

Der Körnungsgrad und die physikalisch-technischen Eigenschaften der Metalle.

Von J. Czochralski in Berlin-Karlshorst.

(Hierzu Tafel 8.)

Die große Bedeutung, die der Korngröße für viele Zweige der Industrie und Technik zukommt, ist durch erfolgreiche Forschungen auf kolloidchemischem Gebiete zur Genügeargetan worden. Auch in der Metallographie fehlt es nicht an Untersuchungen, die auf den Körnungsgrad Bezug nehmen, wenn es auch an systematischen Beiträgen zurzeit noch gänzlich mangelt.

Die Korngröße spielt in der Technologie der Metalle insofern eine wichtige Rolle, als sie die Eigenschaften vieler metallischer Stoffe in hohem Maße zu beeinflussen vermag. Besonders für Arbeitsgut von geringer Dicke, wie Spindrähne, Druck- und Gravierbleche wird sie daher schon von manchem Technologen als Wertmesser benutzt. Die allgemeinen Gesichtspunkte, die die Abhängigkeit der Eigenschaften von der Korngröße sowie die Vorgänge bei ihrer Veränderung betreffen, sollen hier kurz zusammengefaßt werden.

A. Korngröße und Eigenschaften.

1. In ihrem grundsätzlichen Verlauf ist die Abhängigkeit der Festigkeits- und Dehnungseigenschaften der natürlich kristallisierten Metalle (ungereckten Gußmetalle) von der mittleren Korngröße (φ_m) in der Schaulinie $y-z$ (s. Abb. 1) wiedergegeben. Die Festigkeit erreicht im Punkte z ihren Höchstwert, zugleich aber auch die Dehnung ihren Niedrigstwert; und umgekehrt hat im Punkte y die Dehnung ihren Höchstwert und die Festigkeit ihren Niedrigstwert.

Der Einfluß der mittleren Korngröße (φ_m) auf die Eigenschaften ist unter der Annahme von verfestigten Grenzschichten zwischen den einzelnen Kristallkörnern leicht verständlich, einer Annahme, die durch zahlreiche metallographische Beobachtungen hinreichend gestützt erscheint. Bei abnehmender Korngröße wächst der prozentuale Anteil der verfestigten Schichten für die Querschnittseinheit und erfüllt einen Flächenanteil des Querschnittes, den man quantitativ nicht vernachlässigen darf. Uebereinstimmend verändert sich auch die Festigkeit und Dehnung mit dem prozentualen Querschnittsanteil der verfestigten Grenzschichten.

2. Die wiedergegebene Schaulinie ist nur unter der Voraussetzung gleichförmigen mechanischen Verhaltens des Materials streng gültig. Bei den stark verfestigungsfähigen Metallen pflegt diese Voraussetzung infolge ihrer meist geringen Korngröße in der Regel auch zuzutreffen; dagegen wird sie bei den grobkörnigeren Metallen, wie Zinn und Zink, nur unvollkommen erfüllt; hier ist ungleichförmiges mechanisches Verhalten die Regel. Dies rührt be-

kanntlich daher, daß nicht nur die zahlenmäßig bestimmbare mittlere Korngröße (φ_m), sondern auch die relative Korngröße oder die „Körnigkeit“ des Arbeitsgutes, also das Verhältnis der mittleren Korngröße zum Volumen des vorliegenden Arbeitsstückes ($\frac{\varphi_m}{v}$) sich auf das mechanisch gleichförmige Verhalten des Metalles als einflußreich erweist. Am größten sind diese Einflüsse innerhalb eines Kristallkornes selbst, da ja bekanntlich die Festigkeits- und Dehnungswerte in den verschiedenen Achsenrichtungen der Kristalle in weiten Grenzen schwanken. Aber auch die Art der mechanischen Beanspruchung sowie

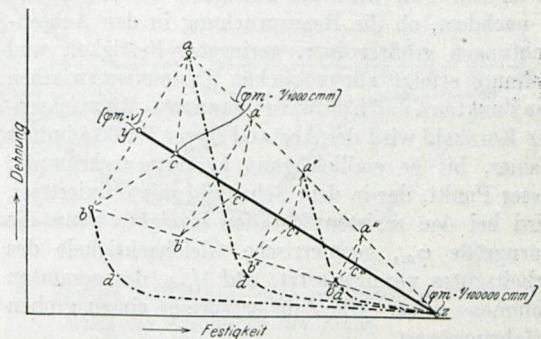


Abbildung 1. Abhängigkeit der Festigkeits- und Dehnungseigenschaften ungerückter Gußmetalle von der absoluten Korngröße (φ_m) sowie von der „Körnigkeit“ $\left(\frac{\varphi_m}{v}\right)$.

die Gestalt der Stücke vermag einen wesentlichen Einfluß auf das Verhalten des Metalles auszuüben.

