Gedruckt mit Unterstützung aus dem Jerome und Margaret Stonborough-Fonds

Über die innere Reibung einiger Metalle

Von
Friedrich Hettwer

(Mit 5 Textfiguren)

Aus dem II. Physikalischen Institut der Wiener Universität

(Vorgelegt in der Sitzung am 19. Februar 1925)

Nachdem bereits W. Weber (1, 2)[1] und Wertheim (3) auf Grund akustischer Versuche mit schwingenden Körpern das Vorhandensein eines inneren Widerstandes bei der Dämpfung nachgewiesen hatten, veranlaßten die Erscheinungen der Dämpfung von Torsionsschwingungen O. E. Meyer (4, 5), den Begriff der inneren Reibung auch bei festen Körpern einzuführen und zu begründen. Im Anschluß an ähnliche Versuche entwickelte F. Kohlrausch (6, 7) eine Theorie der molekularen Änderung bei der Deformation fester Körper. Während O. E. Meyer den Widerstand der Reibung in Metallen in Parallele zur Luftreibung setzte, trat dagegen H. Streinz (8) auf, der bereits an einer Stelle betonte, es sei möglich, daß bei der Metalldämpfung elastische Nachwirkung und innere Reibung von Art der Luftreibung gleichzeitig tätig seien. Seine Ansicht wird in gewissem Sinne auch von Boltzmann (9) geteilt.

Alle diese Arbeiten beziehen sich auf Beobachtungen an schwingenden Körpern, eine Methode, die im folgenden kurz als die »dynamische« bezeichnet werden soll. Als Vertreter einer zweiten Methode, der »statischen«, finden wir zuerst A. v. Obermayer (10). Diesen bringt das Verhalten einiger fester Körper, wie Schwarzpech und Storax, nämlich gegen Stoß spröde zu sein, sich dagegen gegenüber langsam wirkenden Deformationen wie Flüssigkeiten zu verhalten, auf den Gedanken, diese Körper als Flüssigkeiten mit großer innerer Reibung aufzufassen.

Als Fortsetzung der Streinz'schen Gedanken sind auch die Arbeiten von Klemenčič (11, 12) aufzufassen und besonders hat W. Voigt (13, 14) die sorgfältigsten Untersuchungen über die innere Reibung fester Körper nach der dynamischen Methode durchgeführt. Von seinen zahlreichen Versuchen gehorchen nur zwei an Kupfer und Nickel der von ihm aufgestellten Theorie, während ihr die anderen teilweise direkt widersprechen.

Außer Heydweiller (15) arbeiteten auch Reiger (16) und Segel (17) nach der statischen Methode und zeigen schon deutlich die Vorteile dieser vor der dynamischen. Auch zeigt Reiger an Versuchen die außerordentliche Abhängigkeit der Größe der inneren Reibung von der Temperatur.

---

[1] Die nach den Namen in Klammern beigefügten Ziffern bedeuten die Nummer, unter welcher die betreffende Abhandlung in der am Schluß gegebenen Literaturübersicht zu finden ist.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Zur Erklärung der Gletscherbewegungen machten H. Heß (18) und Weinberg (19, 20) Untersuchungen über die innere Reibung des Eises; auf ihre Versuche sowie auf eine von W. Voigt veröffentlichte Arbeit J. Millers (21) werde ich im Laufe meiner Ausführungen noch zurückkommen.

Der Vollständigkeit halber seien noch die Arbeiten von C. Schmidt (22) und von Kei Jokibé und Sukéaki Sakai (27) erwähnt.

Die Berechnung des Koeffizienten der inneren Reibung.

Da bei festen Körpern die Bezeichnung »innere Reibung« nicht nur in der den Flüssigkeiten analogen Weise gebraucht wird, sondern gelegentlich auch, wie z. B. von Ludwik (25) in anderem Sinn, möge hier betont werden, daß unter innerer Reibung nur die zwischen den Teilchen desselben Körpers wirkende Kraft verstanden werden soll, welche ebenso wie die Flüssigkeitsreibung infolge von Geschwindigkeitsdifferenzen innerhalb des Körpers auftritt; wenn die Geschwindigkeit selbst verschwindet, hört dann natürlich auch diese Kraft zu wirken auf.

Bevor an die Ermittlung der inneren Reibung selbst herangetreten werden soll, scheint es nötig, mit einigen Worten ihren Zusammenhang mit der elastischen Nachwirkung zu erwähnen, zu deren Erklärung eine Reihe von Theorien aufgestellt sind. Hier mögen nur die von Warburg (23) und Neesen (24) wegen ihres nahen Zusammenhanges mit der Theorie der inneren Reibung genannt sein.

Bei Deformation eines Körpers zeigt sich immer ein Übergang von einem Gleichgewichtszustand in einen anderen, der als Funktion der Zeit in Betracht gezogen werden muß. Elastische Nachwirkung und innere Reibung nehmen daran ihren Anteil. Da nun die innere Reibung von der Zeit unabhängig ist, während die elastische Nachwirkung allmählich abklingt, läßt sich ihre Trennung und sodann die Bestimmung der inneren Reibung in folgender Weise durchführen. Wir brauchen eine elastische Deformation nur genügend lange auf den Körper wirken lassen und werden zu einem Zustand kommen, der nur mehr von der inneren Reibung bedingt wird.

Zur Erzeugung einer meßbaren Deformation kann man wie bei der Bestimmung der Elastizitätskoeffizienten Durchbiegung oder Torsion von Stäben anwenden. Daß aber in diesem Fall der Torsion der Vorzug gebührt, läßt sich unschwer erkennen, wenn man bedenkt, daß bei der Durchbiegung sowohl lokaler Zug oder Druck an den Angriffspunkten der deformierenden Kraft vorhanden ist, als auch eine Grenze der Durchbiegung durch die allmählich wachsende Krümmung des belasteten Stabes gesetzt ist, während die Torsion kreiszylindrischer Stäbe als bloße Formveränderung eine beliebige Dauer des Versuches gestattet, was zur Bestimmung der inneren Reibung unerläßlich ist.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Das zu erwartende Bild der Torsion ist also folgendes: Die in den ersten Momenten nach Anwendung der tordierenden Kraft auftretende, verhältnismäßig große »elastische« Verdrehung mußte ihre Geschwindigkeit mit der Zeit asymptotisch bis zu einem konstanten Wert verringern und dann stationär mit der so erreichten Geschwindigkeit weiterverlaufen. War dieser Zustand erreicht, d. h. praktisch eine Abnahme der Geschwindigkeit nicht mehr feststellbar, konnte nun an die Bestimmung des Koeffizienten der inneren Reibung geschritten werden.

Wenn sich zwei Schichten eines Körpers parallel zueinander mit verschiedenen Geschwindigkeiten bewegen, so ist die Größe $\mathfrak{K}$ der infolge der inneren Reibung entgegen der Bewegungsrichtung wirkenden Kraft durch die Newtonsche Formel gegeben:

$$\mathfrak{K} = \eta . f . \frac{du}{dz},$$

wobei η der Koeffizient der inneren Reibung, f die Größe der reibenden Schichten und $\frac{du}{dz}$ die Änderung der Geschwindigkeit der Schichten senkrecht zur Bewegungsebene ist.

