

Die Zugfestigkeit von Glimmer und das Problem der technischen Festigkeit.

Von **E. Orowan** in Berlin-Charlottenburg.

Mit 15 Abbildungen. (Eingegangen am 28. Februar 1933.)

Zur Erklärung der größenordnungsmäßigen Diskrepanz zwischen der theoretischen und der technischen Zerreißfestigkeit pflegt man anzunehmen, daß unsichtbare Materialfehler bzw. (bei Kristallen) Unregelmäßigkeiten des Gitters für die Herabsetzung der theoretischen Festigkeit verantwortlich sind. Es waren jedoch in keinem Falle eindeutige Anhaltspunkte dafür bekannt, ob es sich hierbei um Oberflächenrisse handelt oder um innere Materialfehler, insbesondere um „Lockerstellen“, die nach der Lockerstrukturhypothese eine wesentliche Eigenschaft der Realkristalle darstellen sollen. — Zur Prüfung dieser Frage wurden breitere Glimmerblättchen mit Hilfe von schmalen Klemmen so zerrissen, daß der Rand spannungsfrei geblieben ist; dabei wurden Spannungen erreicht, die die übliche technische Festigkeit des Glimmers um das Zehnfache übertreffen und deren Maximalwert von etwa 32000 kg/cm² die höchste bei kristallinen Stoffen bisher beobachtete Zugfestigkeit ist. *Die übliche technische Zugfestigkeit des Glimmers ist also nicht durch innere „Lockerstellen“, sondern durch Risse an den Blatträndern bedingt.* — Zerreißt man andererseits in der üblichen Weise schmale Glimmerbänder (deren Ränder also unter Spannung stehen), so erweist sich nicht nur die Zerreißfestigkeit, sondern auch die Art des Zerreißens als von der Randbeschaffenheit abhängig; sowohl hier, als auch beim Zerreißen mit der erwähnten Randentlastung kann man das Auftreten und die Wirkungsweise von Oberflächenrisen unmittelbar beobachten.

1. Die Kohäsion („theoretische Zerreißfestigkeit“) von festen Körpern läßt sich bei heteropolaren Kristallen auf Grundlage der elektrostatischen Gittertheorie berechnen¹⁾; sonst aber allgemein nach einem von Polanyi²⁾ herrührenden Verfahren aus der Oberflächenenergie und dem Elastizitätsmodul abschätzen. Beide Wege führen zu Ergebnissen, die um einige Zehnerpotenzen größer sind als die wirklich gemessene („technische“) Zerreißfestigkeit; bei dem theoretisch und experimentell am sorgfältigsten untersuchten Steinsalz liegt z. B. die theoretisch ermittelte Kohäsion zwischen 20000 und 40000 kg/cm², während die auf einige Prozente genau reproduzierbare technische Festigkeit 20 kg/cm² beträgt³⁾. Dadurch sind die beiden Grundprobleme der technischen Festigkeit gegeben:

1) Was verursacht die Diskrepanz zwischen der theoretischen und der technischen Festigkeit?

¹⁾ F. Zwicky, Phys. ZS. **24**, 131, 1923.

²⁾ Siehe z. B. Auerbach-Hort, Handb. d. physikalischen u. technischen Mechanik, Bd. 4, 2. Hälfte, S. 7.

³⁾ F. Blank, ZS. f. Phys. **61**, 727, 1930. Siehe auch den unter Fußnote 2 angeführten Band des Handbuchs von Auerbach-Hort (Referat von A. Smekal).

2) *Wenn nicht die Kohäsion selbst, welche sonstige Ursache bewirkt das Vorhandensein einer wohldefinierten technischen Festigkeit?*

2. Es liegt nahe, die Verschiedenheit der theoretischen und der technischen Festigkeit auf die Kerbwirkung unsichtbarer Risse zurückzuführen. Die erste quantitative Untersuchung in dieser Richtung stammt von Inglis¹⁾; von einer technischen Fragestellung ausgehend hat er die Risse als elliptische Löcher in einer (gespannten) Platte schematisiert und die strenge Lösung dieses elastischen Problems berechnet. Ist c die große Halbachse der auf der Zugrichtung senkrecht stehenden Ellipse, ϱ der Krümmungsradius des spitzen Scheitels und $\bar{\sigma}$ die Spannung, die ohne Vorhandensein des Risses herrschen würde, so ergab sich die (im Kerbgrund auftretende) maximale Spannungserhöhung zu

$$\frac{\sigma}{\bar{\sigma}} = 2 \sqrt{\frac{c}{\varrho}}. \quad (1)$$

Dieselbe Spannungserhöhung würde nach Inglis auch durch Oberflächenrisse von der Tiefe c entstehen.

Nach dieser Formel könnte die Spannung bei hinreichend scharfem Kerbgrund beliebig hohe Werte erreichen. In Wirklichkeit gibt es aber infolge des atomaren Aufbaues der Stoffe eine untere Grenze für den Krümmungsradius, die etwa von der Größenordnung der Atomabstände ist. Setzt man für ϱ den mittleren Atomabstand a ein, so erhält man für die größtmögliche Spannungserhöhung bei der Rißlänge $2c$ den Wert

$$\frac{\sigma}{\bar{\sigma}} = 2 \sqrt{\frac{c}{a}}. \quad (1a)$$

Eliminiert man aus dieser Gleichung und aus der Abschätzungsformel von Polanyi

$$2\alpha = \frac{\sigma^2}{2E} a, \quad (2)$$

(α = Oberflächenenergie, E = Elastizitätsmodul) den Atomabstand a , so entsteht (bis auf den Faktor $\sqrt{\frac{2}{\pi}}$) die bekannte Formel von Griffith²⁾, die er aus (1) ohne atomistische Betrachtungen abgeleitet hat.

3. Griffith konnte die Richtigkeit seiner Formel durch Versuche mit künstlich erzeugten Rissen nachweisen und aus ihr die zur Überbrückung

¹⁾ C. E. Inglis, Transact. Inst. Naval Architects London 55 [1], 219, 1913.

²⁾ A. A. Griffith, Trans. Roy. Soc. (A) 221, 180, 1920; II. Internat. Congr. for Appl. Mechanics, Delft 1924, S. 61.

der theoretischen und der technischen Festigkeit von Glas und Quarzglas erforderliche Reißlänge zu etwa 1 bis 2 μ berechnen. Damit ist es gelungen, die erste Grundfrage nach der Natur der technischen Festigkeit (vgl. § 1) bei diesen Stoffen befriedigend zu beantworten. Die zweite Frage, warum die technische Festigkeit einen so gut reproduzierbaren Wert hat, mit anderen Worten, warum die Länge der größten Risse immer so weitgehend konstant ist, bleibt allerdings noch vollkommen ungeklärt.

Versucht man die Formel (1a) z. B. bei Steinsalz oder bei Zink-einkristallen anzuwenden, so erhält man Reißlängen, die in der Größenordnung von 0,1 bis 1 cm liegen, also größer sein können, als die Abmessungen des Kristalls selbst. Nun ist zwar die Reißlänge nicht unmittelbar maßgebend für die Beobachtbarkeit des Risses; wenn die Reißränder nicht klaffen, so daß ihr Abstand hinreichend tief unter der Wellenlänge des Lichtes liegt, können selbst zentimeterlange Risse unsichtbar bleiben. Doch kann es Risse, die länger sind, als der Kristall, nicht geben; man nimmt deshalb an, die Griffithsche Bruchtheorie sei in diesen Fällen nicht anwendbar. Da man diese Aussage in der Literatur meist in der Form trifft, die Griffithsche Theorie versage bei *Kristallen*, so sei hier nachdrücklich betont, daß „absurde“ Griffithsche Reißlängen bei einem großen Teil der Kristalle höchstwahrscheinlich nicht auftreten; so dürfte in dieser Beziehung zwischen Glas und Quarzglas einerseits, Bergkristall, Glimmer (bei Beanspruchung parallel zur Hauptspaltebene) und Asbest (bei Beanspruchung in der Faserrichtung) andererseits kein Unterschied bestehen. Das „Versagen“ der Griffithschen Formel ist an das Vorhandensein einer (nicht in der Zugrichtung liegenden) Ebene merklicher Spaltbarkeit gebunden, keineswegs aber allgemein an die Kristallinität.

4. Diese Schwierigkeit der Griffithschen Theorie war der eigentliche Ausgangspunkt der „Lockerstrukturhypothese“ von A. Smekal¹⁾. Die Behauptung der Lockerstrukturhypothese besteht darin, daß die wirklichen Kristalle stets mit Fehlern behaftet sind, die mit einer gewissen Gesetzmäßigkeit auftreten und u. a. als Griffithsche Risse die mechanische Festigkeit bestimmen.

Daß die zum Teil unter sehr ungünstigen und unregelmäßigen Bedingungen entstandenen Kristalle, die uns zur Verfügung stehen, kein geometrisch ideales Gitter haben, ist von vornherein zu erwarten und in zahlreichen Fällen mit bloßem Auge sofort zu erkennen, wie z. B. beim Steinsalz an seiner meist vorhandenen makroskopischen Mosaikstruktur. Aller-

¹⁾ Siehe z. B. Auerbach-Hort, a. a. O.

dings wirkt *diese* (nicht immer vorhandene) Mosaikstruktur nicht festigkeitserniedrigend, sondern im Gegenteil *festigkeitserhöhend*. Doch gibt es in zahlreichen Fällen sicher auch Kristallfehler, die im Griffithschen Sinne wirksam sind, also Löcher bzw. Poren. Die für die Lockerstrukturhypothese entscheidende Frage ist nun die: *Ist die technische Festigkeit durch solche, als ein wesentliches Attribut des Kristalls aufzufassenden Lockerstellen bestimmt oder aber durch mehr zufällige Materialfehler bzw. Oberflächenrisse?* Es besteht ja die Möglichkeit, daß (durch andere als Festigkeitseigenschaften nachweisbare) Lockerstellen tatsächlich vorhanden sind, ihre Kerbwirkung aber die technische Zerreißfestigkeit des Kristalls nicht erklären kann. In der Tat werden wir sehen, daß die Festigkeit des Glimmers bei Zugbeanspruchung parallel zur Hauptspaltebene *nicht durch innere Fehlerstellen, also etwa Lockerstellen, sondern durch Oberflächenrisse* ganz bestimmter Art bedingt ist, daß also in diesem Falle eventuelle Lockerstellen beim mechanischen Verhalten des Materials keine Rolle spielen.