In einer von W. Voigt eingeführten Definition¹⁾ werden die Bedingungen, die man an die elastische Gleichförmigkeit des Metalles stellt, wie folgt zusammengefaßt: Die technischen Metalle gehören zu der Klasse von festen Körpern, die man am besten als quasiisotrop bezeichnen kann. Die Orientierung der Kristallkörner ist in den quasiisotropen Körpern nach allen Richtungen gleichmäßig verteilt, so daß jeder Teil des Körpers, der gegen die einzelnen Kristallkörner verhältnismäßig groß ist, sich wenigstens in elastischer Hinsicht als isotrop erweist.

Aber nicht nur in den elastischen, sondern auch in den plastischen Gebieten ist die Quasiisotropie ohne Frage als Voraussetzung gleichförmigen mechanischen Verhaltens anzusehen; daher muß auch hier die Summenwirkung der einzelnen anisotropen

¹⁾ Annalen der Physik 1889, S. 573, sowie v. Kármán: Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1911, 21. Okt., S. 1756.

Kristalle tunlichst der eines isotropen Stoffes in bezug auf Gleichförmigkeit ähnlich sein, wenn Störungen durch Anisotropie vermieden werden sollen. Diese Forderung ist sogar technologisch als die wichtigere zu bezeichnen.

Je mehr Körner in einer Linie des Querschnittes liegen, um so weniger treten die mechanischen Widerstandsunterschiede des einzelnen Kornes hervor, bis sie schließlich in einem gewissen Punkte sich im nicht mehr unmittelbar beobachtbaren Gebiet verlieren. Verringert man dagegen die Dicke des Arbeitsgutes, ohne zu recken (beispielsweise durch Schneiden u. dgl.), unter ein bestimmtes unteres Maß hinaus, so erreicht man für jede Korngröße den Grenzfall, wo infolge mangelnder Quasiisotropie und der damit verbundenen mechanischen Widerstandsunterschiede die Festigkeits- und Dehnungseigenschaften der Metalle schädlich beeinflusst werden.

Den Grenzfall, daß der Körper nur aus einem einzigen Kristall bestehe ($\varphi_m = v$), bezeichne 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 können¹⁾. Mit wachsender Kornzahl wird der Abstand dieser Punkte immer kleiner, bis er endlich ganz zusammenschrumpft; dieser Punkt, der in dem Schaubild mit c fixiert sei, wird bei den meisten Metallen erreicht, wenn die Korngröße φ_m , geometrische Gleichachsigkeit des Arbeitsgutes vorausgesetzt, auf $1/1000$ des gesamten Volumens sinkt. Die Zahl entspricht einem groben Erfahrungswert.

Verbindet man die Höchst- und Niedrigstpunkte der Festigkeit und Dehnung für $\varphi_m = v$, so schneidet die Verbindungslinie die Kurve im rechten Winkel, und man erhält unter Einschluß des Punktes c eine Dreiecksfläche a b c, die das Gebiet mangelnder Quasiisotropie begrenzt²⁾. Jeder Korngröße entspricht eine ähnliche Dreiecksfläche der mangelnden Quasiisotropie (Flächen: a' b' c', a'' b'' c'', a''' b''' c''', in Abb. 1), wenn die jeweilige Körnigkeit unter die Grenze $\frac{\varphi_m}{v} = 1/1000$ sinkt. Die Größe dieser Flächen verringert sich mit abnehmender Korngröße (φ_m), da mit dem wachsenden Mengenanteil der verlagerten Grenzfläche die mechanischen Widerstandsunterschiede immer mehr zurücktreten.

Verbindet man ferner die Endpunkte a a' a'' a''' sowie die Endpunkte b b' b'' b''' unterein-

ander¹⁾, so erhält man eine langgestreckte Dreiecksfläche, die alle möglichen Gebiete mangelnder Quasiisotropie umfaßt.

3. Wenn die Quasiisotropie auch die Voraussetzungen hinsichtlich der mechanischen Gleichförmigkeit völlig erfüllt, so erheischen die wohlbegründeten Forderungen, die von der Technik an die Ebenheit der Oberfläche des Reckgutes geknüpft werden, dennoch eine obere Begrenzung der mittleren Korngröße (φ_m), die äußerst scharf gezogen ist und in der Regel einige Tausendstel Kubikmillimeter nicht übersteigen darf. Schon oberhalb $10/1000$ mm beginnen sich Erscheinungen bemerkbar zu machen, die man allgemein unter der Bezeichnung krispelig, knittrig, narbig usw. zusammenfaßt (vgl. Abb. 2 und 3, Tafel 8). Und dies ist nicht nur eine Forderung rein okularer Art, sondern gleichzeitig auch ein Maß der steigenden mechanischen Ungleichförmigkeit des Materials, die der kristalline Charakter in zunehmendem Maße mit sich bringt.