Wenn wir diese Formel auf die Torsion eines Kreiszylinders anwenden, wo sich die einzelnen Querschnitte auch parallel zueinander bewegen, bekommen wir durch eine einfache Integration das Gesamtdrehmoment der durch die innere Reibung hervorgerufenen Kräfte:

$$\mathfrak{K} = \frac{\pi \omega \eta}{2 l} r^4,$$

wobei r der Radius, l die Länge des Zylinders und ω die Winkelgeschwindigkeit ist, mit welcher die Torsion des Zylinders an einem Ende erfolgt, wenn das andere gleichzeitig festgehalten wird. Damit Gleichgewicht herrscht, muß dieses Drehmoment der inneren Kräfte gleich dem die Torsion erzeugenden Drehmoment sein, das wir durch ein an dem Umfang einer Kreisscheibe vom Radius R wirkendes Gewicht $P = Mg$ darstellen wollen. Also

$$\frac{\pi \omega \eta r^4}{2 l} = M . g . R.$$

Daraus läßt sich η berechnen:

$$\eta = \frac{2 l}{\pi . r^4} \quad M . g . R . \frac{1}{\omega}.$$

Wollen wir noch statt der in absoluten Einheiten ausgedrückten Winkelgeschwindigkeit ω die in Bogengraden wirklich

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

gemessene Winkelgeschwindigkeit w einführen, so erhalten wir schließlich für den Koeffizienten der inneren Reibung:

$$\eta = M.g.R.\ \frac{2\,l}{\pi\,.\,r^4}\ \ \frac{57\cdot 296}{w}\ cm^{-1}\,g\,\sec^{-1}.$$

Da alle vorkommenden Größen der Messung leicht zugänglich sind, liefert uns also die Torsion die Möglichkeit einer absoluten Bestimmung des Koeffizienten der inneren Reibung.

Der Torsionsapparat (Fig. 1).

Der Apparat, mit dem ich die Tordierung der Versuchskörper vornahm und welchen die beigegebene Skizze in seinen wesentlichen Bestandteilen wiedergeben möge, war in eine starke Konsole aus Holz eingebaut, die mittels der beiden Haken H an einer Hauptmauer befestigt war, um mechanische Erschütterungen möglichst fernzuhalten. In dieser Konsole war das zylindrische Messingfutter F_1 durch mehrere starke Schrauben befestigt, während das zweite Futter F_2 konzentrisch auf der Torsionsscheibe verschraubt war. Zwei starke Schraubenspindeln aus Eisen Sp, die mit je zwei stark angezogenen Muttern an der Konsole festgehalten wurden, trugen ein dickes Holzbrett B, das durch zwei Löcher in passender Entfernung über die beiden Spindeln geschoben und ebenfalls durch je zwei Muttern — eine oben und eine unten — festgeklemmt werden konnte. Dadurch war es möglich, für verschiedene Längen der Versuchszylinder eine genaue Einstellung vorzunehmen.

In der Mitte dieses Brettes konnte durch eine daselbst eingelassene Mutter eine Schraube $Schr$, welche oben kegelförmig abgedreht war, hindurchgeführt werden und durch eine mit der Spindel fest verschraubte Scheibe von unten her festgedreht werden. Dadurch, daß sich diese Scheibe fest gegen die Unterseite des Brettes klemmte, war ein für allemal eine fixe Einstellung der Schraube gegeben; ihre Höhe war so abgestimmt, daß die Schnur, welche von der Torsionsscheibe T über die Rollen R_1 und R_2 führte, genau horizontale Lage hatte. Auf der Spitze dieser Schraube konnte nun die Torsionsscheibe T mit Hilfe einer Messingpfanne M aufgesetzt werden, so daß sie sich darauf fast reibungslos drehen ließ. Auf der Oberseite trug sie das bereits erwähnte Futter F_2 und einen konzentrischen Metallring, auf welchem eine Gradeinteilung eingeschnitten war. In der Mitte der Nut, welche der Rand der Scheibe trug, waren die beiden Enden der Schnur, welche die Belastung trug, fest verschraubt. Diese wurde nun über die beiden Rollen R_1 und R_2 geführt, die in passender Höhe an der linken vorderen und rechten hinteren Ecke des Brettes angebracht waren; durch die Rollen R_1' und R_2' wurden die beiden Teile parallel gerichtet. An der Rolle R, die über die Schnur leicht hingleiten konnte, wurde mittels des Bügels D und eines Hakens

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

das Gewicht P angehängt, das vermöge seiner Aufhängung einen nach beiden Seiten gleichmäßigen Zug an der Schnur bewirkte.

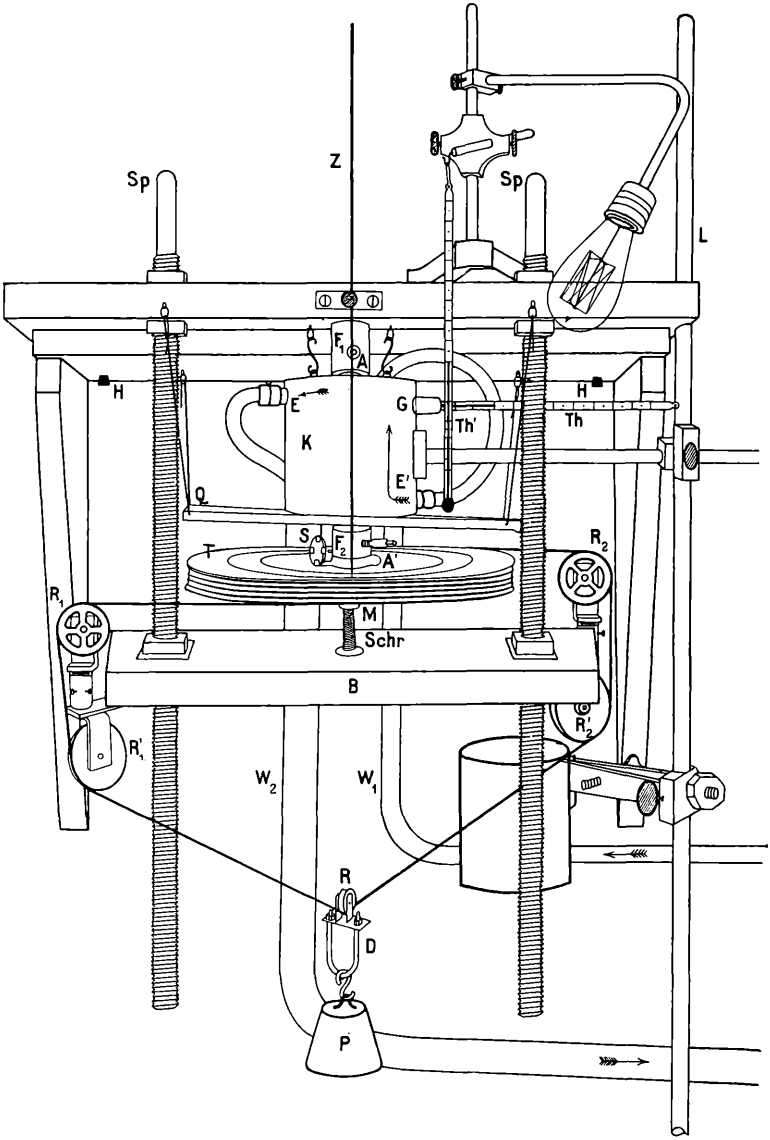

Fig. 1.

