

6. Änderung des Gefüges durch Kaltrecken und darauffolgendes Glühen¹⁾.

a) Allgemeines über bleibende Formveränderung von Kristallen.

264. Die Metalle und Legierungen sind aus einem Haufwerk von Kristallkörnern (Kristalle eines und desselben Stoffes oder verschiedener Stoffe) aufgebaut. Es fragt sich nun, wie sich solche Haufwerke bei Formänderung unter dem Einfluß äußerer Kräfte verhalten. Solange diese Formänderungen elastischer Art sind, wird auch die Formänderung der einzelnen das Haufwerk bildenden Kristalle elastischer Art sein müssen. Nach Aufhören der äußeren Kräfte werden das Haufwerk und die einzelnen dasselbe bildenden Kristalle bestrebt sein, wieder ihre ursprüngliche Gestalt und Lage anzunehmen.

Werden die Metalle und Legierungen bleibenden Formveränderungen bei gewöhnlichen Wärmegraden (Kaltrecken) unterworfen, so erstrecken sich diese auch auf die einzelnen Kristallkörner. Es ist sonach wichtig, die Gesetze der bleibenden Formveränderung von Kristallen kennen zu lernen, soweit sie bis jetzt erforscht worden sind.

Zwischen den sogenannten spröden kristallisierten Körpern, wie Kalkspat, Steinsalz, und den plastischen Kristallen des Goldes, Kupfers usw. scheint ein grundsätzlicher Unterschied kaum vorhanden zu sein. Man kann z. B. einen Kochsalzkristall, wenn er von vier Seiten vollständig umschlossen ist, durch hohen Druck in eine Art Fließen versetzen, ohne daß der Zusammenhang aufgegeben wird. Freilich erhält man dann keinen einheitlichen Kristall mehr, sondern ein innig zusammenhängendes Haufwerk kleinerer Kristallteilchen. In Gesteinschichten findet man vielfach Kristalle von Mineralien, z. B. Zyanit (Mügge, *L*₃24), eingebettet, die deutliche Krümmung aufweisen, ohne daß dabei Zerbrechen des Kristalls eingetreten wäre. Aber auch, wenn der allseitige Druck, unter dem die eben beschriebenen Formänderungen vor sich gehen, wegfällt, kann man an den als spröde bekannten Kristallen immerhin noch überraschende Formänderungen bewerkstelligen, ohne daß der Zusammenhang aufgegeben wird, ja ohne daß Spuren von Trennungsf lächen erkennbar sind. Drückt man (nach Reusch, *L*₃25 und Baumhauer) gegen die Ecken *EC* eines Kalkspat-Spaltungsrhomboeders, Abb. 212, oder preßt man in die durch einen Pfeil bezeichnete Kante senkrecht zur Kante eine Messerschneide ein, so geht eine Formveränderung vor sich, die Abb. 213 wiedergibt. Die Abbildung ist von einem mir freundlichst von dem verstorbenen Prof. Müller (Charlottenburg) überlassenen Schaustück entnommen. Man legt sich den Vorgang am einfachsten in folgender Weise zurecht: Durch das Rhomboeder, Abb. 212, wird eine Schnittebene durch die Punkte *ACGE* gelegt. Die Schnittfläche ist in Abb. 214 durch die Fläche *ACGE* dargestellt. Man denke sich

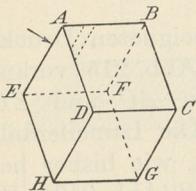
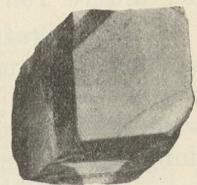


Abb. 212.