Man kann ferner von vornherein einsehen, daß die Lockerstellenhypothese die erwähnte Schwierigkeit der Griffithschen Theorie beseitigen kann. In der Griffithschen Formel ist außer der Inglisschen Spannungsfeldberechnung nur der Energiesatz enthalten; sie gibt die maximal mögliche Kerbwirkung einer Fehlerstelle bestimmter Länge an, gleichgültig, wie diese entstanden ist; sie gilt also für Lockerstellen ebenso, wie für andere Materialfehler. Auch von der Superposition der Kerbwirkungen mehrerer benachbarter Lockerstellen ist keine Abhilfe zu erwarten; die maximale Spannung im Kerbgrund nimmt außerordentlich rasch mit der Entfernung ab¹⁾, so daß zwei Risse, die ganz nahe zueinander liegen, praktisch einen einzigen Riß bilden müssen, wenn die Superposition ihrer Kerbwirkungen merklich sein soll. Wären zwei solche günstig liegenden Risse wirklich vorhanden, so würde die dünne Scheidewand zwischen ihnen schon bei kleinen Beanspruchungen aufplatzen und sie würden sich zu einem größeren Riß vereinigen. Hat dieser auch noch nicht die von der Griffithschen Formel verlangte Länge (z. B. einige Millimeter), so müssen in der unmittelbaren Nachbarschaft noch weitere Risse liegen, damit der Bruch stattfinden kann. Man sieht, daß auf diese Weise der größte Teil des Querschnittes aus Lockerstellen bestehen müßte; in diesem Falle wird erstens die Griffithsche Formel nicht mehr anwendbar, da die Kerbwirkung verschwindet und die Risse nur durch die verursachte Querschnittsschwächung wirken; zweitens wird dann eine Schlußfolgerung möglich, die experimentelle Prüfung gestattet und

¹⁾ C. E. Inglis, a. a. O.

durch bereits vorhandene Beobachtungen widerlegt wird. Sie soll sogleich im Anschluß an die sogenannte „Blockstrukturhypothese“ betrachtet werden.

5. In ganz anderer Weise als die Griffithsche Theorie (einschließlich Lockerstrukturhypothese) will die „Blockstrukturhypothese“ die Diskrepanz zwischen technischer und theoretischer Festigkeit erklären. Sie nimmt an, daß die Kristalle aus störungsfrei (ideal) gebauten „Blöcken“ bestehen, in deren Innerem die Festigkeit ihren theoretischen Wert hat. Die Kohäsion *zwischen* den einzelnen Blöcken soll aber viel kleiner sein, nämlich eben die technische Festigkeit. Diese Hypothese verzichtet also auf die Heranziehung der Kerbwirkung; dafür wäre sie imstande, die Frage, warum die Festigkeit einen wohldefinierten Wert besitzt, zwanglos zu beantworten. Sie gestattet, wie erwähnt, gemeinsam mit einer Abart der Lockerstrukturhypothese, die die Zahl der Lockerstellen so hoch ansetzt, daß an Stelle der Kerbwirkung die Querschnittsschwächung tritt, einen Vergleich mit der Erfahrung. Ist nämlich die Kohäsion zwischen den Blöcken nur ein kleiner Bruchteil der Kohäsion des idealen Gitters, so muß (wegen der annähernd gleichbleibenden Reichweite der Gitterkräfte) auch die zum Zerreißen notwendige Arbeit, also die Oberflächenenergie, auf etwa den gleichen Bruchteil des theoretischen Wertes sinken. Es ist nun Obreimow gelungen, die Oberflächenenergie der Hauptspaltebene von Glimmer zu messen, indem er die zum Spalten erforderliche Arbeit bestimmt hat. Die Zugfestigkeit des Glimmers senkrecht zu dieser Fläche wurde noch nie gemessen; wegen der großen Neigung zum Zerblättern dürfte sie ziemlich niedrig sein. Jedenfalls wäre es sehr schwer, einen senkrecht zur Hauptspaltebene orientierten Probestab herzustellen; wahrscheinlich würde er schon während der Bearbeitung zerbrechen. Nach der Blockstrukturhypothese müßte man also eine recht niedrige Oberflächenenergie erwarten. Demgegenüber ergibt sich nach der Obreimowschen Methode der außerordentlich hohe Wert von 4500 erg/cm^2 ¹⁾. Auch die Versuche von Kusnezow und Kudrjawzewa²⁾ an Steinsalz, die allerdings nur eine obere Schranke für die Oberflächenenergie liefern, scheinen darauf hinzuweisen, daß der gittertheoretisch berechnete Wert der Oberflächenenergie richtig ist, während die technische Festigkeit, wie erwähnt, hier nur ein Tausendstel der theoretischen ist. Nur die *Zerreißfestigkeit* ist also kleiner, als beim idealen Gitter bzw. beim

¹⁾ Der in der Obreimowschen Arbeit (für Vakuum) angeführte Wert von 20000 erg/cm^2 muß durch den bei Richtigstellung des Ausdrucks für das Querschnittsträgheitsmoment der Spaltlamelle hinzutretenden Faktor 4 dividiert werden; der Wert 4500 ergibt sich aus genaueren Messungen des Verfassers. (Näheres in einer folgenden Mitteilung.)

²⁾ W. D. Kusnezow u. W. M. Kudrjawzewa, ZS.f. Phys. **42**, 302, 1927.

fehlerlosen Material, nicht aber die *Zerreibarkeit*; die niedrige technische Festigkeit muß demnach von ungleichmäßiger Spannungsverteilung her-rhren, im Gegensatz zur Auffassung der Blockstrukturhypothese und der letzterwähnten Abart der Lockerstrukturhypothese. Natürlich darf man diese Beispiele nicht ohne weiteres verallgemeinern; Steinsalz gehört aber zu den durch Schlag am leichtesten spaltbaren Kristallen, so daß die Oberflächenenergie, wenn irgendwo, dann hier die von der Blockstrukturhypothese verlangte Unterschreitung des theoretischen Wertes zeigen müßte.

6. Zusammenfassend kann man sagen, daß heute nur die Kerbwirkungsauffassung, also die Griffithsche Theorie als eine mögliche Grundlage zur Erklärung der technischen Festigkeit erscheint. Ihre beiden Hauptschwierigkeiten sind:

1) Die sehr großen Rilngen, die die Griffithsche Formel bei gut spaltbaren Kristallen verlangt;

2) Die mangelnde Möglichkeit zur Erklärung der Konstanz der technischen Festigkeit.

Beide Schwierigkeiten scheinen darauf zurückzuführen zu sein, daß man von der Natur und der Entstehung der Griffithschen Risse keine Vorstellung hat.

Der erste Schritt zur Aufklärung der Natur der Risse müßte nun sein, festzustellen, ob die für das vorzeitige Zerreißen verantwortlichen Risse *innere* Fehler sind (wie die Lockerstrukturhypothese behauptet) oder *Oberflächenrisse*. Zur Beantwortung dieser Frage hat Joffé zwei bekannte Versuche unternommen, die aber nicht zur gewünschten Entscheidung geführt haben. Bei dem einen Versuch hat er Steinsalzstbe zerrissen, während ihre Oberfläche durch gleichzeitiges Ablösen in Wasser fortwährend erneuert wurde. Dabei steigt die Zugfestigkeit auf den 20fachen Betrag¹⁾; dieser „Joffé-Effekt“ ist aber so verwickelt, daß seine Deutung noch umstritten ist. Möglicherweise entsteht er *nicht* durch eine Ablösung von Oberflächenrissen. Bei seinem zweiten Versuch hat Joffé eine Steinsalzkugel zuerst in flüssige Luft und dann unmittelbar in geschmolzenes Blei getaucht; die Kugel konnte die hierbei auftretenden Wärme-spannungen, die nach der von Joffé benutzten Berechnung etwa ein Drittel der theoretischen Festigkeit betragen sollten, aber nur im Kugelininneren als Zugspannungen auftreten, ohne Bruch aushalten. Doch erfolgen, wie Polanyi es bemerkt hat, bei diesen Spannungen schon plastische Deformationen, die die Spannungsverteilung abflachen; da man sie nicht näher

¹⁾ E. Schmid u. O. Vaupel, ZS. f. Phys. 56, 308, 1929; G. F. Sperling, ebenda 74, 476, 1932.

kennt, kann man auch aus diesem Versuch keine sicheren Folgerungen ziehen.

Im folgenden soll nun gezeigt werden, daß es beim Glimmer möglich ist, mit Hilfe eines einfachen Kunstgriffes zu einer eindeutigen Beantwortung dieser Frage zu gelangen und darüber hinaus manchen interessanten Einblick in den Mechanismus des Zerreißen zu gewinnen.

Glimmer verdankt seine ausgezeichnete Spaltbarkeit, wie der Versuch von Obreimow zeigt, nicht einer besonders kleinen Trennungsarbeit (Oberflächenenergie) längs seiner Hauptspaltebene, sondern wohl nur seiner hohen Festigkeit *senkrecht* zu dieser; dadurch kann man das Blättchen beim Spalten stark krümmen, ohne daß es senkrecht zur Spaltebene einreißt.

Wenn nun die Hauptspaltebene mechanisch so widerstandsfähig ist, dann ist zu erwarten, daß die Zugfestigkeit von Glimmerblättchen, falls sie durch Oberflächenrisse und nicht durch innere Lockerstellen erzeugt wird, durch Risse an den *Blatträndern* bestimmt ist. Auch die Hauptspaltebene mag Risse enthalten oder während des Zugversuchs bekommen; diese sollten aber kleiner sein und erst bei höheren Spannungen zum Bruch führen. Gelingt es also, ein Blatt Glimmer so zu zerreißen, daß die Ränder spannungsfrei bleiben, so müßte es eine erhöhte Festigkeit zeigen. Nun gibt es hierfür eine sehr einfache Möglichkeit. Man braucht nur die Breite des Blattes größer zu wählen als die Klemmen des Zerreißapparates sind. (Diese Maßnahme soll im folgenden als Einspannung mit „Schutzrand“ oder mit „Randentlastung“ bezeichnet werden.) Der dabei entstehende Spannungszustand hat nichts mit dem (gleichen Randbedingungen entsprechenden) ebenen Spannungszustand zu tun; schon bei kleiner Belastung biegen sich die Blattränder rinnenförmig hoch (Fig. 1), wobei ihre zur Zugrichtung senkrechte Wellung zeigt, daß sie vollkommen entspannt sind. Der unter Spannung stehende Teil des Blattes ist höchstens 10 bis 15% breiter als die Klemmen des Apparates. Die im folgenden angegebenen Zerreißspannungen sind durch Division der Zugkraft durch Lamellendicke

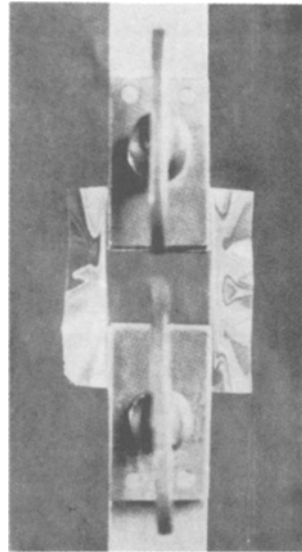


Fig. 1. Belastete Glimmerlamelle mit spannungsfreiem Rand.

mal Klemmenbreite berechnet; da die Spannungsverteilung nicht ganz gleichmäßig ist, dürfte die tatsächlich ausgehaltene Beanspruchung eher etwas höher sein, als die so berechnete pauschale Spannung.

Auf diese Weise bietet Glimmer die Möglichkeit, den Einfluß bestimmter Oberflächen zu eliminieren; man hat dabei den Vorteil, daß keine unkontrollierbaren Einflüsse chemischer oder plastischer Art das Resultat beeinträchtigen können, wie z. B. beim Zerreißen von Steinsalz unter Wasser.

Die Versuchsanordnung.

7. Die Versuche wurden mit einem Schopperschen Zerreißapparat der üblichen Bauart ausgeführt. Dieser wurde nicht maschinell, sondern, um Erschütterungen zu vermeiden, mit der Hand angetrieben. Die Versuchsdauer betrug einige Minuten.