Z stellt einen am unteren Ende zugespitzten und rechtwinkelig abgebogenen Zeiger aus Messing dar, der durch eine Schraube am vorderen Rande der Konsole in beliebiger Höhe gehalten und so

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

eingestellt werden konnte, daß er immer über der Kreisteilung auf der Scheibe einspielte.

Die beiden Futter F_1 und F_2 waren starke, zylindrisch abgedrehte Messingklötze, die auf den gegeneinander gekehrten Seiten eine etwa $1^1/_2$ bis 2 *cm* tiefe und 1 *cm* dicke zylindrische Bohrung trugen, in welche die Fassungen an den Enden der Versuchszylinder so hineinpaßten, daß sie gerade noch ohne jeden Zwang eingeführt werden konnten. Die Befestigung dieser Fassungen im Futter geschah durch die beiden Schrauben *A* und *A'*, welche an den Enden vierkantig ausgefeilt waren und mit einem entsprechenden Schlüssel fest angezogen werden konnten.

Um den Versuchskörper auf konstanter Temperatur zu erhalten, war der Kühler *K* angebracht. Er bestand aus zwei konzentrischen Zylindern aus Blech vom Durchmesser 10 *cm* und 1·4 *cm*, die durch ebene Blechplatten oben und unten miteinander verlötet waren. Bei *E* und *E'* waren Schlauchansätze eingelassen, während bei *G* das Thermometer *Th* wasserdicht eingeführt worden war, welches die Temperatur im Innern des Kühlers abzulesen gestattete. Mit Hilfe von Schlauchstücken und den beiden Rohren W_1 und W_2 war der Kühler mit der Wasserleitung und dem Abflusse in Verbindung, so daß durch entsprechende Drosselung der Wasserzufuhr die Temperatur bis auf einige Zehntelgrade konstant erhalten werden konnte; außerdem wurden die Übergangsstellen vom Futter zum Kühler mit Watte abgedichtet.

Da sich infolge der Temperaturdifferenz zwischen dem Wasser im Kühler und der Umgebung häufig starke Niederschläge an dem Kühler und den Schläuchen bildeten, die sich dann in Tropfen von der Oberfläche lösten, war es notwendig, einen Schirm *Q* anzubringen, der die Torsionsscheibe vor den niederfallenden Tropfen schützte. Der Schirm bestand aus Papier, das mit Paraffin überzogen war, hatte umgebogene Ränder und in der Mitte ein nach oben ausgestülptes Loch und wurde schief gegen rechts hinten geneigt aufgehängt in einer aus der Skizze leicht ersichtlichen Weise, damit durch die zu einem Schnabel ausgezogene Ecke das Wasser abfließen konnte.

L ist das obere Ende eines Statives, das auf dem Fußboden aufstand und an der Seitenwand der Konsole verschraubt war. Dieses trug einerseits den Stiel des Kühlers, welcher außerdem noch an zwei starken Haken hing, und anderseits an einer Holzklammer ein Gefäß, in welches das Wasser vom Schirm abtropfen konnte und das sich leicht entleeren ließ.

Ein zweites, kleineres Stativ, das oben auf der Konsole stand, trug das Thermometer *Th'*, das die Ablesung der Zimmertemperatur gestattete, und eine elektrische Lampe zur Beleuchtung der ganzen Apparatur. Beide konnten leicht in die gewünschte Lage eingestellt werden.

Da die Ablesung an der Kreisteilung mit der Lupe nur in der ersten Zeit nach Anhängen des Gewichtes verwendet werden

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

konnte, dann aber Spiegelablesung an ihre Stelle trat, weil die Verdrehungen später sehr klein waren, wurde der Spiegel S auf die Torsionsscheibe aufgesetzt. Er war auf einem schmalen Streifen eines geschlitzten Messingrohres befestigt, der sich so um das Futter F_2 herumlegte, daß der Spiegel während des Versuches ohne die geringste Verdrehung der Scheibe gedreht werden konnte.

Der Vorgang beim Einspannen eines Versuchskörpers war nun folgender: Zuerst wurde Kühler und Schirm gut zentriert festgemacht, dann die Schraube *Schr* zurückgedreht, bis die Torsionsscheibe nicht mehr auf ihr ruhte, sondern auf dem Brette B auflag. Dieses wurde dann durch Lockern der beiden unteren Muttern um die Länge des Versuchszylinders gesenkt. Nachdem dieser im Futter F_2 festgeklemmt und der Spiegel S aufgesetzt war, wurde zuerst die Schraube *Schr* wieder hinaufgedreht und das Brett B soweit gehoben, bis die obere Fassung des Zylinders in F_1 verschwand. Dann wurden alle vier Muttern fest angezogen, wobei sowohl durch Ausmessen als auch durch Drehen der Scheibe die horizontale Lage von B und T und damit die Vertikalstellung des Versuchszylinders genau bestimmt wurde. Nachdem die Schnur auf die Torsionsscheibe aufgedreht, der Zeiger Z in die richtige Höhe gestellt war und die Abdichtungen mit Watte an den Enden des Kühlers vorgenommen waren, wurde die Schraube A im oberen Futter festgedreht und die Belastung P angehängt.

Bei der Herstellung des Apparates mußte beachtet werden, daß die Torsionsscheibe gut symmetrisch war und vor allem die beiden Futter gut zentriert aufsaßen. Da dies beides zutraf, war es möglich, reine Torsion ohne gleichzeitige Verbiegung des Versuchsstäbchens zu erzielen.

Als Fehlerquelle im Apparat kann höchstens die Reibung in den Achsen der vier Rollen angesehen werden, die zur Führung der Schnur dienten; doch wurde diese durch wiederholtes Schmieren so herabgesetzt, daß sie vielleicht die eine oder die andere Ablesung etwas fälschte, auf den wesentlichen Gang der Torsion jedoch kaum störend einwirkte.

Das Beobachtungsmaterial.

Während der Torsionsapparat trotz seiner rohen Ausführung den an ihn gestellten Forderungen in befriedigender Weise Genüge leistete, lagen die Verhältnisse bei dem verwendeten Versuchsmaterial anders. Einerseits waren die Metalle nie chemisch rein, andrerseits litten die durch das Gießen nicht mehr ganz homogenen Substanzen stark durch die mechanische Bearbeitung, die zur Herstellung der zylindrischen Form nötig war.