Abb. 213.
Nat. Größe.

diese Fläche durch die Linien *JL* und *KM* in drei Teile *AJLE* = III, *JKML* = II, und *KCGM* = I zerlegt. Anstatt durch den starren Flächenteil II soll jetzt die Verbindung zwischen I und III so bewirkt werden, daß die einzelnen Punkte der Linie *MK*, also z. B. die Punkte *M*, *O*, *K* . . . mit den entsprechenden Punkten der Linie *LJ*, also *L*, *P*, *J* . . . durch je einen starren Draht

¹⁾ Darstellung nach E. Heyn, *L*₃ 23.

verbunden sind, wobei die Befestigung der Drähte mit den Teilen I und II in den Punkten $M, O, K \dots, L, P, J \dots$ gelenkartig sein soll. Übt man nun in der Richtung der Pfeile bei E und C einen Druck aus, so geht die Fläche $AJKCGMLE$ über in die Fläche $A'J'KCGML'E'$. Statt der Drähte $ML, OP, KJ \dots$ hat man sich nun im Kalkspatrhomboeder Molekülreihen vorzustellen, deren gegenseitige Verkettung eine ebensolche Beweglichkeit zulassen muß wie das durch die Gelenkdrähte verbundene System I und II. Infolge des Druckes bei E und C wird die Molekülreihe ML um M gedreht und gelangt nach einer Drehung um den Winkel α in die Lage ML' . Die Molekülreihen OP und KJ gelangen nach Drehung um den gleichen Winkel α in die entsprechenden Lagen OP' und KJ' . Winkel α ist hierbei kein beliebiger, sondern, wie kristallographische Messungen zeigen, durch die Beziehung Winkel $AEM =$ Winkel $L'MK$ bestimmt, so daß die Lamelle $L'J'KM$ nach der Deformation dem Rhomboid $\varepsilon\alpha\gamma\delta$

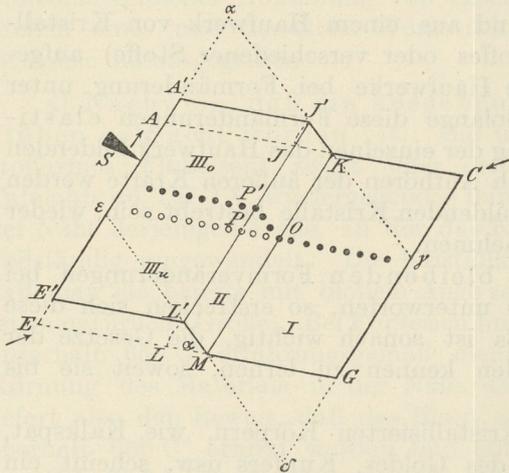


Abb. 214.

angehört, das sich nach mineralogischer Bezeichnungsweise zu dem Rhomboid $EAAC$ in Zwillingstellung befindet. Die Formänderung des Kalkspates ist somit durch einen Übergang der Lamelle $LJKM$ in die Zwillingstellung $L'J'KM$ ermöglicht worden; diese Art der Formänderung soll als Formänderung unter Zwillingbildung bezeichnet werden. Bei der Drehung der Molekülreihe ML usw. tritt diese aus ihrer ursprünglichen stabilen Gleichgewichtslage ML heraus und durchwandert labile Gleichgewichtstellungen, um dann in ein neues stabiles Gleichgewicht in der Stellung ML' zu gelangen.

Gleiches wird erreicht, wenigstens für den oberen Teil III_o , wenn mit einer Messerschneide S senkrecht zur Kante AE gedrückt wird. Durch die Keilwirkung der Schneide wird sowohl in der Richtung SA wie in der Richtung SE ein Druck ausgeübt. Wegen der geringeren zu verschiebenden Masse in der Richtung SA wird der obere Teil III_o aus Lage $AJKC$ in die Lage $A'J'KC$ gebracht, während der untere Teil III_u in seiner Lage verharret.