Zu den ersten Versuchen wurden einfache Klemmen, wie sie in Fig. 1 zu sehen sind, benutzt. Sie bestanden aus je zwei Stahlplatten von 6 mm Dicke und 20 mm Breite, die mit einer Knebelschraube aneinandergepreßt wurden; ihre Enden waren an zwei pinzettenartig verlöteten Messingstreifen befestigt. Zwischen diesen Klemmen und den ursprünglichen Backen des Zerreißapparates war noch zur Erreichung freier Einstellbarkeit je ein Drahtbügel eingeschaltet.

Das Einspannen der Glimmerfolien in diese Klemme geschah folgenderweise. Die unteren Backen der Klemmen wurden in einen Schraubstock eingespannt, so daß sie in der richtigen Entfernung einander gegenüberlagen. Dann wurde die Glimmerfolie auf sie aufgelegt und die oberen Backen durch Festziehen der Knebelschraube angepreßt. Ein großer Teil der Versuche mit dem erwähnten Schutzrand wurde mit diesen Klemmen gemacht. Die freie Länge der Probe war 15 bis 30 mm.

Diese Klemmen versagten aber bei dünneren Lamellen (etwa $\frac{1}{100}$ mm und darunter), sowie bei nicht sehr dicken Bändern *ohne* Schutzrand; oft gingen die Blätter schon während des Einspannens zugrunde, und in der Mehrzahl der übrigen Fälle rissen sie im Zerreißapparat vorzeitig infolge offensichtlich mangelhafter Zentrierung. Da Glimmer wegen seiner Starrheit (Elastizitätsmodul 2300000 kg/cm^2) sehr empfindlich gegen Zentrierungsfehler ist, infolge der zum Einspannen notwendigen großen Kräfte aber besonders schwer zu zentrieren ist, wurde nach vielen Versuchen eine justierbare Fassung ausgebildet, die es erlaubt, jede bereits eingespannte Folie vor Ausführung des Versuchs genau zu zentrieren.

Fig. 2 zeigt diese Fassung; sie besteht aus einer Grundplatte 1 von niedrigem U-förmigem Querschnitt aus gefrästem Stahl; an ihr ist die

untere Backe der oberen Klemme 3 fest angeschraubt. Die Verlängerung dieser unteren Backen trägt einen Knopf 2, an dem über einen zwischengeschalteten Drahtbügel die obere Zugklemme des Zerreißapparates angreift. Die obere Backe der Klemme 3 kann mit Hilfe der Mutterschraube 4 angepreßt werden. Gegen Verdrehung ist sie mit zwei Prisonstiften gesichert. Die Breite der Klemmen beträgt auch bei dieser Fassung 20 mm.

Die untere Klemme der Fassung bewegt sich mit Hilfe einer Kugellagerung in der U-förmigen Grundplatte. Hierzu ist ihre untere Backe als Vorsprung eines breiteren Schlittens 5 ausgebildet. Dieser Schlitten ist eine 6 mm starke rechteckige Stahlplatte; über ihre Seitenränder sind U-förmige Kugellagerkäfige geschoben, die je drei Reihen von Stahlkugeln enthalten, welche den Schlitten von unten, von oben und von der Seite führen. Jede Reihe enthält 17 Kugeln von 2 mm Durchmesser, so daß der Schlitten insgesamt durch 102 Kugeln geführt wird. Die Kugellagerkäfige sind U-förmig gebogene Messingblechstreifen, deren drei Seiten außen von aufgelöteten Messingblechstreifen bedeckt sind. In jeder der auf diese Weise verdoppelten Seiten wurde eine Reihe von Löchern gebohrt, deren Durchmesser etwas kleiner als diejenigen der Kugeln sind; die Löcher wurden dann auf der einander zugekehrten Seite der Blechstreifen versenkt, so daß die Kugeln in doppelkegelförmigen Hohlräumen sitzen.

Die Deckplatten 6 und 7 halten den Schlitten in der Grundplatte fest. Die ebenfalls durch zwei Prisonstifte gegen Verdrehung gesicherte obere Backe 8 der unteren Klemme wird mit der Mutterschraube 9 angepreßt; den (auf der Rückseite befindlichen) Kopf dieser Mutterschraube kann man von unten her durch eine Öffnung der Grundplatte hindurch mit einem Steckschlüssel fassen, so daß man die bewegliche untere Klemme festziehen kann, ohne die Kugellagerführung zu belasten. Um das beim Fest-

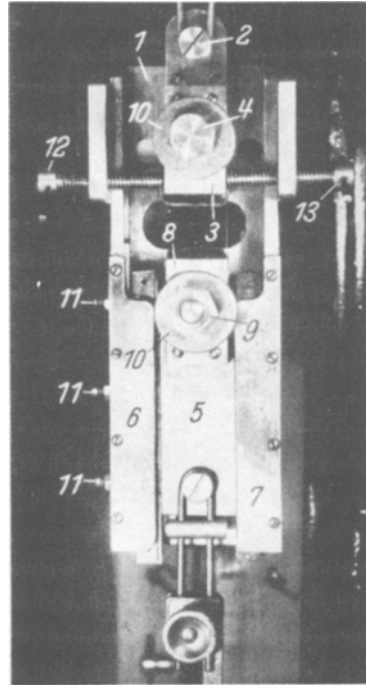


Fig. 2. Justierbare Fassung.

ziehen von der Mutterschraube auf die Backen übertragene Drehmoment möglichst zu verkleinern, sind an Stelle von Unterlegscheiben kleine Längskugellager 10 verwendet.

Zum Einspannen wurde die Glimmerfolie zuerst in der unteren (am Schlitten befindlichen) und dann in der oberen Klemme festgeschraubt. Dabei tritt mit dem Anziehen der Schrauben immer eine winzige Verdrehung der Backen gegeneinander ein; ist die Lage der Folie nach Festziehen der unteren Klemme fixiert, so erleidet sie beim Festziehen der oberen Klemme eine Verziehung, weil sie von der sich gegen die Grundplatte verdrehenden oberen Backe etwas mitgenommen wird. Diese Verziehung, die sich leicht nachweisen läßt, wenn man das an der Folie gespiegelte Bild eines Fensterkreuzes betrachtet, verursacht eine ungleichförmige Spannungsverteilung und damit eine Fälschung der Meßergebnisse. Nachdem alle Maßnahmen, sie von vornherein zu vermeiden, sich wegen der zum Festklemmen erforderlichen großen Kräfte als wirkungslos erwiesen haben, wurde die Verziehung nach erfolgter Einspannung dadurch beseitigt, daß die obere Backe der oberen Klemme durch die an ihren Seitenflächen angreifenden Knebeschrauben 12 und 13 in ihre richtige Lage zurückgedreht wurde, bis die Verzerrung des Reflexbildes verschwunden ist.

Besondere Sorgfalt verlangte die Wahl des Backenfutters; bei hartem Futter ist der Druck ungleichmäßig; weiches Futter (Blei, Holz, Pappe) wird dagegen herausgequetscht und nimmt die Glimmerfolie mit; dabei wird diese zwischen den Backen einer so starken Zugspannung unterworfen, daß sie manchmal schon während des Einspannens, meist aber am Anfang des Zugversuches in der Klemme reißt. Deshalb wurde ein aus zwei Schichten zusammengesetztes Futter verwendet; es bestand aus $\frac{3}{4}$ mm starkem, vorher mit einigen tausend Atmosphären zusammengepreßtem Nußholzfournier, auf dem eine einige zehntel Millimeter starke Glimmerscheibe aufgeklebt war. Dieses Futter ist senkrecht zu seiner Fläche nachgiebig, tangential dagegen starr.

8. Ausgangsmaterial war ausgewählter indischer Muskovitglimmer (Ruby Mica); Einschlüsse oder Fehler waren nicht zu beobachten. Die $\frac{1}{3}$ bis $\frac{2}{3}$ mm starken Tafeln wurden zunächst mit einer Diamantensäge, wie sie zum Schneiden von Gesteinen verwendet wird, in rechteckige Streifen zerschnitten; sie wurden, um Zerblättern zu vermeiden, ganz sanft, fast nur durch ihr eigenes Gewicht an die rotierende Scheibe gedrückt. Von diesen rechteckigen Streifen wurden die zu den Zugversuchen verwendeten, $\frac{1}{200}$ bis $\frac{1}{12}$ mm dicken Blätter abgespalten; das Spalten wurde mit einer Rasierklinge eingeleitet, dann aber die Lamelle mit der Hand abgezogen,

um eine Berührung der zu beanspruchenden Teile zu vermeiden. Beim Spalten entstehen oft Treppen, die als leicht gekrümmte kratzerartige Linien erscheinen. Blätter, die solche enthielten, wurden nicht verwendet.

9. Die Dicke der Blätter wurde mit einem Zeiss'schen Optimeter gemessen; ein Skalenteil entspricht 1μ . Der Beobachtungsfehler ist höchstens $\pm 0,1 \mu$, da die Messungen innerhalb der Ablesungsgenauigkeit reproduzierbar sind.

Bei der Dickenmessung bzw. der Querschnittsberechnung ist es notwendig, folgende Erscheinung zu berücksichtigen, die weiter unten ausführlich erörtert werden soll. Außer den Lamellen mit „Schutzrand“ wurden noch Zugversuche gemacht mit zwei verschiedenen Arten von Glimmerbändern (deren Breite, wie die der Klemmen, 20 mm war): erstens mit solchen, die unmittelbar aus 20 mm breiten Streifen gespalten wurden, deren Ränder also von der Diamantensäge erzeugt wurden (Lamellen mit „geschliffenem Rand“); zweitens mit Bändern, deren Ränder nach dem Spalten mit der Schere beschnitten wurden. Bei Lamellen mit Schutzrand und Bändern mit geschnittenem Rand bilden sich nun im Laufe des Zugversuches quer zur Spannungsrichtung verlaufende Oberflächenrisse, die oft eine Abschälung der betroffenen Oberflächenschicht zur Folge haben. Damit ist eine Verkleinerung des tragenden Querschnittes verbunden; man kann also die Zugfestigkeit entweder auf den Anfangsquerschnitt oder auf den Endquerschnitt beziehen. Bei den Versuchen mit Schutzrand, deren Aufgabe die Feststellung der höchsten Zugspannung ist, die Glimmer überhaupt ertragen kann, ist vorwiegend die Rechnung mit dem Endquerschnitt von Interesse. Bei den Bändern mit geschnittenem Rand, deren Festigkeit viel niedriger ist, kommt es darauf an, wie diese technische Festigkeit zustande kommt; hier sind also beide Zahlen gleich wichtig.

Nicht immer gelingt es allerdings, den Endwert der Lamellendicke auch nur angenähert zu ermitteln; oft „verheilt“ die abgeblätterte Oberflächenschicht im weiteren Verlauf des Versuchs so vollkommen mit der übrigen Lamelle, daß es nicht mehr möglich ist, sie voneinander zu trennen (s. weiter unten). Aber auch wenn die Trennung gelingt, ist es höchst unsicher, ob dabei wirklich der durch Oberflächenrisse entstandene kleinste Querschnitt getroffen wurde. In diesem Sinne stellen die errechneten Werte nur untere Schranken für die Zugfestigkeit dar.