Um Blei in die brauchbare Stäbchenform zu bringen, wurde es zuerst in ein Papierrohr von etwa 15 *mm* Innendurchmesser gegossen. Aus dem so erhaltenen Stück wurde durch Abfräsen mit einem entsprechend angefeilten Eisenrohr der Zylinder von

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

gewünschter Stärke auf der Drehbank hergestellt. Dieses mühsame Verfahren lieferte nur Stücke von höchstens 10 *cm* Länge, da bei der geringsten exzentrischen Führung des Bohrers der ganze Bleizylinder abgebrochen wurde. Daß nun die Kurve, welche den Verlauf der Torsion dieses so erhaltenen Bleizylinders wiedergibt, verhältnismäßig starke Abweichungen zeigt, muß wohl zum Teil seinen Grund in der mechanischen Bearbeitung haben; wenn auch die Oberfläche von Stäbchen, welche auf diese Weise gewonnen wurden, die beste Homogenität vortäuschte, so waren sicher im Inneren noch Gußporen vorhanden.

Daher wendete ich auch zur Herstellung der Zylinder aus Zinn und den Legierungen ein anderes Verfahren an; und in der Tat lieferten die nach dieser Methode bearbeiteten Metalle viel befriedigendere Kurven als bei Blei. Das Zinn wurde in kleinen Stücken in ein gut kalibrisches, an einem Ende mit Asbest verschlossenes Rohr aus Jenaer Kaliglas gebracht und dieses unter fortwährendem gleichmäßigem Drehen in eine Bunsenflamme gehalten. Wenn dann das ganze Metall geschmolzen war, wurde das über 1 *m* lange Rohr möglichst horizontal geneigt, damit noch vorhandene Luftblasen leicht entweichen konnten, was durch leichtes Klopfen noch gefördert wurde. Hierauf wurde das Rohr wieder vertikal gestellt und in der Nähe der Flamme möglichst langsam abkühlen gelassen, um Spannungen im Inneren zu vermeiden. Wenn die Temperatur unter 100° gesunken war, wurde das Rohr, soweit es das erstarrte Zinn enthielt, rasch in Wasser getaucht, wodurch das Glas so viele Sprünge erhielt, das der Metallzylinder ohne Mühe herausgeschält werden konnte. Das so erhaltene Stück stellte dann einen Zylinder von ziemlicher Homogenität dar, wie sich aus den entsprechenden Kurven schließen läßt.

Die Blei-Zinnlegierungen wurden so hergestellt, daß zuerst eine gewogene Menge Blei und Zinn in einem improvisierten Hesseschen Tiegel — einem Schmelzlöffel, über den eine Kappe aus Blech mit einem Zuführungsrohr gestülpt wurde — zu einer möglichst gut gemischten Legierung vereinigt wurde. Durch das durchströmende Leuchtgas, das am Rande des Löffels wegbrannte, wurde die Oxydation vermieden und der Prozentgehalt der abgewogenen Menge in der Legierung gewahrt, die dann genau wie das Zinn weiter verarbeitet wurde.

Was das Zink betrifft, verwertete ich eine Bemerkung von W. Voigt in einer seiner bereits erwähnten Arbeiten, daß nämlich gegossenes, chemisch reines Zink sich sehr porös und brüchig zeigt, und begnügte mich daher mit gewöhnlichem käuflichen Zink, das ich schon in passender Stangenform bekommen konnte und ohne weiteres zu meinen Versuchen verwendete, was ich nicht bereuen durfte, wie ein Blick in die Zinkkurve beweist.

Gar nicht orientiert bin ich über die Herkunft des von mir gebrauchten Aluminiums, das ich schon in der Form vorfand, wie ich es tordierte, nämlich als starken Draht. Wenn nun aber

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Aluminium fast nie reiner als 97prozentig dargestellt wird und das Gemisch, welches Eisen, Silicium und Kohlenstoff enthält, nie homogen ist, so muß wohl auch die Kurve genügend befriedigend sein, die den Beobachtungen an Aluminium entspricht, zumal der benützte Draht an manchen Stellen nicht einmal vollkommen kreisförmigen Querschnitt aufwies.

Auch noch andere Metalle auf ihre innere Reibung zu untersuchen, wie z. B. Kadmium und die weichen Edelmetalle, wäre interessant und die Mühe lohnend gewesen, doch gestattete ihr hoher Preis dem physikalischen Institut nicht die Anschaffung.

Die Versuchszylinder hatten alle mit Ausnahme des Aluminiums einen Durchmesser von ungefähr 8 *mm*, während die Länge 10 bis 14 *cm* betrug. Die Abmessung der Dicke wurde an mehreren Stellen gemacht in der Entfernung von 1 *cm*, wobei auch immer die Richtung gewechselt wurde. Aus diesen Durchmessern wurde dann für die Rechnung das Mittel genommen.

Um eine Kontrolle zu haben, daß sich der Zylinder bei den Versuchen in den Fassungen nicht gedreht hatte, wurden über den Rand der Fassung und den heraustretenden Zylinder mit Tintenstift einige Striche gezogen, die sich bei der Tordierung des Zylinders an der Grenze der Fassung nicht verschieben durften. Ferner zog ich auf jedem Zylinder noch einige achsenparallele Striche über die ganze Länge, um zu sehen, ob nicht etwa die Verdrehung unsymmetrisch über die Länge sich verteilte, was sich durch einen Knick in den Schraubenlinien hätte zeigen müssen, in welche die Striche nach der Torsion übergegangen waren. Solche Knicke fanden bei reinen Metallen nicht statt, nur bei den Legierungen konnte ich sie öfter wahrnehmen, worauf ich später noch zurückkommen werde.

Die Versuchsreihen für reine Metalle.

Bevor an die Ausführung exakter Versuche geschritten werden konnte, mußten erst einige orientierende Vorversuche unternommen werden. Teils dienten sie dazu, um nur überhaupt eine Orientierung über die zu verwendenden Maße zu bekommen, teils mußten sie bei jedem einzelnen Metall angestellt werden, um die passende Belastung zu finden; da nämlich dem tordierenden Gewicht nur ein beschränkter Fallraum von ungefähr 130 *cm* zu Gebote stand, mußte dieses so gewählt werden, daß während der möglichen Verdrehung einerseits die elastische Nachwirkung verklungen war und andrerseits für die Verdrehung zur Bestimmung der inneren Reibung ein möglichst großer Effekt zustande kam, was nur experimentell gefunden werden konnte.

Einen Vorversuch an Aluminium benützte ich auch, um den Einfluß der Temperatur festzustellen und die Notwendigkeit einer Maßnahme zur Erhaltung konstanter Temperatur zu bestätigen — die Vorversuche waren nämlich alle noch ohne Kühlvorrichtung

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

angestellt; die Kurve, welche die Torsion darstellte, zeigte an der Übergangsstelle von 10° C zu 25° C einen derart großen Unterschied in der Steigung, daß in Zukunft auf Konstanz der Temperatur geachtet werden mußte.