265. Statt einer einzigen Zwillinglamelle können unter geeigneten Druckverhältnissen natürlich auch mehrere Lamellen entstehen, wie Abb. 215 veranschaulicht, so daß statt der ursprünglichen Rhomboederflächen AC und EG wiederholt abgestufte neue Flächen $A'C'$ und $E'G'$ entstehen. Die Lamellenbildung im Kalkspat erfolgt nun nicht allein parallel der Kante EA , wie bisher besprochen, sondern auch noch parallel den beiden Kanten AD und AB (Abb. 212). Es leuchtet ein, daß durch diese Art der Deformation der Kristall sehr gut in den Stand gesetzt ist, sich der Form des ihm während der Formänderung verfügbaren Raumes innig anzuschmiegen. Die Lamellen können zu dünnen Streifen zusammenschrumpfen wie bei 1, 2, 3 in Abb. 215. Die Formänderung wird dann durch diese „Zwillingstreifung“ kenntlich.

Die Formänderung des Kalkspatkristalles unter einfacher oder wiederholter Zwillingbildung ist an der Oberfläche des Kristalles durch Abstufung der Flächen oder Streifung gekennzeichnet, sie muß aber auch wegen der stattgehabten Drehung der Moleküle sowohl optisch als auch mit Hilfe der Ätzfiguren im Schliiff bemerklich sein. Innerhalb der Zwillinglamelle muß das Ätzgefüge ein anderes sein als

außerhalb derselben. Wenn in den Teilen I und III, s. Abb. 214, die Ätzfiguren eine bestimmte Lage zu OP einnehmen, müssen sie in II nach der Deformation die gleiche Lage in bezug auf OP' zeigen. Sind die Lamellen sehr dünn, so erscheinen auf dem geätzten Schliiff „Ätzzfurchen“, gebildet durch zusammenhängende Reihen der Ätzfiguren, deren Lage eine andere ist als diejenige der Ätzfiguren in der Umgebung. Solche Ätzzfurchen habe ich an Spaltungsstücken eines verbrannten Eisens deutlich ausgeprägt gefunden (E. Heyn, *L₃ 13*, Fig. 5, Tafel III). Die Furchen gehen teils diagonal zu den Würfelflächen, teils bilden sie mit der Diagonale einen Winkel. Sie sind jedenfalls identisch mit den Neumannschen Linien, die von Neumann 1850 in würfeligem Meteoreisen entdeckt wurden (vgl. Emil Cohen, *L₃ 26*, und Osmond und Cartaud, *L₃ 14*). Mügge (*L₃ 27*) hat durch Druck auf ähnlichen Spaltungsstücken

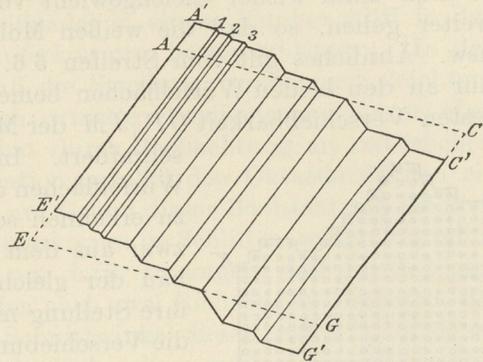


Abb. 215.

von Eisen derartige Zwillinglamellen künstlich hervorgebracht und mittels kristallographischer Messungen genau verfolgt. Nach seinen Untersuchungen kann es als erwiesen gelten, daß die Formänderung unter Zwillingbildung in den Ferritkörnern des Eisens eintreten kann. Eine Erscheinung, wie sie sich auf geätzten Längsschiffen zerrissener Eisenstäbe häufig beobachten läßt und in Tafelabb. 49, Taf. X, in 1650facher Vergrößerung abgebildet ist, dürfte wohl auch auf Formveränderung des Eisenkornes unter Zwillingbildung zurückzuführen sein. Schräg durch das Korn a setzt sich von links oben nach rechts unten ein gestreiftes Band a' mit unvollkommen ausgebildeten Ätzfiguren. Sie sind anders gelagert als die quadratischen Ätzfiguren außerhalb des Bandes bei a . Die Streifung in dem Bande liegt nahezu parallel zur Diagonale dieser quadratischen Ätzfiguren, was mit den Beobachtungen Mügges bezüglich der Lage der Zwillingstreifung an Eisen ungefähr übereinstimmen würde. Auch in Stauchproben von Flußeisen finden sich unzählige Schlieren von der Art der in Tafelabb. 50, Taf. X, ($V=900$) mit s bezeichneten. Sie dürften ebenfalls in das gleiche Gebiet zu rechnen und als Folge von Formänderung der Eisenkristalle unter Bildung von Zwillinglamellen zu betrachten sein.