10. Die Zugfestigkeit des Glimmers ist in der üblichen Weise von Rinne¹⁾ bestimmt worden. Er hat 15 mm breite, einige zehntel Millimeter

¹⁾ F. Rinne, Centralbl. f. Miner., Geol. u. Paläont. 1902, S. 262.

starke, mit der Schere geschnittene Bänder zerrissen und fand als Mittelwert aus vier Messungen die Zugfestigkeit von 3110 kg/cm^2 , wenn die Hauptlinie der Schlagfigur parallel zur Zugrichtung orientiert war, und 2520 kg/cm^2 , wenn sie senkrecht auf der Zugrichtung stand. (Bei den im folgenden beschriebenen Versuchen, von denen ein Teil auch unter ähnlichen Bedingungen gemacht wurde, konnte eine Orientierungsabhängigkeit *nicht* gefunden werden.) Ungefähr dieselbe Zugfestigkeit erhielten neulich Joffé und Walther¹⁾, ebenfalls an schmalen, mit der Schere geschnittenen Bändern.

11. Tabelle 1 stellt die Ergebnisse von *Zugversuchen an Lamellen mit Schutzrand* dar. Sie enthält nur einen Teil der Versuche, nämlich diejenigen, die besonders regelmäßig abgelaufen sind. Versuche, bei denen die Bruchstelle unmittelbar an der einen Klemme lag oder bei denen man vor dem Zerreißen eine Unregelmäßigkeit der Spannungsverteilung beobachten konnte, sind nicht berücksichtigt. Die Versuchsergebnisse sind in zeitlicher Folge eingetragen; die gemessenen Werte der Zugfestigkeit erhöhen sich im Mittel mit der fortschreitenden Verbesserung der Versuchstechnik.

Bei allen Lamellen war die Hauptlinie der Schlagfigur parallel zur Zugrichtung orientiert; einige in der Tabelle nicht angeführte Versuche mit senkrecht orientierten Lamellen lieferten Werte der Zugfestigkeit, die im Mittel etwas niedriger waren, wahrscheinlich infolge kleiner Unregelmäßigkeiten beim Zerreißen; der Unterschied ist aber viel kleiner als die Streuung der Werte untereinander.

Tabelle 1.
Zugversuche an Lamellen mit Schutzrand.

Versuchsnummer	Lamellendicke in $\frac{1}{100}$ mm	Zugfestigkeit kg/cm^2
B 1	1,03	17 800
B 2	1,13	20 100
B 5	1,20	20 400
B 7	0,96	18 500
B 8	0,88	19 100
B 9	0,88	17 800
B 10	1,21—1,02	32 400
B 11	1,31	24 100
D 1	1,25	26 200
D 2	0,75—0,4	23 000
D 3	1,20	32 000
D 4	1,15	27 200

¹⁾ A. Joffé u. A. Walther, Phys. ZS. d. Sowjet-Union 1, 132, 1932.

Die beiden doppelten Angaben der zweiten Spalte beziehen sich auf Anfangs- und Enddicke der Lamellen; in den übrigen Fällen war die Abblätterung der Oberflächenschicht nicht so weitgehend, daß die Ermittlung der Enddicke möglich gewesen wäre. Bei der Lamelle *D 4* verheilte die merklich abgeblätterte Oberflächenschicht wieder mit der Lamelle, so daß die Messung der Enddicke auch hier nicht gelungen ist; der angegebene Festigkeitswert ist auf den Anfangsquerschnitt bezogen, also zu klein. In den anderen Fällen ist die Zugfestigkeit aus dem Endquerschnitt berechnet.

Die höchste Festigkeit von Lamellen mit Schutzrand ist nach Tabelle 1 rund *zehnmal so groß*, wie die von Rinne sowie von Joffé und Walther bestimmte technische Zugfestigkeit; da hier chemische Einwirkungen, wie beim Joffé-Effekt, nicht in Frage kommen und die zerrissenen Lamellen auch keine Spur plastischer Formänderung zeigen, ist damit der Nachweis erbracht, daß *die technische Festigkeit des Glimmers* (genauer, die Zugfestigkeit von Glimmerbändern) aus der theoretischen Festigkeit durch *Störungen an den Blatträndern hervorgeht*; werden diese durch den Schutzrand ausgeschaltet, so steigt die Zugfestigkeit auf das Zehnfache, weil die in diesem Fall allein übrigbleibende Begrenzung des gespannten Materials, die Hauptspaltebene, Störungen (Rissen) gegenüber viel widerstandsfähiger ist.

Bei diesen hohen Spannungen bewirkt die im Augenblick des Zerreißen vorhandene große elastische Energie oft ein explosionsartiges Auseinanderfliegen der ganzen Lamelle; dieselbe Erscheinung hat Griffith bei seinen Versuchen an frisch gezogenen Glas- und Quarzglasstäben beobachtet. Hierbei entstehen oft Bruchstücke, die allseitig kristallographisch begrenzt sind durch die Linien der Schlagfigur: eine besonders augenfällige Bestätigung dafür, daß die Linien der Schlagfigur tatsächlich unvollkommene Spaltebenen des Glimmers darstellen. Die übrigbleibenden Rißränder sind meist vollkommen zerfranst, wobei die erwähnten zur Hauptspaltebene (fast) senkrechten Spaltebenenscharen der Schlagfigur deutlich zu erkennen sind (Fig. 3).

12. Tabelle 2 enthält die *Ergebnisse von Zugversuchen an 20 mm breiten Glimmerbändern mit „geschliffenem“ Rand*, die also unmittelbar durch Abspalten aus den mit der Diamantensäge geschnittenen Streifen hergestellt wurden. Fig. 4 zeigt den Rand einer solchen Lamelle bei 50facher Vergrößerung (nur der mittlere Teil ist scharf eingestellt); die schleifende Wirkung der Diamantenkörner besteht in einer mikroskopisch feinen Abbröckelung.

Auch in Tabelle 2 sind die Meßergebnisse in chronologischer Folge eingetragen; die ersten Messungen der Reihe *C* wurden mit den einfachen Klemmen (Fig. 1) gemacht, die Reihe *E* dagegen mit all den oben be-



Fig. 3. Kristallographisch begrenzter Bruchrand eines Glimmerblättchens. (50mal, gekrenzte Nicols).

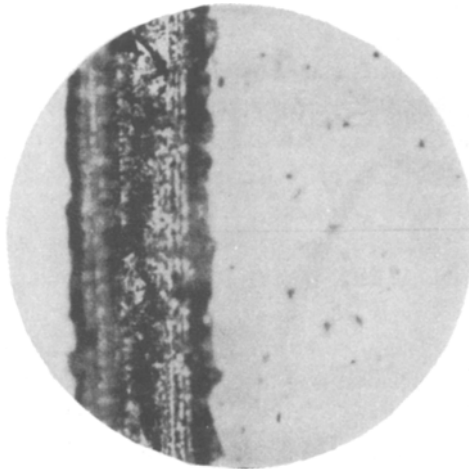


Fig. 4. „Geschliffener“ Rand eines Glimmerbandes (135mal).

schriebenen Vervollkommnungen (justierbare Klemme, Kugellagerunterlegscheibe und zweischichtiges Backenfutter).

Die mittlere Zugfestigkeit aller *parallel* orientierten Lamellen der Tabelle 2 ist 2750 kg/cm^2 , diejenige der senkrecht orientierten 2660 kg/cm^2 .

Mittelt man nur die Ergebnisse der besonders zuverlässigen Meßreihe *E*, so erhält man 2640 kg/cm² für die parallele, 2850 kg/cm² für die senkrechte Orientierung. Doch zeigen Fig. 5 und 6, daß diese Mittelwerte keine absolute, von der Lamellendicke unabhängige Bedeutung haben. In diesen Abbildungen sind die Meßergebnisse der Tabelle 2 in Abhängigkeit von der Lamellendicke aufgetragen; Fig. 5 enthält alle Werte der Tabelle, Fig. 6 nur die besonders zuverlässige Meßreihe *E*. Die Punkte der Reihe *E* liegen

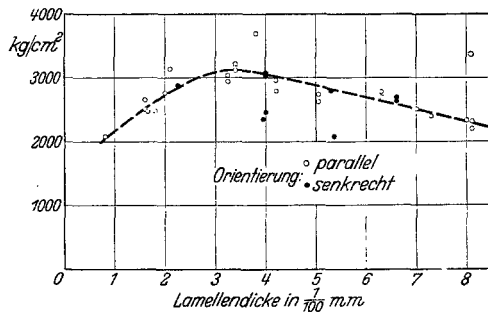


Fig. 5.

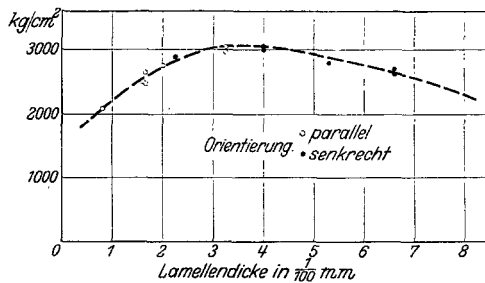


Fig. 6.

überraschend genau auf einer Kurve, die zwischen 0,03 und 0,04 mm Dicke ein Maximum der Festigkeit ergibt. Der Maximalwert beträgt etwa 3050 kg/cm². Nach kleineren und größeren Dicken hin fällt die Festigkeit ab; deshalb hat die Angabe einer mittleren Festigkeit nur einen relativen Sinn. Man erkennt auch, daß die Festigkeit von der Orientierung nicht merklich abhängt; die Verschiedenheit der oben angegebenen Mittelwerte ist eine Folge der zufälligen Verteilung der Proben auf verschiedene Lamellendicken.

13. Besonders aufschlußreich in bezug auf die Natur der technischen Festigkeit ist der Vergleich der beiden Schaubilder Fig. 5 und 6. Durch Hinzunahme der weniger präzisen Messungen der Reihe *C* bleibt die Kurve offensichtlich ungeändert, nur die Streuung der Meßpunkte wird außerordentlich viel größer. Dabei ist es auffallend, daß die Streuung nicht nur nach unten, sondern auch nach oben hin erfolgt. Das ist nicht vereinbar mit der bisher stets als selbstverständlich angesehenen Annahme, daß die Zerreißfestigkeit durch ungleichförmige Spannungsverteilung u. ä. nur *erniedrigt* werden könnte. Aus den Versuchen an Lamellen mit Schutzrand

Tabelle 2.
Zugversuche an Lamellen mit geschliffenem Rand.