Nun konnte bei Anwendung des Kühlers nie die Temperatur direkt gemessen werden, welche der Probekörper im Innern wirklich hatte, sondern nur die Temperatur des Wassers im Kühler selbst. Um mich über die Beziehungen zwischen diesen beiden Temperaturen zu orientieren, führte ich statt eines Metallstäbchens ein Thermometer ein, das mit dem im Kühler eingesenkten gleiche Temperatur zeigte, und beobachtete den zeitlichen Verlauf, den das Thermometer im Innern zeigte, wenn durch den Kühler Wasser strömte. Auf Grund mehrerer Versuche, die ich absichtlich unter schlechteren Bedingungen vornahm, als bei den Metallen vorhanden waren, — schlechte Abdichtung gegen außen, Temperaturen bis unter 8° C, während bei den eigentlichen Versuchen die Temperatur 9° C betrug, usw. — konnte ich feststellen, daß im Innenraum wirklich dieselbe Temperatur herrschte, die das Wasser im Kühler an dem eingesenkten Thermometer zeigte; eine Änderung der Temperatur folgte mit einer Verzögerung von höchstens 15 bis 20 Minuten.

Um nun den Reibungskoefffzienten η nach der Formel

$$\eta = M.g.R.\frac{2\,l}{\pi\,r^4}\;\frac{57\cdot 296}{w}$$

zu berechnen, wobei R, der Radius der Torsionsscheibe, bei meinen Versuchen 13·3 *cm* betrug, mußte durch die Torsion die Winkelgeschwindigkeit w bestimmt werden.

Dazu beobachtete ich die Verdrehungen, welche der Versuchszylinder durch die tordierende Kraft erlitt. Diese, in den ersten Momenten nach Anhängen des Gewichtes besonders groß, nahmen mit der Zeit mehr und mehr ab, bis sie schließlich mit einem konstanten Wert verliefen. Den besten Überblick erhalten wir durch eine graphische Darstellung, wo die Abszissen die Zeit und die Ordinaten die entsprechenden Verdrehungen darstellen. Eine solche Kurve würde zuerst rasch ansteigen und dann allmählich in eine Gerade übergehen. Wegen der langen Dauer eines solchen Versuches läßt sich nun diese Kurve, wenn sie nicht nur qualitativ orientieren soll, schwer in einem Stück darstellen, da sie dann auf Genauigkeit keinen Anspruch machen kann. Deshalb zerlegte ich sie in einzelne Kurven, von denen jede den Verlauf der Torsion während eines Tages darstellt, welche ich dann in der Zeichnung übereinander anordnete. Diese Zerlegung hat auch den Vorteil, daß sie durch die während der Nachtzeit erfolgte Torsion, wo die Temperatur nicht konstant gehalten werden konnte, wenn auch durch den Kühler Tag und Nacht ununterbrochen Wasser strömte, nicht störend auf den Verlauf der Kurve einwirkt.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Bei dieser Darstellung mußten die Teile der Kurve, welche die Verdrehung nach Abklingen der elastischen Nachwirkung darstellen, als parallele Gerade auftreten, was in der Tat zutrifft. Mit der graphischen Darstellung wurde immer erst dann begonnen, wenn an Hand der von Beginn der Torsion an tabellarisch festgelegten Ablesungen geschlossen werden konnte, daß die elastische Nachwirkung bereits stark nachgelassen hatte.

Die innerhalb dieser parallelen Geraden liegenden Verdrehungen wurden dann zum Mittel vereint und mit der daraus bestimmten Winkelgeschwindigkeit w wurde in die Formel eingegangen.

Im folgenden sind nun diese graphischen Darstellungen und die für die Formel notwendigen Daten sowie die schließlich berechneten Koeffizienten der inneren Reibung wiedergegeben:

a) Blei (Fig. 2):

$$l = 8 \cdot 4\ cm,\ 2\,r = 0 \cdot 80\ cm,\ M = 472 \cdot 5\ g,\ w = \frac{0 \cdot 5620}{60^2}\ \text{grad/sec.}$$

Daraus: $\eta = 4 \cdot 7\ \ 10^{14}$.

b) Zinn (Fig. 3):

$$l = 13 \cdot 5\ cm,\ 2\,r = 0 \cdot 80\ cm,\ M = 472 \cdot 5\,g,\ w = \frac{0\ \ 17611}{60^2}\ \text{grad/sec.}$$

Daraus: $\eta = 2 \cdot 4 . 10^{15}$.

c) Aluminium (Fig. 4):

$$l = 14\ \ 7\ cm,\ 2\,r = 0 \cdot 396\ cm,\ M = 756 \cdot 4\,g,\ w = \frac{0 \cdot 16056}{60^2}\ \text{grad/sec.}$$

Daraus: $\eta = 7 \cdot 5 . 10^{15}$.

d) Zink (Fig. 5):

$$l = 11 \cdot 7\ cm, 2\,r = 0 \cdot 785\ cm, M = 2816 \cdot 2\,g, w = \frac{0 \cdot 0710142}{60^2}\ \text{grad/sec.}$$

Daraus: $\eta = 3 \cdot 2 . 10^{16}$.

Die innere Reibung bei Legierungen.

Nachdem ich die Koeffizienten der inneren Reibung für einige Metalle bestimmt hatte, wollte ich auch Legierungen darauf hin untersuchen, die ja durch ihr singuläres thermodynamisches Verhalten charakterisiert sind, ob dem Verlauf der Kurve ihrer Schmelzpunkte bei verschiedenprozentiger Zusammensetzung auch ein singuläres mechanisches Verhalten in bezug auf die innere Reibung entspricht.

Als Komponenten der Legierung wählte ich Blei und Zinn, weil ich deren Reibungskoeffizienten schon bestimmt hatte und in

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

den Legierungen aus diesen beiden Metallen die Depression des eutektischen Punktes besonders stark zutage tritt.

