

Sitzungsberichte

der

mathematisch-physikalischen Klasse

der

Bayerischen Akademie der Wissenschaften

zu München

Jahrgang 1923

München 1923

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

in Kommission des G. Franz'schen Verlags (J. Roth)



Sitzungsberichte

der

mathematisch-physikalischen Klasse

der

Bayerischen Akademie der Wissenschaften

zu München

1923. Heft I

Januar- bis März Sitzung

München 1923

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

in Kommission des G. Franz'schen Verlags (J. Roth)



Der Schubmesser. Ein neues Feinmessgerät für Festigkeitsversuche.

Von A. Föppl.

Vorgelegt in der Sitzung am 3. März 1923.

Das bekannteste und weitaus wichtigste Instrument zur Ausführung genauer Messungen der elastischen Formänderung, die ein Körper unter einer Belastung erfährt, ist der Dehnungsmesser. Dem Vorgänger in meinem Lehramte, Johann Bauschinger, gebührt das Verdienst, den ersten sehr vielseitig verwendbaren Dehnungsmesser konstruiert zu haben, mit dem man die Längenänderung einer Strecke von einigen cm Länge bis auf etwa 0,1 Mikron genau messen kann. Ausgeführt wurde der Bauschingersche Dehnungsmesser von seinem Assistenten C. Klebe, der ein geschickter Feinmechaniker war und der mir später noch viele Jahre lang treue Dienste geleistet hat. Später hat Martens, der damalige Direktor des Berliner Materialprüfungsamtes einen in den Einzelheiten sehr verfeinerten Dehnungsmesser angegeben, der aber sonst in der Hauptsache mit dem von Bauschinger übereinstimmte. Heute wird der Dehnungsmesser meist in der ihm von Martens gegebenen Gestalt benützt.

So nützlich und brauchbar der Dehnungsmesser aber auch ist, läßt er doch immer noch den Wunsch nach einem zweiten Meßgerät offen, mit dem es möglich sein müßte, unmittelbar die elastische Winkeländerung zu messen, die ein ursprünglich rechter Winkel bei der Formänderung eines Körpers erfährt. Man denke sich nämlich im ursprünglichen Zustande des Körpers von einem Punkt 1 aus zwei rechtwinklig zueinander stehende Strecken nach irgend zwei Nachbarpunkten 2 und 3 gezogen. Der durch die drei Punkte bestimmte Winkel $\angle 213$ erfährt bei der Formänderung

des Körpers im allgemeinen eine kleine Winkeländerung γ und die Aufgabe des Instruments, das als ein Schubmesser bezeichnet werden kann, besteht darin, diese Winkeländerung mit genügender Genauigkeit zu messen.

Wenn man annehmen darf, daß der Stoff, aus dem der Körper besteht, isotrop ist und daß er dem Hookeschen Elastizitätsgesetze gehorcht, besteht zwischen der Schiebung γ und der Schubspannung τ , die in den durch 12 und 13 beschriebenen Schnittrichtungen übertragen wird, der einfache Zusammenhang

$$\gamma = \frac{\tau}{G},$$

worin G den „Schubmodul“ bedeutet, d. h. dieselbe Größe, die nach dem Vorgange von Kirchhoff und von Hertz von den Physikern häufig mit dem Buchstaben K bezeichnet und auch „Starrheitsmodul“ (modulus of rigidity) genannt wird.

Sobald es gelingt, bei einem Festigkeitsversuche γ genau genug zu messen, nämlich ungefähr so genau wie die elastische Dehnung mit dem Dehnungsmesser, vermag man auf Grund dieser Gleichung entweder bei bekanntem Spannungszustande den Schubmodul G aus dem Messungsergebnisse abzuleiten oder umgekehrt bei gegebenem Schubmodul auf die Schubspannung τ zu schließen, die in den durch die Winkelschenkel 12 und 13 angegebenen Schnittrichtungen übertragen wird. Ein Instrument, das die gestellte Forderung erfüllt, vermag daher für viele Zwecke, die man bei Festigkeitsversuchen anstrebt, sehr wertvolle Dienste zu leisten.