Versuchsnummer	Orientierung	Lamellendicke in $\frac{1}{100}$ mm	Zugfestigkeit kg/cm ²
{ C 1		3,4	3160
{ C 2		3,4	3160
{ C 3		3,4	3130
{ C 4		8,0	2340
{ C 5		7,3	2400
{ C 8		7,0	2520
{ C 9		8,1	2200
{ C 10		8,1	3380
{ C 10 a		8,1	2320
{ C 15		3,8	3500
{ C 18		4,2	2950
{ C 19		4,2	2800
{ C 20		5,05	2630
{ C 21		5,05	2740
{ C 24		6,3	2780
{ C 24 a		6,3	2700
{ C 26	⊥	5,35	2070
{ C 28	⊥	4,0	2450
{ C 32	⊥	3,95	2350
{ C 37		1,8	2480
{ C 41		2,1	3150
{ E 3		2,0	2760
{ E 4		1,65	2470
{ E 5		1,6	2500
{ E 6		3,25	3050
{ E 7		3,25	2950
{ E 8		1,6	2660
{ E 10		0,8	2090
{ E 11	⊥	2,25	2880
{ E 13	⊥	6,6	2640
{ E 14	⊥	6,6	2680
{ E 15	⊥	4,0	3020
{ E 16	⊥	4,0	3050
{ E 17	⊥	5,3	2800

|| bedeutet: Hauptlinie der Schlagfigur *parallel* zur Zugrichtung, ⊥ bedeutet: Hauptlinie der Schlagfigur *senkrecht* zur Zugrichtung.

folgt aber unmittelbar, daß beim Glimmer auch die entgegengesetzte Wirkung eintreten kann. Tritt bei einer ungleichförmigen Spannungsverteilung die größte Spannung am Rande auf, so wird die Tragfähigkeit natürlich herabgesetzt; ist aber die Spannung in der *Mitte* des Bandes am größten (was z. B. dadurch eintreten kann, daß die Klemme an den Seiten etwas nachgibt, wenn die Backen beim Polieren ein wenig konvex geworden sind, oder wenn der in der Mitte angreifende Druck der Klemmschraube sich nicht gleichmäßig verteilt), so treten Spuren eines Schutzrandeffektes auf, da ja für das Zerreißen nur die Randspannung maßgebend ist, die jetzt unterhalb der mittleren Spannung liegt.

Fig. 6 zeigt besonders eindringlich, daß durch Oberflächenrisse bestimmter Art (in diesem Falle sind sie gegeben durch den Bearbeitungsvorgang mit der Diamantensäge) eine ganz scharf definierte technische Festigkeit entstehen kann. Wie diese genau reproduzierbare Festigkeit entsteht, d. h. warum die größten Risse in allen Bändern so genau gleich „lang“ sind, ist noch nicht verständlich, wenn auch der Umstand, daß in der Griffithschen Formel nur die *Quadratwurzel* der Rißlänge vorkommt, von besonderer Bedeutung sein dürfte. Doch liefert Fig. 6 wenigstens den Nachweis, daß eine scharfe Zerreißfestigkeit durch Oberflächenrisse zustande kommen kann und nicht erst einer Begründung durch strukturelle Eigenschaften des Kristalls bedarf, wie es z. B. in der Blockstrukturhypothese versucht wurde.

14. Bei Lamellen, deren Ränder mit der Schere beschnitten wurden (Tabelle 3; die Breite der Bänder war 19 bis 20 mm), ist die Neigung zur Oberflächenrißbildung und zum Ablättern der Oberflächenschicht, die bei Bändern mit geschliffenem Rand sehr gering ist, so ausgesprochen, daß es hier meist möglich ist, den Endquerschnitt zu bestimmen. Fig. 7 zeigt bei 50facher Vergrößerung den stark zertrümmerten Rand einer solchen Lamelle vor dem Zerreißversuch; trotz der scheinbar sehr unregelmäßigen Randbeschaffenheit ist die Streuung der Meßwerte klein, sogar etwas kleiner als bei den entsprechenden Meßreihen der Tabelle 2 (geschliffener Rand).

Die Festigkeit der Bänder mit geschnittenem Rand ist erheblich größer als die der Bänder mit geschliffenem Rand. Bezieht man die Zerreißfestigkeit auf den Anfangsquerschnitt, so ergibt Tabelle 3 eine mittlere Festigkeit von 4210 kg/cm², also über anderthalbmal soviel, wie die mittlere Festigkeit bei geschliffenem Rand. Bezieht man sie auf den (nicht in allen Fällen ermittelbaren) Endquerschnitt, so ist sie im Mittel gar 2¹/₂mal so hoch wie bei Bändern mit geschliffenem Rand, nämlich 6840 kg/cm². Je nach der Randbeschaffenheit erhält man also bei Glimmerbändern ohne Schutzrand

zwei verschiedene wohldefinierte technische Festigkeiten, die beide tief unter der mit Schutzrand erreichbaren Festigkeit liegen. Damit ist sichergestellt, daß die technische Festigkeit des Glimmers durch die Randbeschaffenheit bestimmt ist und daß je nach dem Bearbeitungsvorgang bei der Erzeugung des Randes verschiedene wohldefinierte Festigkeiten entstehen. Wird die

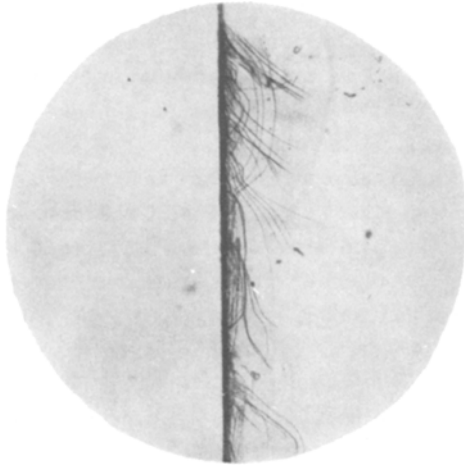


Fig. 7. „Geschnittener“ Rand eines Glimmerbandes (50mal).

Wirkung der Randrisse durch einen Schutzrand ausgeschaltet, so müssen die den Bruch herbeiführenden Risse an der viel widerstandsfähigeren Hauptspaltebene entstehen; die Festigkeit wird dadurch um eine Zehnerpotenz höher.

Tabelle 3.
Zugversuche an Lamellen mit geschliffenem Rand.

Versuchsnummer	Orientierung	Dicke in $\frac{1}{100}$ mm		Zugfestigkeit in kg/cm^2	
		vor dem Versuch	beim Zerreißen	aus Anfangsquerschnitt	aus Endquerschnitt
C 14		3,8	?	3570	—
C 30	⊥	5,8	3,5	4090	6800
C 31	⊥	5,9	4,1	5230	7530
C 33	⊥	3,95	2,25	4260	7480
C 34	⊥	2,05	?	4280	—
C 36		3,1	1,75	4210	7450
C 40		5,85	3,4	3400	5850
C 42		4,0	3,1	4600	5940
E 1		3,0	?	4130	—
E 2	⊥	2,25	?	4310	—
E 12	⊥	4,0	?	4025	—

|| bedeutet: Hauptlinie der Schlagfigur *parallel* zur Zugrichtung, ⊥ bedeutet: Hauptlinie der Schlagfigur *senkrecht* zur Zugrichtung.

15. In einer neueren Arbeit¹⁾ fanden Joffé und Walther, daß die Zugfestigkeit von Glimmerbändern von etwa 15μ Dicke abwärts rasch zunimmt. Es ist kaum möglich, die vorliegenden Versuche mit den Joffé-Waltherschen zu vergleichen, da sie nur einen Meßpunkt unterhalb 15μ Dicke enthalten; die oben beschriebenen, für große Kräfte konstruierten Klemmen waren zu grob für dünnere Lamellen. Vielleicht war das die Ursache des erwähnten Abfalls der Festigkeit mit abnehmender Dicke (Fig. 5 und 6). Allerdings läßt die minimale Streuung von Fig. 6 eine solche Erklärung als unwahrscheinlich erscheinen. Wie aus dem folgenden hervorgehen wird, verhalten sich Bänder mit geschnittenem Rand, wie es die von Joffé und Walther verwendeten waren, ganz anders, als solche mit geschliffenem Rand, auf die sich Fig. 6 bezieht. Es ist demnach denkbar, daß der von Joffé und Walther gefundene Effekt nur bei Bändern mit geschnittenem, nicht aber bei Bändern mit geschliffenem Rand auftritt.

Das Auftreten von Oberflächenrissen an gespannten Glimmerblättern.

16. Die von Griffith und seinen Vorgängern angenommenen Risse waren bisher insoweit hypothetischer Natur, als man sie nur in ihren Wirkungen, nicht aber unmittelbar, z. B. optisch, beobachten konnte. Denn in dem Augenblick, als ein Riß groß genug geworden wäre zur Beobachtung, hat er schon ins Innere des Körpers fortschreitend den Bruch herbeigeführt.

Dem Zusammenwirken mehrerer merkwürdiger Eigenschaften des Glimmers ist es zu verdanken, daß an ihm unter bestimmten Bedingungen mit freiem Auge sichtbare Oberflächenrisse entstehen können, ohne gleich zum Bruch zu führen.

Beim Erreichen einer bestimmten Spannung treten auf dem Glimmerblatt nacheinander eine Anzahl feiner rißartiger, praktisch gerader Linien auf, die auf der Spannungsrichtung senkrecht stehen und von der

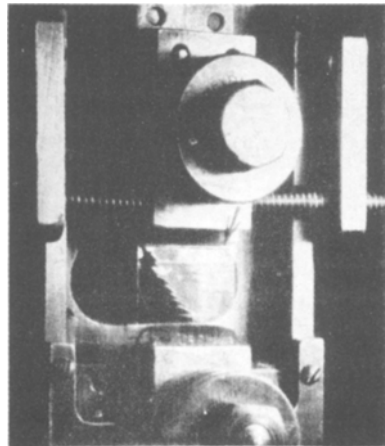


Fig. 8. Oberflächenrisse an einem Glimmerband: beginnende Abschälung der Oberflächenschicht.

¹⁾ A. Joffé u. A. Walther, Phys. ZS. der Sowjetunion 1, 132, 1932.

kristallographischen Orientierung unabhängig sind. Im ersten Stadium ihres Entstehens kann man sie wegen ihrer äußersten Feinheit nur entweder bei scharf seitlicher Beleuchtung, oder daran erkennen, daß in ihnen die Stellung der (ursprünglich ebenen) Lamellenoberfläche sich unstetig ändert, als wenn jede Linie der Grat eines Bergrückens wäre; das läßt sich in reflektiertem Licht unmittelbar beobachten. Fig. 8 zeigt diese Erscheinung an einem mit der Schere beschnittenen 20 mm breiten Band; die sprunghafte Änderung der Oberflächennormale auf den Querlinien läßt sich an der zickzackförmigen Grenze zwischen Licht und Schatten besonders gut beobachten.

Bei Lamellen mit Schutzrand beginnt diese Querstreifung bei einer Spannung von ungefähr 6 bis 8000 kg/cm² aufzutreten; sie beschränkt

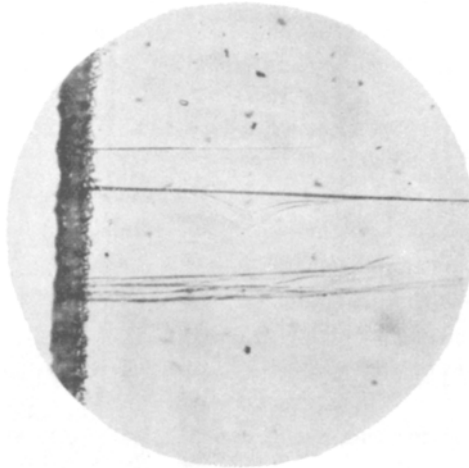


Fig. 9. Risse an einem Glimmerband mit geschliffenem Rand (50 mal).

sich auf den zwischen den Klemmen liegenden gespannten Teil (greift also nicht auf den Schutzrand über). An Bändern mit *geschnittenem* Rand tritt sie schon bei 4000 kg/cm² auf; die Linien sind hier besonders zahlreich, ihr mittlerer Abstand kann 1 mm und noch weniger werden. An Bändern mit *geschliffenem* Rand sind sie nur selten zu beobachten; man findet höchstens einige schwache Querlinien, die von einem Rand ausgehen und den anderen meist nicht erreichen (Fig. 9).