Was ich nun an diesen Versuchen, die an mehr als zehn verschiedenen Stäbchen vorgenommen worden waren, beobachten konnte, war folgendes: Wenn ich die Torsion an den Stäbchen, welche dieselben Dimensionen aufwiesen wie die Blei- und Zinnstäbchen, durch ein Gewicht tordierte, das meist noch größer war als bei den mit diesen reinen Metallen ausgeführten Versuchen,

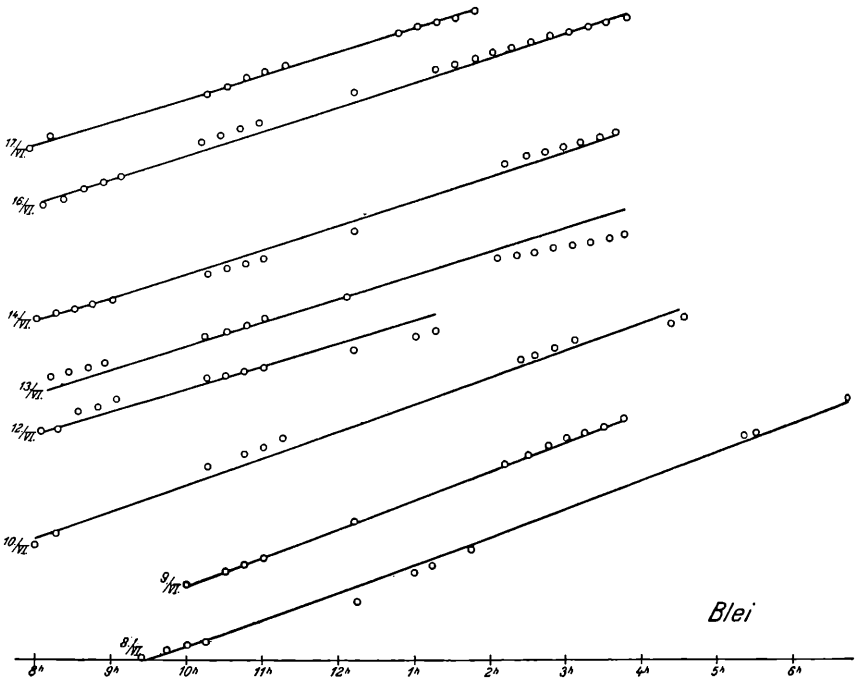

Fig. 2.

zeigte sich bald, daß die Verdrehung rasch abnahm und nach kurzer Zeit überhaupt unmeßbar gering war. Brachte ich dagegen eine stärkere tordierende Kraft in Anwendung, so war eine Abnahme der Torsionsgeschwindigkeit kaum zu bemerken, dafür wurden aber die tordierten Stäbchen entweder während des Versuches selbst abgedreht oder wenigstens derart verkrümmt, daß keine reine Torsion mehr zustande kommen konnte. Das erkannte ich immer leicht daran, daß sich die Torsionsscheibe schief stellte und das Bild der Skala aus dem Fernrohr verschwand. Brach ich den Versuch unter diesen Umständen sogleich ab, so zeigte der Zylinder eine unregelmäßige Torsion, was sich aus den Knicken erkennen ließ, welche die vorher achsenparallel gezogenen Striche nach der Torsion

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

aufwiesen. Außerdem war an diesen Stellen meist eine mehr oder minder tiefe Einschnürung vorhanden und zeigte der Probekörper dort die Erscheinungen des Fließens, wie sie allgemein bei Beanspruchung von Metallen eintreten, bevor der Bruch stattfindet.

In diesem Zusammenhang will ich auch auf einen Vorversuch an Messing zurückkommen. Nach der anfangs großen elastischen Verdrehung, die ziemlich schnell abnahm, hatte der tordierte Messingdraht nach einem Tag eine Verdrehung erlangt, die sich dann im Laufe von 4 Tagen nicht mehr fortsetzte. Dieselbe Erscheinung nahm ja auch G. Dimmer (26) an der Veränderung von

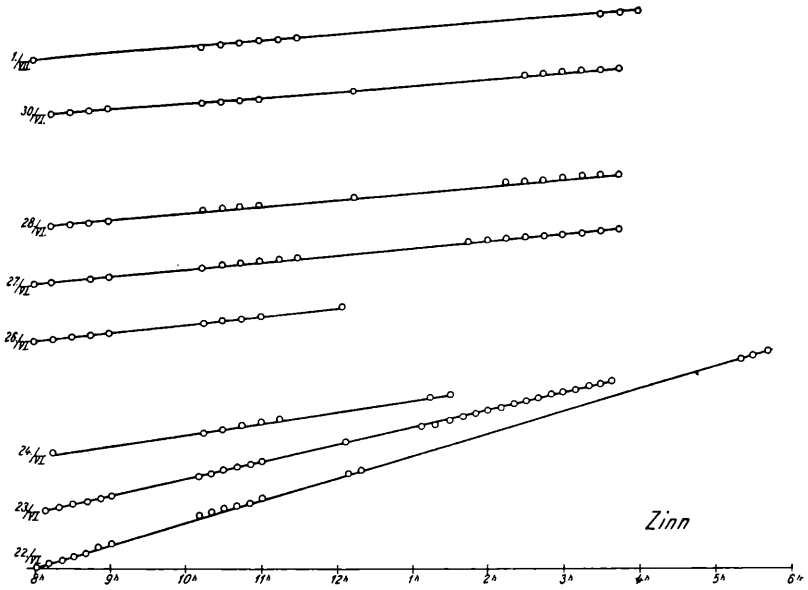

Fig. 3.

Maßstäben aus Messing wahr, wenn sie aufgehängt oder in Auflagen unterstützt wurden; ihre elastische Drehung oder Verbiegung hörte nach einiger Zeit plötzlich auf.

Bei den Legierungen, deren ganzer Aufbau ja viel komplizierter ist als bei den reinen Metallen, sind also auch die Erscheinungen der elastischen Nachwirkung und inneren Reibung noch bedeutend verwickelter.

Zu quantitativer Bestimmung der inneren Reibung von Legierungen sind diese Versuche demnach nicht geeignet und lassen höchstens den Schluß zu, daß diese bedeutend größer ist als die innere Reibung der Komponenten.

Zum Schluß will ich noch die von mir bei 9° C bestimmten Koeffizienten der inneren Reibung, nämlich

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

für Blei $\eta = 4 \cdot 7 . 10^{14}$
Zinn $\eta = 2 \cdot 4 . 10^{15}$
Aluminium $\eta = 7 \cdot 5 . 10^{15}$
Zink $\eta = 3 \cdot 3 . 10^{16}$

