzungsstelle unverändert läßt, jedoch *ihre Lage um eine Gitterperiode verschiebt*. Die Verschiebung erfolgt nach der Richtung, in der die Seite mit den elf Atomen (also das überzählige Ufer) geschoben wird. Die Versetzungsstelle ist nach dieser Verschiebung in bezug auf Schubspannungen entlastet; an ihrer Stelle ist also eine plastische Deformation eingetreten.

Wie leicht einzusehen, genügt die Hälfte einer solchen Verschiebung, um die an der Versetzungsstelle ihrer unmittelbaren Nachbarschaft beteiligten Atome in eine indifferenten Mittellage zu bringen, aus der sie unter Wirkung der angesetzten Schubkraft freiwillig in die verschobene Endlage übergehen.

Demnach beträgt die Schubfestigkeit des Gitters nur den n -ten Teil des unversehrten Gitters, wenn n die Zahl der Perioden ist, welche von der Versetzungsstelle umfaßt werden. Zur Erklärung sehr weicher Metallkristalle müßte man die Anwesenheit von Versetzungsstellen mit etwa 1000 Atomen annehmen.

Es ist wichtig, daß die plastische Deformation, die durch die Verschiebung einer Versetzungsstelle bedingt ist, ihre Grenze erreicht, wenn die Versetzungsstelle an den Rand des Kristalles gelangt. Hat die Versetzungsstelle den ganzen Kristall von einem Rande bis zum anderen durchwandert, so ist damit eine Gleitung um eine Gitterperiode vollzogen und die Versetzungsstelle selbst ist dann ausgeheilt.

Möglichkeit der Bildung und Nachbildung von Versetzungen. Dieser Mechanismus hat somit eine offenkundige Schwäche: er führt nämlich zu einer streng *begrenzten* Dehnbarkeit. Man könnte versucht sein, darauf eine Erklärung der Verfestigung zu gründen, doch spricht dagegen, daß man bisher stets die Beobachtung gemacht hat, daß das Gitter bei der Verfestigung unvollkommener wird und niemals, daß es besser wird. Man denke besonders an die sehr empfindlichen optischen Messungen. Man wird also die Verfestigung eher wie bisher auf Gitterstörungen zurückführen.

Die Energie zur Bildung und Nachbildung der Gitterversetzungen könnte vielleicht aus thermischen Schwankungen oder aus der Nullpunktsenergie stammen. Als thermische Energiequelle käme aber jedenfalls nur der äußerst langwellige Teil des elastischen Spektrums in Frage, da nur auf die Weise die Persistenz der Plastizität bei tiefsten Temperaturen erklärbar wäre.

Die Versetzungen müßten sich vorzugsweise *an der Oberfläche* der Kristalle bilden, da ihre Entstehung dort durch den freien Spielraum, den die Kristalloberfläche gewährt, energetisch stark bevorzugt ist. Man erkennt dies schon daran, daß im Inneren eines unversehrten Gitters immer nur zwei Versetzungsstellen paarweise auftreten können (siehe Fig. 2 in der III. Abhandlung von E. Orowan), während dies am Rande der Kristalle natürlich nicht nötig ist. Die Auslösung der Gleitung müßte somit stets von der Kristalloberfläche ausgehen, womit ein Anhaltspunkt für den starken Einfluß gefunden wäre, den die *Bewässerung von Steinsalz* auf dessen Plastizität ausübt.