Diese Querlinien sind die erwähnten Oberflächenrisse. Daß sie die zur Beobachtbarkeit notwendige Größe erreichen können, ohne Bruch zu verursachen, liegt an folgendem. Bei Glimmer ist die Hauptspaltebene wegen ihrer vollkommenen Spaltbarkeit so bevorzugt vor allen anderen Spaltebenen, daß der geringste Anlaß genügt, um den Oberflächenriß trotz seiner in bezug

auf die Spannungsrichtung günstigen Lage in die Hauptspaltebene abzulenken und dadurch unschädlich zu machen (da die Hauptspaltebene parallel zur Spannungsrichtung liegt). Als solcher Anlaß kann z. B. eine aufgeblätterte Stelle in einer Hauptspaltebene wirken, auf die der Oberflächenriß während seines Fortschreitens nach dem Inneren zu trifft. Sobald der erste Ansatz zur Ablenkung des ursprünglich auf der Hauptspaltebene senkrecht stehenden Oberflächenrisses vorhanden ist, setzt ein eigentümlicher Vorgang ein, der viel verwickelter ist, als die bisher in der physikalischen Festigkeitstheorie herangezogenen Überlegungen zu sein wagten, der sich aber Schritt für Schritt beobachtend verfolgen läßt und deshalb als vollkommen gesichert gelten kann. Er besteht in folgendem.

17. Die Oberflächenschicht $ABBA$ der Lamelle $ACCA$ (Fig. 10) sei durch einen Riß, der sich bis zum Punkt O erstreckt, unterbrochen. Soll die Oberflächenschicht den Zusammenhang mit der übrigen Lamelle behalten und ihre Dehnung mitmachen, so muß auf sie in der Ebene BB eine mit der Entfernung von O abnehmende Schubspannung S wirken, da zwischen den Ufern des Risses keine Zugspannung mehr übertragen werden kann. Faßt man die Oberflächenschicht als biegsamen Balken mit der Achse XX auf, so sieht man unmittelbar, daß die Schubspannung S in bezug auf die Achse der Oberflächenschicht ein Biegemoment hat, das die Schicht von der Lamelle wegzubiegen sucht. Dadurch wird zwischen beiden eine ebenfalls mit der Entfernung von O abnehmende Zugspannung Z geweckt, deren Biegemoment demjenigen der Schubspannung S das Gleichgewicht hält.

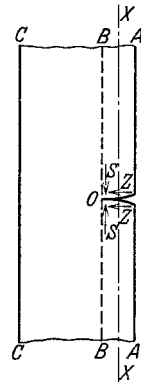


Fig. 10. Vorgänge bei der Oberflächenrißbildung.

Mit zunehmender Belastung wachsen diese Spannungen, bis schließlich die aus der Schub- und der Zugspannung zusammengesetzte Beanspruchung in der Ebene BB zum Bruch führt: die Oberflächenschicht platzt in der Umgebung von O von der übrigen Lamelle ab¹⁾. Damit zieht sich die nunmehr entspannte Oberflächenschicht

¹⁾ Die Möglichkeit, daß nach Überschreitung einer kritischen Schubspannung zunächst plastisches Gleiten in der Ebene BB stattfindet, scheidet aus, da die Hauptspaltebene von Glimmer nach allen bisherigen Erfahrungen vollkommen translationsunfähig ist. Das ist z. B. die Ursache dafür, daß er so leicht zerblättert: Die bei Biegung eines Glimmerblättchens in der Hauptspaltebene auftretende Schubspannung bewirkt keine Gleitung, also Biegeplastizität, sondern sofort Verschiebungsbruch, also Aufblättern. (Wegen der hohen Zugfestigkeit parallel zur Hauptspaltebene kann der übliche, durch Normalspannungen verursachte Biegebruch nicht auftreten). — Diese Eigenschaft des

zusammen und der Riß beginnt zu klaffen. Da die Spannungsverhältnisse an der Grenze zwischen dem abgeplatzen und dem noch an der Lamelle haftenden Teil der Oberflächenschicht im wesentlichen dieselben sind, wie sie beim Beginn des Abplatzens an der Stelle *O* waren, so wird sich der Abtrennungsvorgang kontinuierlich wiederholen und immer größere Gebiete um *O* herum ergreifen. Die Rißränder klaffen immer mehr und der Riß wird sichtbar; unter Umständen kann man sogar beide Rißränder einzeln sehen.

18. Wenn nun die Spannungsverhältnisse an der jeweiligen Grenze zwischen dem abgetrennten und dem noch intakten Teil der Oberflächenschicht sich stets reproduzieren, dann wäre zu erwarten, daß der Abtrennungsvorgang, nachdem er einmal losgegangen ist, die ganze Lamelle ergreift. Daß dies nicht der Fall ist, daß das Abplatzen vielmehr im allgemeinen auf die Nachbarschaft des Risses beschränkt bleibt, ist die Folge einer merkwürdigen Eigenschaft des Glimmers.

Zieht man beim Spalten von Glimmer das Messer zurück, so „verheilen“ die beiden Blatthälften (soweit sie nicht von der Klinge verkratzt wurden) wieder, d. h. sie vereinigen sich, ohne eine sichtbare Spur zu hinterlassen. Wie Obreimow (a. a. O.) feststellen konnte, ist die Arbeit, die man zum zweimaligen Auftrennen der verheilten Stelle braucht, beim Spalten in Luft nicht wesentlich kleiner als die zum ersten Spalten notwendige. Nach Untersuchungen des Verfassers beruht das Verheilen nicht etwa darauf, daß die Gitterhälften wieder in die richtige relative Lage kommen; vielmehr verheilen irgend zwei beliebig verschobene oder verdrehte Spaltflächen miteinander; auch wenn man eine Spaltfläche durch Falten oder Zerschneiden sich mit sich selbst berühren läßt, erfolgt Verheilung, ja sogar, wenn man frisch gespaltene Flächen zweier Glimmerblätter verschiedener Herkunft aufeinanderlegt. Ferner ergab sich, daß beim Verheilen die Translationsunfähigkeit der Hauptspaltfläche erhalten bleibt: zwei verheilte Lamellen können nicht gegeneinander verschoben werden.

Dieser Verheilungseffekt tritt nun in der Regel nach der (teilweisen) Lostrennung der Oberflächenschicht von der Lamelle ein. Die um den Riß herum abgeplatze und entspannte Schicht kann an einer Stelle die Lamelle berühren und mit ihr von der Berührungsstelle ausgehend, verheilen. Pflanzte sich nun die Grenze des Abblätterns weiter fort, so kommt die verheilte

Glimmers spielt übrigens eine wichtige Rolle in der Geologie. Beim säkularen Fließen von (kalten) Gesteinsmassen verhält sich Quarz vollkommen plastisch, während Glimmerkörner im Quarz keinerlei plastische Formänderung zeigen und sich wie starre Körper in einer zähflüssigen Masse bewegen.

Fläche wieder unter Schubspannung, entlastet dadurch die gerade noch nicht abgeplatze Stelle und bringt das Abblättern zum Stillstand. Endergebnis des ganzen Vorganges ist also nur ein Klaffen und damit Sichtbarwerden des Risses.

Ist die Lamelle (z. B. wegen ungleichförmiger Druckverteilung zwischen den Klemmen) etwas gewellt, so kommt es vor, daß die Verheilung in den Wellentälern nicht erfolgen kann; einen solchen Fall zeigt Fig. 8. Die mit dem Pfeil bezeichneten hellen parabelförmigen Stellen sind durch die Wellung der Lamelle unverheilt geblieben.

Oft kann man beobachten, daß die Abschälung der Oberflächenschicht mehrere Millimeter lang fortschreitet, bis sie (manchmal ganz plötzlich) mit der Lamelle zusammenheilt.

Die im entspannten Zustande mit der gespannten Lamelle verheilte Oberflächenschicht wird bei Entlastung der Lamelle (z. B. nach dem Zerreißen) unter Druckspannung gesetzt, wodurch eine Krümmung der Lamelle entsteht, ähnlich dem Verhalten eines erwärmten Bimetallstreifens.

19. Wie bereits erwähnt, verhalten sich Lamellen mit geschliffenem, mit geschnittenem und mit Schutzrand ganz verschieden in bezug auf die Ausbildung von Oberflächenrissen und auf die Abschälung der Oberflächenschicht. Bei Lamellen mit geschliffenem Rand sind Oberflächenrisse verhältnismäßig selten zu beobachten; wenn ja, dann nur einige, die auch meist nicht durch die ganze Breite des Bandes hindurchgehen. Merkliche Abschälung kommt nicht vor. Fig. 9 zeigt den Rand eines solchen Bandes mit Oberflächenrissen. Daß solche Risse auch an inneren Trennungsf lächen entstehen können, sieht man aus Fig. 4; aus der Scharfeinstellung des (schief geschliffenen) Randes erkennt man, daß der äußerst feine Riß sich ungefähr in der Mitte des Blattes befindet.

Bei Bändern mit geschnittenem Rand sind Oberflächenrisse sehr zahlreich; die Risse starten vom einen Rand und gehen oft mit bequemer beobachtbarer Geschwindigkeit quer über die Lamelle; sie entspringen offenbar aus Randrissen, welche beim Schneiden mit der Schere entstanden sind (Fig. 11). Die Abblätterung ist sehr stark.

Bei Lamellen mit Schutzrand sind die Querrisse viel feiner; sie befinden sich nur auf dem gespannten Teil, greifen also nicht auf den Schutzrand über. Sie werden in ihrer ganzen Länge gleichzeitig beobachtbar. Die Abblätterung ist nicht so stark wie bei Bändern mit geschnittenem Rand; auch ist die sich abschälende Oberflächenschicht im Durchschnitt viel dünner.

Es entsteht also die Frage, wie dieses verschiedene Verhalten sowie die Verschiedenheit der Spannungen, bei denen die Oberflächenrisse zuerst bemerkbar werden, zu erklären sind?

Zunächst ist es klar, daß die Risse bei Rändern mit geschnittenem und geschliffenem Rand früher auftreten müssen, als bei Blättern mit Schutzrand. Nach Fig. 9 und 11 entstehen sie nämlich hier aus Randrissen, die durch den Bearbeitungsvorgang erzeugt wurden; diese sind viel tiefer als eventuelle Risse der sehr vollkommenen Hauptspaltebene, von der die

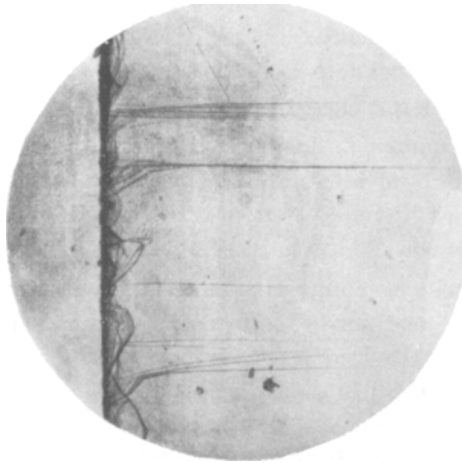


Fig. 11. Risse an einem Glimmerband mit „geschnittenem“ Rand (50mal).