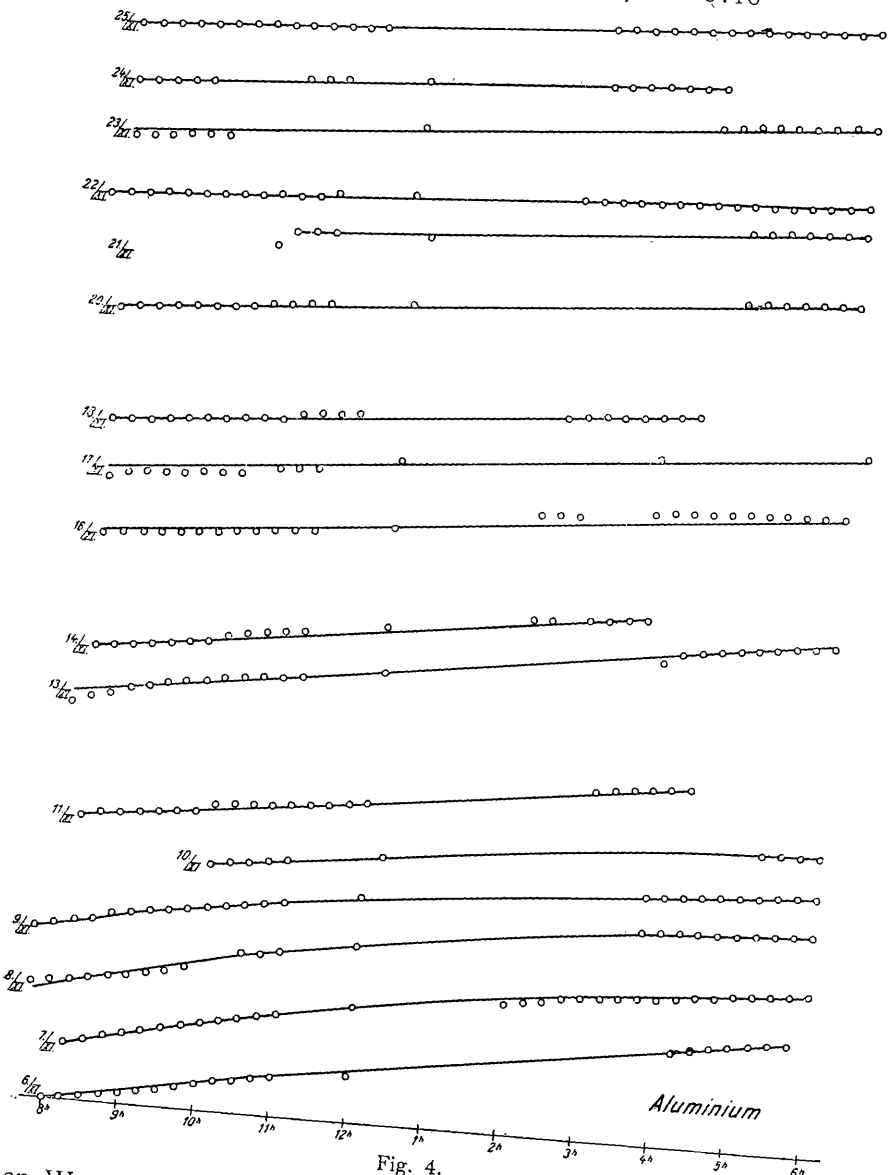

Fig. 4.

den Werten gegenüberstellen, wie sie in den eingangs erwähnten Arbeiten gefunden worden waren:

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Obermayer (10) gibt an bei 15° C für Schwarzpech.....η = 4.10^9,
» Storax .....η = 134.10^9.
Nach Heydweiller (15) ist für festes Menthol bei 38·7° .....$\eta_{38\cdot7}$ = $0\cdot29.10^{10}$,
» 14·4° .....$\eta_{14\cdot4}$ = 209.10^{10}.
An Kolophonium bestimmte Reiger (16) bei 46° .....η_{46} = 3.10^{12},
» 12° .. ..η_{12} = 1.10^{17}.
Bei Versuchen mit Eiszylindern fand Weinberg (19, 20) bei —5°..η = 5.10^{13}.
Heß (18) fand für Eis 6300 sec nach Beginn der deformierenden Kraft η_{6300} = $3\cdot7.10^{11}$,
» Eiszement 8000 sec nach Beginn der deformierenden Kraft.....η_{8000} = 120.10^{11},
» metallisches Zinn 11340 sec nach Beginn der deformierenden Kraft.....η_{11340} = $7\cdot4.10^{13}$.

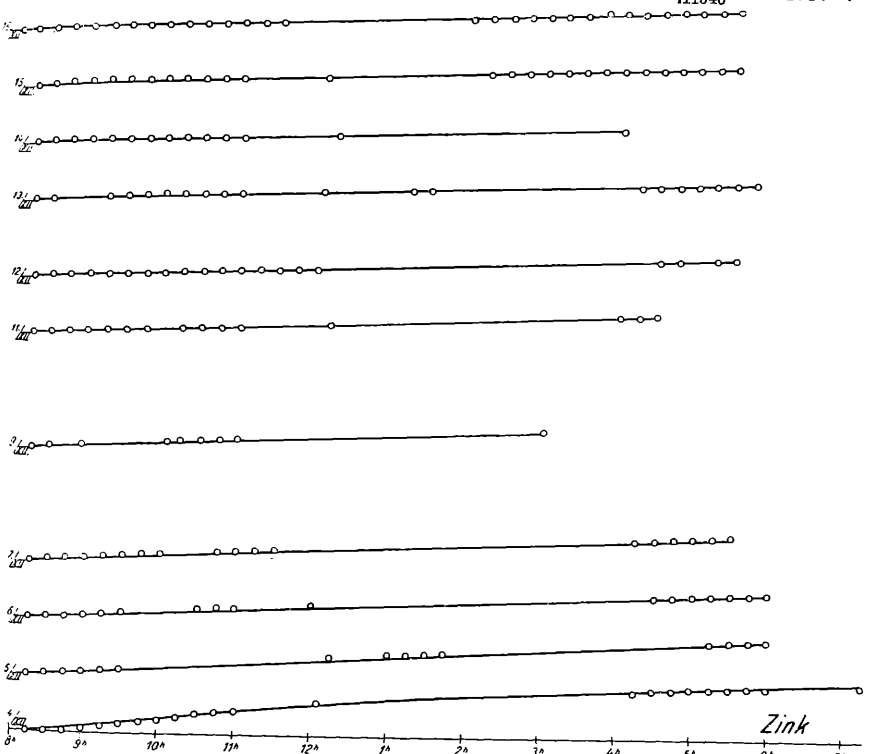

Fig. 5.

Diese Versuche von Heß bezogen sich auf Durchbiegung von Stäben. Seine Feststellung, daß der Koeffizient der Reibung proportional der Dauer der Beanspruchung wächst, erklärt sowohl bei Eis den kleinen Wert von η im Vergleich zu Weinberg, als auch die Differenz in der Größenordnung gegenüber meinen Versuchen bei Zinn. Heß hat eben elastische Nachwirkung und innere Reibung nicht getrennt und seine Beobachtungen alle nur über Zeiträume erstreckt, wo die Wirkung der ersteren die der inneren Reibung noch weit übertraf.

Segel (17) bestimmte für Siegellack $\eta = 9\cdot5.10^{10}$ und $\eta = 11\cdot5.10^{10}$.

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

Alle diese Werte, die sämtlich nach statischen Methoden bestimmt wurden, stehen in gutem Einklang mit den von mir gefundenen Koeffizienten. Einfacher als meine Versuche gestalteten sich diese freilich dadurch, daß bei den verwendeten Substanzen die elastische Nachwirkung fast keine Rolle spielte außer bei Eis und Zinn, wo dann aber ihre Vernachlässigung die Werte erheblich fälschte.

In krassem Widerspruch stehen dagegen meine Resultate mit den nach der dynamischen Methode aus Schwingunsversuchen bestimmten Reibungskoeffizienten, deren Werte ja schon durch den Vergleich mit den eben angeführten Werten nach statischen Methoden unmöglich erscheinen.