4. Die Einflüsse der mangelnden Quasiisotropie können durch gelegentliche kristallographisch ähnliche Lagerung des Kornes noch verstärkt werden. An den Erstarrungswänden von Gußmetallen kann diese Gefügeanordnung, die in der Mineralogie unter dem Namen „Transkristallisation“ bekannt ist, häufig beobachtet werden. Ihren Einfluß veranschaulichen die Abb. 4 und 5. Während der in Abb. 4 wiedergegebene Zerreißstab seinen kreisrunden Querschnitt beibehalten hat, wurde der in Abb. 5 wiedergegebene Stabquerschnitt infolge seiner transkristallinen Gefügeanordnung unrund; die Durchmesserverjüngung war längs der Nadelachsen $5/3$ mal so groß wie quer zu den Nadelachsen.

5. Bei wachsender Körnigkeit wächst, wie wir gesehen haben, auch die Festigkeit. Sie erreicht theoretisch eine Grenze, bei der infolge äußerster Körnigkeit eine ähnliche Verfestigung des ganzen Querschnittes auftreten würde, wie durch äußerst weitgetriebenes Kaltrecken, wenn dies auch in bezug auf die übrigen Eigenschaften, insbesondere auf Dehnung und Elastizität, nicht der Fall ist. Die Transversalkurven d in Abb. 1 geben den Verlauf der Verfestigung durch Kaltrecken, wie sie, abhängig von der Lage des Ausgangspunktes, nach gewissen für das Material charakteristischen Gesetzen zum Punkte z hin fortschreitet. Im Gegensatz zu dieser Verfestigung durch Deformation, die u. a. die Dehnungsziffern stark herabsetzt, können durch die Steigerung der Körnigkeit neben hoher Festigkeit auch hohe Dehnungsziffern erreicht werden. Molekularmechanisch gesprochen handelt es sich hierbei um den Grenzfall der Quasiisotropie (d. i. der fast molekularen oder ultraquasiisotropen Kornverfeinerung) einerseits und den Grenzfall der gewaltsamen Gleichlagerung der

¹⁾ Die Darstellung setzt der Einfachheit halber voraus, daß die Festigkeit und Dehnung in veränderlichem Verhältnis stehe, und daß sowohl ihre Zunahme als auch ihre Abnahme in gleichem Sinne erfolge. In Wirklichkeit wird aber offenbar weder das eine noch das andere zutreffen, daher werden ihre Zahlenwerte in der graphischen Darstellung sehr verschiedenartige Flächen- bzw. Raumgebilde ergeben.

²⁾ Das in der Z. d. V. d. I. 1913, 14. Juni, S. 934, wiedergegebene Schaubild, das den Einfluß der Dispersität auf Festigkeit und Dehnung darstellt, wird dadurch auf einfache Weise erklärt.

¹⁾ Sowohl diese Verbindungslinien als auch die Linien ca, cb, c'a', c'b' usw. werden zur Kurve y—z hin offenbar gekrümmt verlaufen.

kleinsten Gleitteilchen oder der erzwungenen Homöotropie anderseits¹⁾.

B. Verfahren zur Veränderung des Grades der Körnung.

1. Die Größe der einzelnen Kristallkörner des erstarrten Metalles ist bekanntlich von der Erstarrungstemperatur, der Kristallisationsgeschwindigkeit und der Anzahl vorhandener Kristallisationszentren abhängig. Kristallisationsgeschwindigkeit und Kernzahl nehmen beim Erstarren mit sinkender Temperatur erst rasch zu und dann ebenso schnell ab. Wie bei Schmelzflußkristallen, Laugenkristallen und überhaupt Kristallen des Mineralreichs liegen Gründe zur Annahme einer konstanten maximalen Kristallgröße auch bei den Metallkristallen nicht vor, was mit der Erfahrung durchaus übereinstimmt.

2. Man glaubte bisher, die Fähigkeit der Kristalle zu wachsen bleibe auch noch nach dem völligen Erstarren des Metalles erhalten; die Wachstumsgeschwindigkeit sei ferner um so größer, je höher die Glüh-temperatur ist. Dies trifft auch bei den gereckten (dekristallisierten) Metallen bis zu einem bestimmten Grade zu; bei Kristallen, bei denen das molekulare Lagegleichgewicht nicht gestört ist (beispielsweise ungereckten Gußkristallen), ist dies indessen keineswegs der Fall.