Oberflächenrisse bei Verwendung des Schutzrandes ausgehen; sie können sich also im Sinne der Griffith'schen Betrachtungen schon bei viel niedrigeren Spannungen ausbreiten.

Warum die Reißbildung und Abschälung bei Bändern mit geschnittenem Rand so intensiv ist im Gegensatz zu den Bändern mit geschliffenem Rand, ist auch unschwer einzusehen. Durch die quetschende Wirkung der Scherschneiden blättert sich der Rand weitgehend auf (vgl. die Interferenzfigur in Fig. 7 und 11). Die Randrisse der verschiedenen aufgeblätterten Schichten liegen natürlich nicht genau übereinander, sondern sie sind voneinander unabhängig verteilt. Breitet sich nun ein Randriß einer Schicht nach dem Innern aus, so ist er offenbar auch jenseits der aufgeblätterten Randzone nicht mehr imstande, auf die Nachbarschichten überzugreifen; auch wenn er die angegriffene Schicht vollkommen zertrennt, bleiben noch die Nachbarschichten übrig, die den Zusammenhang der Lamelle in dem betreffenden Querschnitt aufrechterhalten. So kann eine große Zahl von sich über die

ganze Breite erstreckenden Rissen entstehen, ohne daß vollständiges Zerreißen erfolgt.

In Gegensatz hierzu ist der Rand bei geschliffenen Bändern nicht merklich aufgeblättert; ist hier ein ausbreitungsfähiger Riß an einer Stelle des Querschnittes vorhanden, so wird er sich über den ganzen Querschnitt ausbreiten und Bruch herbeiführen, falls er nicht doch auf eine zufällig aufgeblätterte Stelle trifft oder „muschelrig“ auseinanderläuft (s. Fig. 9).

20. Ganz anders liegen die Verhältnisse bei Blättern mit Schutzrand. Hier breiten sich die Risse nicht vom einen Blattrand nach dem anderen hin aus, sondern von der Seitenfläche ausgehend nach Innen hin. Die Tatsache, daß ein Riß sich auf eine Teilschicht der Lamelle beschränkt und nicht über den ganzen Querschnitt ausbreitet, konnte man bei geschnittenen Rändern aus deren Aufblätterung unmittelbar verstehen. Anders beim Schutzrand; hier ist man allein auf den in 17. beschriebenen Mechanismus angewiesen, wenn man die spontane Ablenkung der Querrisse in die Hauptspaltebene erklären will. Es fragt sich, ob diese Vorstellung der quantitativen Prüfung standhält.

Sei $x = AB$ die Tiefe des Oberflächenrisses im Augenblick, wo die Abschälung beginnt (Fig. 10); α die Oberflächenenergie der Hauptspaltfläche je Quadratcentimeter, σ die in der Lamelle herrschende Zugspannung und E der Elastizitätsmodul in der Zugrichtung. Die Arbeit, die bei der Abschälung der Oberflächenschicht zu leisten ist, ist dann 2α erg je Quadratcentimeter. Gleichzeitig entspannt sich die abgeschälte Oberflächenschicht und die in ihr aufgespeicherte elastische Energie wird frei. Ist nun die Oberflächenschicht dünn in Vergleich zur übrigen Lamelle, so muß die bei ihrer Entlastung frei werdende elastische Energie allein die Oberflächenarbeit decken. Diese elastische Energie beträgt $\frac{\sigma^2}{2E} \cdot x$ erg je Quadratcentimeter; die energetische Bedingung für die spontane Ablenkung des Querrisses in die Hauptspaltebene und somit für das Sichtbarwerden des Risses lautet also:

$$2\alpha \leq \frac{\sigma^2}{2E} \cdot x. \quad (3)$$

Die Versuche von Obreimow (bzw. die nach seiner Methode ausgeführten Messungen des Verfassers) lieferten für α den Wert 4500 erg/cm², wenn das Spalten in Vakuum erfolgt (derselbe Wert gilt offenbar für ganz rasches Spalten in Luft) und den Wert 375 erg/cm², wenn man ganz langsam in Luft spaltet. Zwischen diesen Grenzen muß die hier einzusetzende Ober-

flächenenergie liegen. Da $E = 2300000 \text{ kg/cm}^2$ ist und die Spannung, bei der die Oberflächenrisse sichtbar werden, ungefähr 8000 kg/cm^2 , liefert die Formel (3)

$$\begin{aligned} x &= 0,55 \mu, \text{ wenn } \alpha = 375 \text{ und} \\ x &= 6,6 \mu, \text{ wenn } \alpha = 4500 \text{ gesetzt wird.} \end{aligned}$$

In vollkommener Übereinstimmung hiermit liegen die Dicken der abgeblättern Oberflächenschicht bei Lamellen mit Schutzrand etwa zwischen 2 und 4 μ .

21. Aus der geschilderten Entstehungsweise der Oberflächenrisse kann man die Verschiedenheit der Zerreifestigkeiten von Lamellen mit geschliffenem, geschnittenem und Schutzrand zwanglos erklären.

Bänder mit geschliffenem Rand haben die kleinste Festigkeit, weil bei ihnen fast jeder ausbreitungsfähige Riß zum Bruch führt; hier fehlt ja im allgemeinen die Aufblätterung des Randes, die den Riß auf einen Teil des Querschnittes beschränken würde. Andererseits kann hier auch keine „Ausheilung“ des Risses durch spontane Abltterung der betroffenen Oberflächenschicht erfolgen, wie bei Lamellen mit Schutzrand; setzt man nämlich die mittlere Zerreißfestigkeit von 2700 kg/cm^2 in die Formel (3) ein, so ergibt sich mit dem mittleren Wert 2500 erg/cm^2 von α :

$$x = 32 \mu$$

als dünnste Oberflächenschicht, die spontaner Abltterung fähig ist; selbst bei den dicksten untersuchten Lamellen ist das schon fast die Hälfte der Lamellendicke, so daß wegen der Querschnittsschwächung eine Rettung nicht mehr möglich wäre.

Bei *Bändern mit geschnittenem Rand* ist die Festigkeit höher, weil hier ein Riß sich meist auf eine (vom Schneiden her vorhandene) Aufbltterungsschicht beschränkt; die Wahrscheinlichkeit dafür, daß im selben Querschnitt noch andere Schichten gefährliche Risse haben, ist nicht sehr groß, so daß die Spannung unter gleichzeitiger Bildung zahlreicher Risse weiter gesteigert werden kann, bis ein in einem geschwächten Querschnitt vorhandener weniger scharfer Riß ausbreitungsfähig wird.

Am interessantesten sind die Verhältnisse bei *Lamellen mit Schutzrand*. Hier gehen die Risse von der sehr vollkommenen Hauptspaltebene aus. Gäbe es keine spontane Ablenkung von Querrissen in die Hauptspaltebene und also keine sichtbare Querribildung, so würden solche Lamellen offenbar schon unter 8000 kg/cm^2 reißen.. *Da aber bei dieser hohen Spannung schon eine kleine Rißtiefe genügt, um zur Abschälung der betroffenen Oberflächen-*

schicht zu führen, werden die Risse, noch bevor sie tiefer werden könnten, ausgeheilt, so, daß nur eine geringe Querschnittsschwächung übrig bleibt. Die Wahrscheinlichkeit dafür, daß die um den Riß herum entstandene kleine frische Oberfläche einen gefährlichen Riß enthält, ist klein, so daß die Spannung weiter erhöht werden kann.

Die hohe Festigkeit der Glimmerblätter mit Schutzrand entsteht also dadurch, daß die schon bei 8000 kg/cm^2 im Griffithschen Sinne gefährlichen Oberflächenrisse unter Bildung von sichtbaren Rissen spontan in die Hauptspaltebene abgelenkt werden.

22. Die erhaltenen Ergebnisse erlauben es, eine wichtige Frage der Bruchtheorie in diesem Falle zu beantworten, nämlich die Frage, ob die Oberflächenrisse, die den Bruch verursachen, zahlreich oder nur selten sind (z. B. im Verhältnis zum Atomabstand). Die Lockerstrukturhypothese hat beispielsweise ursprünglich angenommen, daß der mittlere Abstand zweier Lockerstellen etwa 10 bis 100 Atomabstände beträgt¹⁾.

Demgegenüber geht aus den obigen Versuchen eindeutig hervor, daß die gefährlichen Risse beim Glimmer *äußerst selten* sind. Bei der Bildung sichtbarer Querrisse kommt es manchmal vor, daß der Querschnitt der Lamelle infolge der Abschälung auf die Hälfte sinkt; die Länge der verjüngten Stelle, deren Spannung damit verdoppelt wird, kann unter Umständen mehrere Millimeter betragen; trotzdem ist es möglich, daß der Bruch an einer anderen Stelle erfolgt, wo die Spannung nur halb so groß ist. Das wäre undenkbar, wenn auf jedem Millimeter Hunderttausende von im Griffithschen Sinne wirksamen Fehlerstellen vorhanden wären.

23. Eine oben schon kurz angedeutete Erscheinung soll noch etwas ausführlicher beschrieben werden. Die Bildung eines Oberflächenrisses erfolgt bei Lamellen mit geschnittenem Rand nicht gleichzeitig auf der ganzen Breite des Bandes; der an einem Rande entstandene Riß strebt vielmehr mit einer Geschwindigkeit, die manchmal nicht größer als einige Millimeter in der Sekunde ist, dem anderen Rand zu. Sobald eine solche besonders langsame Rißausbreitung bemerkt wurde, ist die Last nicht weiter erhöht worden, um die Erscheinung nicht durch die Erschütterung beim Drehen des Triebrades zu stören. In fünf solchen Fällen ist nun die Lamelle etwa eine halbe Minute, nachdem der Riß den anderen Rand erreicht hat, bei ungeänderter Last zerrissen, wobei äußere Erschütterungen keine wesentliche Rolle spielen konnten. Das heißt aber, daß das Zerreißen

¹⁾ Vgl. Phys. ZS. **26**, 923, 925, 1925. (Diskussionsbemerkung von A. Smekal).

hier nicht mehr als *statisches* Phänomen betrachtet werden kann, bei dem der Bruch nach Überschreitung einer (zumindest für eine individuelle Lamelle) ganz bestimmten Spannung eintritt, vorher aber nicht.

Bei technischen Zerreiversuchen an polykristallinen Metallen ist das Vorhandensein einer „dynamischen“, bei stoßweiser Beanspruchung auftretenden und von der „statischen“ abweichenden Festigkeit tatsächlich bekannt; man erklärt sie damit, daß bei der kurzdauernden Belastung das Metall keine plastischen Deformationen erleiden kann. Nach dieser Erklärungsweise (die bei Metallen vielleicht das Wesentliche trifft) sollte man eine solche Erscheinung bei Einkristallen und bei Abwesenheit einer plastischen Deformation nicht erwarten; trotzdem zeigt der erwähnte Verzögerungseffekt offenbar die Existenz einer dynamischen Festigkeit beim Glimmer.