Hatte zuerst O. E. Meyer (5) für Messing $\eta = 3.10^8$ gefunden, so widersprechen dem schon die Versuche von W. Voigt (13, 14), denen zufolge Messing eine besonders kleine innere Reibung hat, — aus den statischen Versuchen ergibt sich gerade das Gegenteil — während er selber für Kupfer $\eta = 3 \cdot 73.10^6$ und für Nickel $\eta = 12 \cdot 5.10^6$ fand. Daß von den vielen Versuchen, die er an verschiedenen Metallen anstellte, nur diese beiden überhaupt eine Bestimmung des Reibungskoeffizienten gestatten, spricht auch sehr gegen seine Methode.

Viel zu klein sind auch die Werte, die Kei Jokibé und Sukéaki Sakai (27) aus der Abnahme von Torsionsschwingungen fanden:

	Zn	Al	Au	Ag	Cu	Ni	Fe	W
$\eta.10^{-8}$.....	410·7	25·50	17·00	12·5	6·70	1·65	12·89	9·37
Temperatur	22	15	15	13	22	16	16	16° C

	Stahl (0·55% C)	Stahl (0·9% C)	Stahl (1·3% C)	Pt-Rh	Pt.
$\eta.10^{-8}$.....	12·90	7·70	9·82	4·19	1·75
Temperatur	22	16	19	17	15° C.

Zuletzt will ich noch kurz auf die von Voigt mitgeteilten Versuche J. Millers (21) hinweisen, die dieser mit dem von Voigt benützten Apparat an Legierungen von Cadmium-Zink anstellte, jedoch nicht ganz zu Ende geführt hat. Das Ergebnis dieser Versuche war die Feststellung, daß die innere Reibung dieser Legierungen größer ist als die der reinen Metalle. Koeffizienten konnte er nicht angeben, wenn er auch einen umgekehrten Parallelismus zwischen den Kurven der inneren Reibung und derjenigen der Schmelzpunkte zu finden glaubt, was ich jedoch mehr auf die Einwirkung der elastischen Nachwirkung zurückführen möchte, deren Trennung von der inneren Reibung bei dieser Methode eben nicht durchgeführt werden konnte.

Zum Schluß darf ich nicht unterlassen, den Herren Professor G. Jäger, von welchem ich die Anregung und wertvolle Anleitungen zu meiner Arbeit erhalten habe, und Prof. E. Haschek, welcher

©Akademie d. Wissenschaften Wien; download unter www.biologiezentrum.at

mir beim Aufbau der Apparatur mit Rat und Tat Unterstützung angedeihen ließ, für ihre Bemühungen meinen schuldigen Dank auszusprechen.

Literaturübersicht.

1. W. Weber, Über die Elastizität der Seidenfäden. Pogg. Ann., *34*, S. 247, 1835.
2. — Über die Elastizität fester Körper. Pogg. Ann., *54*, S. 1, 1841.
3. Wertheim, Torsionsschwingungen eines elastischen Stabes. Berl. Ber. 1848, S. 91.
4. O. E. Meyer, Über die Reibung der Flüssigkeiten. Pogg. Ann., *113*, S. 55, bes. 77, 1861.
5. — Über die elastische Nachwirkung. Wied. Ann., *4*, S. 249, bes. 262 ff., 1878.
6. F. Kohlrausch, Über die elastische Nachwirkung bei Torsion. Pogg. Ann., *119*, S. 337, 1863.
7. — Beiträge zur Kenntnis der elastischen Nachwirkung. Pogg. Ann., *128*, S. 413, 1866.
8. H. Streinz, Über die Dämpfung der Torsionsschwingungen Drähten. Wiener Ber., *69*, S. 337, 1874.
9. L. Boltzmann, Zur Theorie der elastischen Nachwirkung. Wiener Ber., *70*, S. 275, 1874 und Pogg. Ann, Erg.-Bd. *7*, S. 624, bes. 654, 1876.
10. A. v. Obermayer, Ein Beitrag zur Kenntnis der zähflüssigen Körper. Wiener Ber. *75*, II, S. 665, 1877.
11. J. Klemenčič, Beitrag zur Kenntnis der inneren Reibung im Eisen. Wiener Ber., *78*, S. 935, 1878.
12. — Beobachtungen über die Dämpfung der Torsionsschwingungen durch innere Reibung. Wiener Ber., *81*, S. 791, 1880.
13. W. Voigt, Über die innere Reibung der festen Körper, insbesondere der Krystalle. Abhandlung d. Gött. Ges., *36*, 1889, gekürzt in Wied. Ann., *47*, S. 671.
14. — Bestimmung der Konstanten der Elastizität und Untersuchung der inneren Reibung für einige Metalle. Abhandlung d. Gött. Ges., *38*, 1891, gekürzt in Wied. Ann., *48*, S. 669.
15. A. Heydweiller, Zur Bestimmung der inneren Reibung fester Körper. Wied. Ann. *63*, S. 56, 1897.
16. R. Reiger, Innere Reibung plastischer und fester Körper. Phys. Zeitschr., *2*, S. 213, 1901.
17. M. Segel, Über eine Methode zur Bestimmung der inneren Reibung fester Körper. Phys. Zeitschr., *4*, S. 493, 1903.
18. H. Heß, Elastizität und innere Reibung des Eises. Ann., *8*, S. 405, 1902.
19. B. Weinberg, Über die innere Reibung des Eises. Ann., *18*, S. 81, 1905.
20. — Über die innere Reibung des Eises, II. Ann., *22*, S. 321, 1907.
21. J. Miller, Einige Beobachtungen über die Elastizität und innere Reibung von Legierungen aus Cadmium und Zink. Phys. Zeitschr., *9*, S. 256, 1908.
22. C. Schmidt, Untersuchung der inneren Reibung verschiedener Stahlsorten mittels erzwungener Torsionsschwingungen prismatischer Stäbe., Beibl. *36*, S. 605, 1912.
23. Warburg, Über das Gleichgewicht eines Systems ausgedehnter Moleküle und die Theorie der elastischen Nachwirkung. Wied. Ann., *4*, S. 233, 1878.
24. Neesen, Über elastische Nachwirkung. Pogg. Ann., *157*, S. 579, 1876.
25. P. Ludwik, Über die Änderung der inneren Reibung der Metalle mit der Temperatur. Zeitschr. f. physikal. Chemie, *91*, S. 232, 1916.
26. G. Dimmer, Bestimmung des Längenunterschiedes eines metallenen Meterstabes in horizontaler und vertikal hängender oder unterstützter Lage. Wiener Ber., *129* [2a], S. 223, 1920.

Kei Jokibé und Sukéaki Sakai, The Effect of Temperature on the Modulus of Rigidity and on the Viscosity of Solid Metals. Phil. Mag. (*6*), *42*, S. 397, 1921.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse

Jahr/Year: 1925

Band/Volume: 134_2a

Autor(en)/Author(s): Hettwer Friedrich

Artikel/Article: Über die innere Reibung einiger Metalle 51-67