3. Bis in die jüngste Zeit hinein schenkte man der Umgestaltung des Gefüges bei der Rekristallisation nur geringe Beachtung. Ueber die Dispersitätsvorgänge und über ihre zahlenmäßigen Beziehungen fehlten bis vor kurzem jegliche Angaben²⁾. Abb. 6 veranschaulicht in räumlicher Darstellung, welche Aenderung die Größe der Körner verlagelter Metalle durch das Ausglühen erleidet. Auf der mit v bezeichneten Achse ist der Grad der Verlagerung (= Höhenabnahme beim Stauchen) abgetragen; Achse t gibt die Temperatur an, bei der die Erhitzung erfolgte. Als Ordinaten sind die Durchmesser der rekristallisierten Kristallkörner in Millimetern gewählt. Unterhalb der „unteren“ Rekristallisationstemperatur, die je nach dem Grade der vorangegangenen Verlagerung verschieden hoch liegen kann, ist es nicht möglich, eine Aenderung der Korngröße praktisch zu erreichen. Wird die „untere Rekristallisationstemperatur“ jedoch überschritten, so nimmt das Korn die der Temperatur- und Verlagerungskurve zugeordnete mittlere Größe an, bzw. nähert sich ziemlich rasch diesem maximalen Grenzwert. Darauf folgendes Weitererwärmen bei der zuletzt angewandten Höchsttemperatur vermag keine nennenswerte Aenderung der Korngröße mehr hervorzu-

bringen; erst durch weitere Temperatursteigerung ist es möglich, eine Vergrößerung des Kornes herbeizuführen. Die Steigerung der Korngröße findet ihre natürliche Begrenzung nach der Auslösung sämtlicher Reckspannungen des Arbeitsgutes. Bei sehr schwacher Reckung (innerhalb des elastischen Gebietes) bleibt die Rekristallisation gänzlich aus. Dann kann aber auch, wie bei Gußmetallen, eine Aenderung der Korngröße nicht herbeigeführt werden. Aus den aus Abb. 6 abgeleiteten Ergebnissen und dem sonstigen Verhalten der verlagerten Metalle bei der Rekristallisation folgt als allgemein gültige Regel: die Korngröße eines verlagerten Metalles nimmt mit

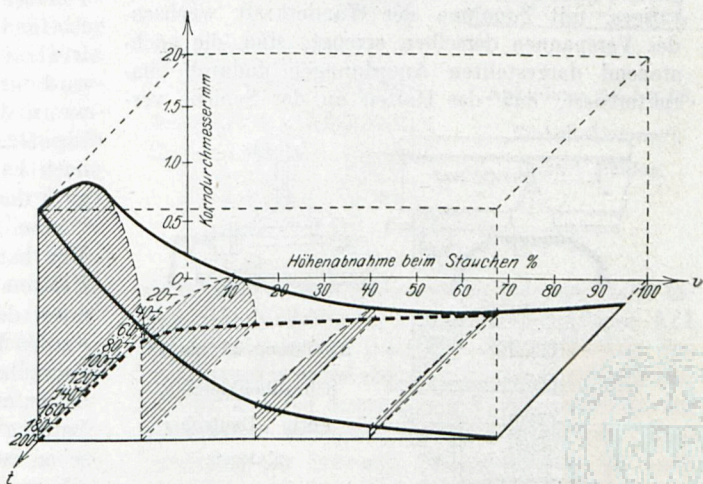


Abbildung 6. Einfluß des Glühens nach stattgehabter Verlagerung auf die Korngröße des Zinns.

steigender Temperatur zu, und zwar um so mehr, je geringer die Zahl der Rekristallisationszentren, d. i. je weniger es verlagert ist. Durch geeignete Wahl von Glüh-temperatur und Verlagerungsgrad ist man an Hand eines vorhandenen Schaubildes in der Lage, einem Metall innerhalb gewisser Grenzen jede beliebige Korngröße zu verleihen, es also in einen bestimmten mechanisch-physikalischen Zustand zu versetzen. Umgekehrt kann die Korngröße nicht nur als Kriterium der Glüh-temperatur, sondern auch des Grades der Verlagerung benutzt werden.

4. Der Einfluß der Glühdauer auf die mittlere Korngröße ist nur von geringer Bedeutung, da die Rekristallisationsgeschwindigkeit schon etwa die Größenordnung der „Kristallisationsgeschwindigkeit“ erreicht; wenn daher auch Ueberschreitungen der Glüh-temperatur um wenige Grade auf die Korngröße einen stärkeren Einfluß ausüben als eine Glühdauer von mehreren Stunden bei gleichbleibender Temperatur, so ist doch ein anfänglicher Einfluß der Zeitdauer des Glühens auf die Korngröße nicht verkennbar. Inwieweit durch dieses Verhalten der Charakter der Dispersitätskurven beeinflusst wird, muß noch durch weitere Versuche ermittelt werden.

¹⁾ Siehe Internationale Zeitschrift für Metallographie 1916, S. 1/45.

²⁾ Siehe Internationale Zeitschrift für Metallographie 1916, S. 29.