266. Bei der Formänderung durch Zwillingbildung muß man zum Zwecke der Erklärung des Vorganges eine Drehung der Moleküle zu Hilfe nehmen. Es lassen sich aber auch noch andere Formveränderungen kristallisierter Körper ohne Drehung denken, und es sind solche auch tatsächlich von Mügge (*L₃ 28, 24, 27*) beobachtet worden. Wir denken uns z. B. durch einen Würfel, Abb. 216, parallel einer Würfelfläche $ABCD$ einen

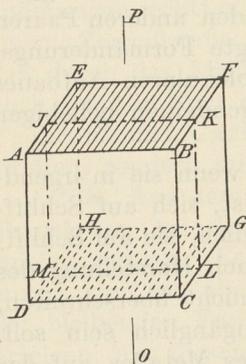


Abb. 216.

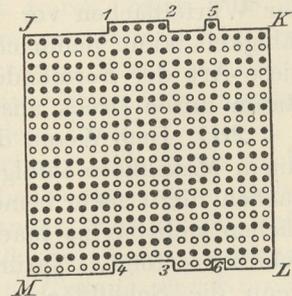


Abb. 217.

Schnitt $JKLM$ gelegt. In dem so erhaltenen Quadrat, s. Abb. 217, denken wir uns parallel der senkrechten Quadratseite JM eine leichtere Verschiebbarkeit der Moleküle als in anderen Richtungen. Einzelne Molekülreihen sind in Abb. 217 schematisch durch schwarze und helle Kreisflächen dargestellt. Längs JK hat

ursprünglich im Quadrat eine schwarze wagerechte Reihe von Molekülen, unmittelbar darunter eine weiße Reihe gelegen usw. Es ist möglich, einen Streifen 1 2 3 4 um ein Vielfaches des gegenseitigen Abstandes zweier Molekülreihen zu verschieben, so daß jetzt weiße Moleküle in die nächste Reihe der schwarzen Moleküle gelangen; es muß dann wieder Gleichgewicht vorhanden sein. Die Verschiebung kann noch weiter gehen, so daß die weißen Moleküle wieder in eine weiße Reihe gelangen usw. Ähnliches gilt vom Streifen 5 6. Die Verschiebung der Streifen macht sich nur an den beiden Würfelflächen bemerkbar, die senkrecht zur Richtung der leichtesten Verschiebbarkeit $OP \parallel JM$ der Moleküle liegen. Die Flächen sind in Abb. 216 schraffiert. Im Innern dagegen sowie auf den übrigen Würfelflächen darf am Kristall keine Spur der Verschiebung zu erkennen sein, weder optisch noch am Ätzgefüge, und zwar aus dem einfachen Grunde, weil der molekulare Aufbau der gleiche geblieben ist und nur einzelne Moleküle ihre Stellung mit anderen Molekülen vertauscht haben. Ist die Verschiebung der Lamelle sehr gering, so macht sie sich auf den beiden Würfelflächen, die senkrecht zur Verschiebungsrichtung liegen, nur durch zwei Streifen bemerkbar; bei sehr geringer Dicke der Lamelle können die beiden Streifen zu einem einzigen zusammenschrumpfen. Bewegen sich nun infolge äußerer Beanspruchung statt eines Streifens mehrere in der besprochenen Weise, so kann das Quadrat alle möglichen Formen annehmen, wie Abb. 218 zeigt, und

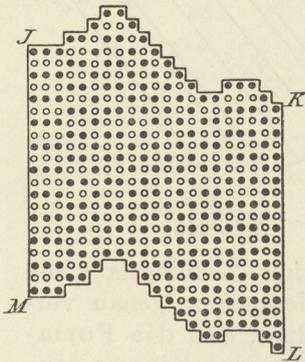


Abb. 218.