Zur Erklärung dieses Effektes kommen augenscheinlich nur zwei Möglichkeiten in Betracht: Entweder ist die Ursache thermischer Natur oder sie wird durch einen Diffusionsvorgang verursacht in einem sogleich näher zu erörternden Sinne. Eine thermische Wirkung ist aus verschiedenen Gründen nicht wahrscheinlich. Recht zwanglos erklärt sich aber die zeitliche Verzögerung aus der von Obreimow entdeckten Tatsache, daß die zum Spalten von Glimmer notwendige Arbeit in Luft nur etwa ein zehntel so groß ist, wie im vollkommenen Vakuum. Es ist also möglich, daß bei vorgegebenem Spannungszustand sich ein Riß wohl in der Luft, nicht aber im Vakuum ausbreiten kann; durch die Geschwindigkeit, mit der die Luft durch den (im Anfang außerordentlich engen) Riß nachdiffundiert, ist demnach eine Ausbreitungsgeschwindigkeit des Risses gegeben.

Anhang.

Das Zerreißen von Glimmerblättchen durch einen reinen Spaltvorgang.

Versucht man, eine Cellophan- oder Gelatinefolie mit den Fingern vom Rand aus zu zerreißen, so entsteht in den meisten Fällen von selbst ein Schutzrandeffekt von der Art des beim Glimmer künstlich hervorgerufenen: der Rand dehnt sich aus, hebt sich hoch und bildet einen Saum; dadurch wird er entlastet und man braucht große Kräfte, um die Festigkeit des „gesäumten“ Randes zu überwinden. Macht man dagegen vorher einen kleinen Einschnitt mit der Schere, so geht das Zerreißen mit auffallend geringem Kraftaufwand vor sich; die Folie wird dabei nicht im eigentlichen Sinne (praktisch momentan) *zerrissen*, sondern allmählich vom einen Rand bis zum anderen *gespalten*; bei diesem Vorgang legen die Hände einen sehr

großen Weg zurück, so daß eine minimale Kraft ausreicht, um die Trennungsarbeit zu leisten. (Deshalb läßt sich z. B. auch Papier trotz seiner recht hohen Zugfestigkeit so leicht „zerreißen“.)

Besonders ausgeprägt ist die letzterwähnte Erscheinung infolge seiner Starrheit und Sprödigkeit beim Glimmer. Hält man eine Glimmerfolie von $\frac{1}{100}$ mm oder noch geringerer Dicke zwischen den Fingern oder in einer Pinzette, so muß man sich vorsichtig bewegen, damit sie nicht infolge der Luftströmungen von einem Randriß ausgehend zerreißt. Hält man sie zwischen je zwei Fingern beider Hände, so genügt oft das natürliche Zittern

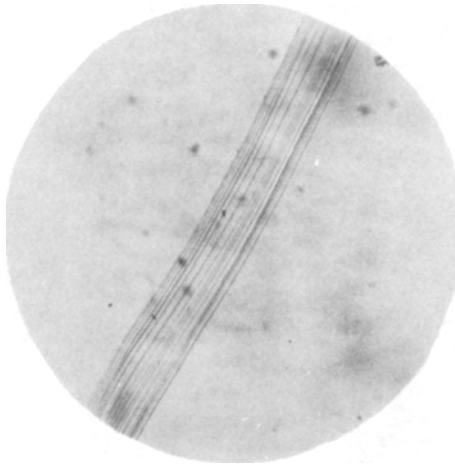


Fig. 12.

der Hände, um die Folie zu zerreißen; dabei fühlt man gar keine Kraft und man hat den Eindruck, als würde das Blatt von selbst zerfallen. Dasselbe Blatt könnte andererseits im Zerreißapparat vielleicht eine Kraft von 50 kg tragen.

Die so entstehenden Rißränder sind Kurven von schwacher, stetiger Krümmung; von der kristallographischen Orientierung sind sie unabhängig. Mit freiem Auge erscheinen sie ganz glatt, fast wie die Ränder der bei hoher Spannung nach Linien der Schlagfigur zerrissenen Lamellen (Fig. 3). Unter dem Mikroskop sieht man aber, daß sie aus vielen Treppenstufen mit fast parallel verlaufender Treppenkante bestehen (Fig. 12); die Steigung der Treppenstufe ist sehr klein und die „waagerechten“ Treppenflächen sind durch die Hauptspaltebene gebildet, so daß der größte Teil der beim Zerreißen entstandenen Flächen Hauptspaltebenen sind. Der Vorgang des zerfallartigen Zerreißens ist also im wesentlichen ein reines Spalten nach der

Hauptspaltebene; wegen der Kleinheit der neugebildeten Oberfläche und des großen Weges, den die Hände beim Reißen zurücklegen, ist die erforderliche Kraft sehr klein.

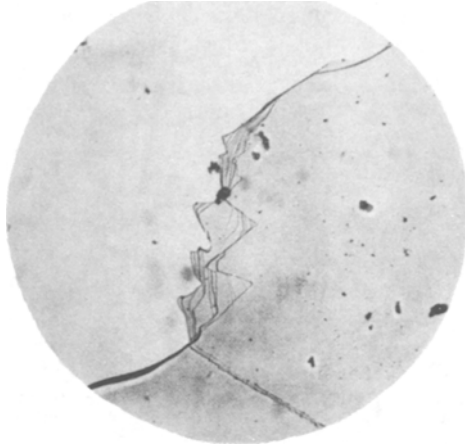


Fig. 13.

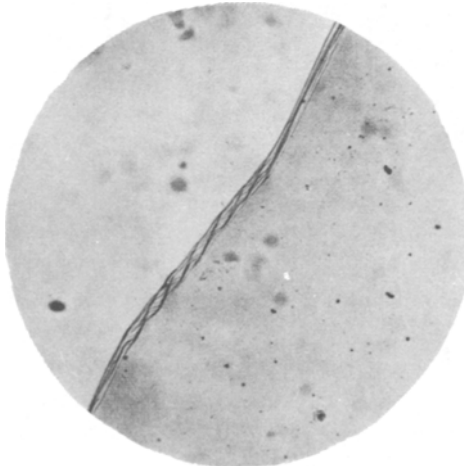


Fig. 14.

Weicht die Rißlinie während des Zerreißen so aus, daß sie in eine in bezug auf die Krafrichtung ungünstige Lage kommt, so geht der Vorgang in das bekannte ruckhafte Zerreißen über. Die hierbei entstehenden Rißränder zeigt Fig. 13; der manchmal beobachtbare Übergang zwischen den beiden Fällen ist eine eigenartige Wellung der Treppe (Fig. 14).

Man könnte fragen, ob die Treppenstufen nicht etwa durch besonders prädestinierte „Lockerebenen“ gebildet werden; oder allgemeiner, ob Glimmer seine ausgezeichnete Spaltbarkeit nicht überhaupt solchen Lockerebenen verdankt. Reißt man ein auf die geschilderte Weise zerrissenes Glimmerblatt nochmals durch, so daß die beiden Risse sich kreuzen, so sollte man in diesem Falle erwarten, daß die beiden Treppensysteme *gemeinsame* Stufen enthalten, falls nur die Lockerebenen nicht viel dichter aufeinanderfolgen als die Treppenstufen. Fig. 15 zeigt die Mikrophotographie eines

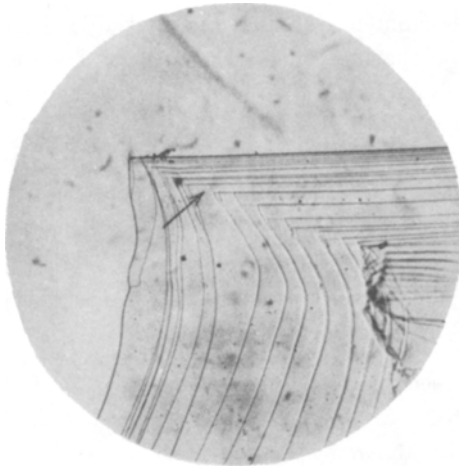


Fig. 15.

solchen Versuchs; der mittlere Abstand zweier Treppenstufen ist $\frac{1}{2} \mu$. Im Originalabzug ist es klar erkennbar, daß keine gemeinsamen Treppenstufen vorhanden sind. Die sich an der mit dem Pfeil bezeichneten Stelle treffenden Stufen haben einen Abstand, der nur ein kleiner Bruchteil des mittleren Stufenabstandes ist; schätzt man ihn auf $\frac{1}{10} \mu$, so würde er 50 Identitätsperioden des Glimmergitters enthalten. Da trotz zahlreicher solcher Versuche nicht ein einziger Fall gefunden wurde, bei dem zwei Treppenflächen zusammenfielen, muß man schließen, daß ein erheblicher Teil aller Gitterebenen Lockerebenen sein mußten, falls es solche überhaupt gibt.

Zusammenfassung.

1. Zugversuche an 20 mm breiten Glimmerbändern ergaben eine mittlere Zerreißfestigkeit von etwa 2700 kg/cm² bei Bändern, die mit der Diamantensäge und etwa 4200 kg/cm² bei Bändern, die mit der Schere

geschnitten wurden. Berücksichtigt man die Querschnittsabnahme infolge der Abschälung einer Oberflächenschicht, so erhält man eine mittlere Festigkeit von etwa 6800 kg/cm^2 bei Bändern, deren Rand mit der Schere geschnitten wurde. Im Gegensatz zu den Versuchen von Rinne war eine Orientierungsabhängigkeit nicht zu bemerken.

2. In einer weiteren Versuchsreihe wurden Lamellen untersucht, die breiter waren als die Zugklemmen und deren Rand aus diesem Grunde spannungsfrei geblieben ist. Hierbei konnten Festigkeiten bis über 30000 kg/cm^2 beobachtet werden.

3. An den gespannten Glimmerlamellen wurde die Entstehung von Oberflächenrissen beobachtet; diese Erscheinung konnte erklärt werden und liefert ihrerseits die Erklärung für die Verschiedenheit der Festigkeiten von Lamellen mit verschiedener Berandung.

4. Die Verzehnfachung der Zugfestigkeit bei der Entlastung des Randes sowie die Entstehungsweise der Oberflächenrisse zeigt, daß die übliche technische Festigkeit von Glimmerbändern ohne Schutzrand nicht durch eine innere Lockerstruktur, sondern durch Risse am Rand bedingt ist. Dieselbe Folgerung ergibt sich aus der Wirkungsweise der Oberflächenrisse für den Fall von Lamellen mit Schutzrand.

Ich freue mich sehr, an dieser Stelle Herrn Prof. Dr. R. Becker, der die Entstehung dieser Arbeit ermöglicht hat, herzlichst danken zu können. Die Arbeit wurde im Mineralogischen Institut der Technischen Hochschule Berlin ausgeführt; dem Vorstand des Instituts, Herrn Prof. Dr. W. Schmidt und seinen Mitarbeitern möchte ich für ihre Gastfreundlichkeit und wertvolle Unterstützung herzlichst danken.

Der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft danke ich bestens für die Überlassung des Schopperapparates.

Berlin-Charlottenburg, Institut für theoretische Physik der Technischen Hochschule.