doch ist die Formänderung wiederum nur an den beiden zur Verschiebungsrichtung senkrechten, in Abb. 216 schraffierten Würfelflächen bemerkbar, die in beliebige durch Abstufung gebildete Flächen JK und ML umgewandelt werden können. Vielfach ist die Abstufung so fein, daß sie nur in Form von äußerst zarter, durch die Schraffur in Abb. 216 angedeuteter Streifung bemerkbar ist. Im Innern des Kristalles aber sowie auf seinen übrigen Begrenzungsflächen kann weder unter Zuhilfenahme optischer Hilfsmittel noch der Ätzfiguren etwas von der Formänderung bemerkt werden. Mügge hat diese Art der Formänderung mit dem Namen Translation belegt, die Streifung führt daher die Bezeichnung Translationsstreifung.

Wenn in einem Würfel die Translation einmal parallel zu einem Paar Würfelflächen erfolgen kann, so ist es wegen der kristallographischen Gleichwertigkeit der Würfelflächen wahrscheinlich, daß sie auch parallel den beiden anderen Paaren der Würfelflächen vor sich gehen kann. Die dadurch bedingte Formänderungsfähigkeit kann demnach einen Kristall, der infolge seines molekularen Aufbaues diese Art der Formänderung zuläßt, in den Stand setzen, irgendeinen beliebigen Raum unter Druck auszufüllen.

267. Dem Wesen der Translation entsprechend, kann sie, wenn sie in irgendeinem Metallkorn infolge äußerer Beanspruchung eingetreten ist, sich auf Schliefflächen nicht mehr bemerkbar machen. Wohl aber ist es möglich, sie auf Schliefflächen sichtbar zu machen, wenn die Formänderung erst nach Herstellung des Schliffes erfolgt. Natürlich darf sie dabei ein gewisses Maß nicht überschreiten, wenn die Schlieffläche noch mikroskopischer Beobachtung zugänglich sein soll. Es kann dann die Translationsstreifung in den Körnern des Metalles auf der Schlieffläche sichtbar gemacht werden, ein Verfahren, das zuerst von Ewing und Rosenhain (*L*₃ 29) angewendet worden ist, um die Grenzen der einzelnen Körner gegeneinander festzustellen. Ähnlich wie die Art der Ätzfiguren, so wechselt auch die Richtung der Translationsstreifen von Korn zu Korn. Besonders leicht gelingt es, diese Streifung in Kupferschliffen hervorzubringen, indem man den Schliff

parallel zur Schlißfläche in einem Schraubstock mäßig drückt. Tafelabb. 51, Taf. X, zeigt eine solche Translationsstreifung in 365facher Vergrößerung. Die Streifung setzt hierbei über 2 im Korn a eingelagerte Zwillinglamellen a' und a'' hinweg. (Um Mißverständnis zu vermeiden, bemerke ich, daß diese Zwillinglamellen mit der Formänderung nichts zu tun haben, sie waren vor ihr bereits vorhanden). Es gelingt schon durch Einritzen mit einer Reißnadel in einem Kupferschliff in der Nähe des Ritzes die Streifung in den Kupferkörnern hervorzubringen. In der Art der Erscheinung liegt es begründet, daß die Streifung bereits nach leichtem Anätzen verschwindet; man kann sie durch erneute Formänderung dann aber beliebig oft wieder hervorbringen. Mügge hat durch Beobachtung an natürlichen Kupferkristallen festgestellt, daß die Translation parallel den Oktaederflächen erfolgt. Ich möchte darauf hinweisen, daß es auf Grund dieser Beobachtung möglich ist, genau die Lage der Schnittfläche eines Kupferkornes im Schliff zu seinen kristallographischen Achsen zu ermitteln. Man hat nur dafür zu sorgen, daß durch geeigneten Druck auf dem Korn Translationsstreifen nach zwei Richtungen auftreten, die dann Oktaederflächen parallel sind; aus dem Schnittwinkel dieser beiden Richtungen läßt sich die Lage des Schnittes zu den Oktaederflächen bzw. zu dem kristallographischen Achsenkreuz berechnen. Man hat also ein Mittel in der Hand, sich kristallographisch in einem Kupferkorn der Schlißfläche genau zu orientieren, so daß, wenn dieses Verfahren weiter ausgebaut wird, die metallographischen Untersuchungsmethoden den petrographischen wohl kaum mehr an Schärfe nachstehen dürften.

Ob beim Eisen ebenso wie beim Kupfer eine Formveränderung der Körner durch Translation möglich ist, geht aus Mügges Untersuchungen nicht zweifellos hervor. Seine Beobachtungen haben sich nur auf Spaltungsstücke offenbar verbrannten Eisens erstreckt, das sich ja in seinem physikalischen Verhalten, namentlich in seiner Formänderungsfähigkeit, vom normalen Eisen unterscheiden kann. Nach Ewings und Rosenhains Beobachtungen scheint aber doch eine Translation in den Eisenkörnern einzutreten, da sie eine der Translationsstreifung ähnliche Erscheinung auch auf Eisenschliffen hervorrufen konnten. Tafelabb. 52, Taf. XI, zeigt diese Streifung in 900facher Vergrößerung an einem Längsschliff eines ausgeglühten weichen Flußeisendrahtes. Die Streifen sind ähnlich wie in den Abbildungen Ewings und Rosenhains merkwürdig verbogen, was ich mir dadurch erkläre, daß die Translation in den Eisenkörnern erst bei verhältnismäßig hohen Beanspruchungen eintritt und ihr eine anders geartete Formänderung vorausgeht. Dem entspricht, daß nach meinen Versuchen die Schriffe ganz bedeutende Formänderungen erlitten hatten, bevor die Streifung merkbar wurde, und daß auf einem Zerreißstabe Fließfiguren (I, 107) bereits entwickelt waren, ohne daß in den durch das Fließen auf der polierten Oberfläche sichtbar gewordenen Körnern auch nur die Spur einer Streifung zu entdecken gewesen wäre. Nach Osmond, Frémont und Cartaud (L_3 30) sind diese Streifen überhaupt keine Translationsstreifen, sondern mikroskopische Fließfiguren (Lüders Linien) I, 107.

268. Aus dem Gesagten geht hervor, daß sowohl Zwillingbildung als auch Translation bei der Formveränderung der Metalle und Legierungen eine Rolle spielen werden. Es bleibe dahingestellt, ob sie nebeneinander oder einzeln auftreten. Ich bin aber weit davon entfernt, anzunehmen, daß sämtliche Vorgänge der bleibenden Formänderung der Metalle, soweit sie ohne Teilung der Körner erfolgen, mit diesen beiden Vorgängen zu erklären sind. Ich habe früher schon (L_3 23) darauf hingewiesen, daß auch gewöhnliche Biegungen in den Kristallkörnern deformierter Metallmassen auftreten müssen, und habe dies seinerzeit durch Tafelabbildungen belegt. Später zeigten auch Osmond, Frémont und Cartaud (L_3 30) bei Versuchen an größeren einheitlichen Spaltungsstücken des Eisens, daß Fältelungen auftreten.

269. Bei Formänderungen, die zur vollkommenen oder teilweisen Trennung führen, kommt noch die Spaltung parallel bestimmten Kristallflächen in Frage, wie z. B. beim Steinsalz parallel den Würfelflächen. Auch im Eisen ist Spaltbarkeit beobachtbar, wie Tafelabb. 53, Taf. XI, in etwa doppelter Größe zeigt. Sie entspricht einem gespaltenen Stück Eisen, das nach dem Goldschmidtschen Thermitverfahren unter bestimmten Bedingungen hergestellt ist. Das Stück wurde auf *s* eingesehritten und dann gebrochen. Die Spaltflächen auf dem Bruch erinnern fast an Beiglanz. Nach Stead (*L₃ 12*) ist die Spaltbarkeit parallel den Würfelflächen der Kristalle. Derselbe Forscher hat auch festgestellt, daß in Eisensorten, die vorwiegend aus Eisenkörnern bestehen, der Bruch in der Regel nicht den Korngrenzen folgt, sondern in Form von Spaltflächen die Eisenkörner durchsetzt. Das gilt natürlich nur dann, wenn nicht etwa durch Schaumwände von der Erstarrung herrührende Flächen geringsten Widerstandes erzeugt sind, die den Bruch begünstigen, namentlich wenn in den Schaumwänden fremde Stoffe eingelagert sind, wie Gase, oxydische oder sulfidische Verbindungen usw. Ein solcher Fall liegt bei dem in Tafelabb. 33, Taf. VI, dargestellten kohlenstoffarmen Flußeisenblöckchen vor.

Bekannt ist auch die Spaltbarkeit bei Zink, Antimon, Wismut usw.

b) Allgemeines über bleibende Formveränderungen in amorphen Stoffen und in Haufwerken von Kristallkörnern.

270. Wie früher gezeigt (*I, 107*), erhält man beim Zerreißen von Metallstäben vielfach die sogenannten Fließfiguren oder Lüdersschen Linien. Abb. 219

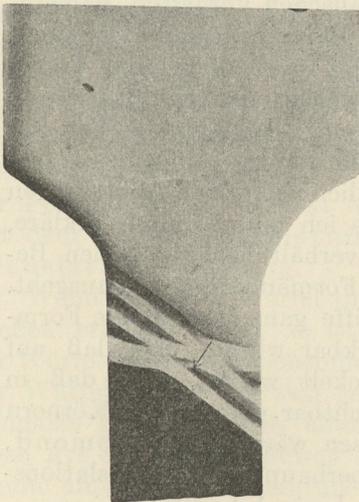


Abb. 219.

zeigt z. B. einen Teil eines Zerreißstabes von Flußeisen in etwa natürlicher Größe, der vor dem Zerreißen auf einer Seite poliert war. Er wurde einer allmählich gesteigerten Zugbeanspruchung ausgesetzt, bis eben die ersten Fließfiguren auftraten, worauf Entlastung erfolgte. Die Figuren zeigen den bekannten Verlauf: Parallele, zur Stabachse geneigte Streifen, die von anderen Streifen durchsetzt werden, die mit der Stabachse einen kleineren Winkel einschließen. Die Streifen zeigten die Form von flach verlaufenden Rinnen. Tafelabb. 54, Taf. XI, gibt die in Abb. 219 durch einen Pfeil angedeutete Stelle in 29facher Vergrößerung wieder und läßt erkennen, daß außerhalb der Fließfiguren (z. B. bei *p*) die ursprünglich glatt polierte Fläche noch unversehrt erhalten ist, daß aber innerhalb der Streifen die Oberfläche knittrig wurde. Dies wird dadurch bewirkt, daß die einzelnen Kristallkörner des Eisens sich mehr oder weniger aus der Oberfläche des Schiffs herausgedreht haben.

Die Fließfiguren sind jedenfalls dadurch verursacht, daß (Martens und Kirsch) die Spannungen nicht gleichmäßig über die ganze Länge des Stabes verteilt sind, sondern daß periodisch stärkere oder schwächere Spannungen abwechseln. Infolgedessen sind an den Stellen stärkerer Spannung bereits bleibende Formveränderungen aufgetreten, während an den dazwischenliegenden Stellen die Spannungen noch nicht den Grad erreicht haben, um Fließen herbeizuführen. Die Fließfiguren treten nicht nur bei Zerreißversuchen, sondern ganz allgemein in allen Fällen ein, bei denen Beanspruchung oberhalb der Streckgrenze stattfindet. Sie sind auch nicht auf Metalle und Legierungen beschränkt, die ein