Schon vor vielen Jahren, nämlich bald nachdem ich als Nachfolger von Bauschinger die Leitung des mechanisch-technischen Laboratoriums der hiesigen technischen Hochschule übernommen hatte, habe ich mich um die Lösung der Aufgabe, ein brauchbares Instrument dieser Art zu konstruieren, selbst sehr ernsthaft bemüht. Dabei wurde ich von dem schon genannten C. Klebe unterstützt. Damals war uns aber kein Erfolg beschieden; die Messungen fielen nämlich bei häufiger Wiederholung immer wieder anders aus und es gelang uns nicht, alle Fehlerquellen aufzudecken und sie zu beseitigen. Freilich nimmt sich der alte Schubmesser, der von jener Zeit her noch in unserer Sammlung aufbewahrt wird, zu dem heute vorliegenden Instrument, mit dem

das Ziel schließlich ganz befriedigend erreicht werden konnte, ungefähr wie eine ziemlich grob gebaute Dampfmaschine zu einem feinen Uhrwerk aus.

Zum großen Teile ist übrigens der frühere Mißerfolg auch darauf zurückzuführen, daß ich mir das Ziel damals zu hoch gesteckt hatte. Meine Absicht ging nämlich ursprünglich darauf hinaus, den Schubmodul G irgend eines Metalls mit Hilfe eines gewöhnlichen Zugversuches an einem aus diesem Metalle hergestellten Flachstabe zu ermitteln. In den um 45° gegen die Hauptzugrichtung geneigten Schnittflächen treten nämlich bekanntlich Schubspannungen τ auf, die halb so groß sind wie die Hauptspannung. Wenn es uns gelungen wäre, die Winkeländerung γ genau genug zu messen, hätte man daher den Schubmodul G aus dem Zugversuche entnehmen können.

In das Verdienst, das neue Gerät geschaffen und soweit verbessert zu haben, daß man unter gewöhnlichen Umständen brauchbare Messungen damit ausführen kann, teilen sich zwei Laboratoriumsbeamte, der Konservator Herr Dr. Huber und der Werkmeister Herr Johann Mertel. Herr Mertel hatte sich schon vorher, insbesondere bei der Anfertigung von Dehnungsmessern in der von Martens angegebenen Bauart als ein sehr geschickter Mechaniker bewährt und Herr Dr. Huber hatte Gelegenheit, sich bei zahlreichen Versuchen der verschiedensten Art Erfahrungen über die Ausführung von Feinmessungen an elastisch veränderlichen Körpern zu sammeln. Die Vorbedingungen waren daher gegeben, um von einer verständnisvollen Zusammenarbeit beider Herren eine befriedigende Lösung der gestellten Aufgabe erhoffen zu dürfen.

Der erste Apparat, der aus dieser Zusammenarbeit hervorging, war zwar wiederum ein Mißerfolg, indem er ungefähr dieselben Mängel aufwies, wie der erste Schubmesser, den C. Klebe nach meinen Anregungen gebaut hatte. Es schien hiernach, als wenn die Aufgabe überhaupt nicht gelöst werden könnte. Aber die Herren Huber und Mertel ließen sich nicht abschrecken und ich gab gern meine Einwilligung dazu, daß sie ihre Bemühungen fortsetzten. Diese waren dann auch insofern von Erfolg gekrönt, als das neue Gerät wenigstens in allen Fällen, bei denen ein Gleiten der Befestigungsspitzen auf dem Probekörper nicht zu befürchten ist, insbesondere also bei der Anwendung zu Verdrehungs-

versuchen, allen Anforderungen genügt, so daß die damit ausgeführten Messungen an Genauigkeit nicht hinter denen eines guten Dehnungsmessers zurückstehen.

Die Ermittlung des Schubmoduls aus Zugversuchen läßt allerdings auch mit dem neuen Schubmesser immer noch zu wünschen übrig. Bei weichen Metallen, wie Kupfer, Flußeisen oder nicht zu hartem Stahl kann man zwar den Schubmodul auf diesem Wege mit befriedigender Genauigkeit ermitteln. Dagegen wollte es bisher noch nicht gelingen, eine brauchbare Messung für ein hartes Gußeisen durchzuführen. Der Grund für das verschiedene Verhalten ist darin zu erblicken, daß beim Zugversuche die unter 45° gegen die Hauptrichtung geneigten Strecken nicht nur gegeneinander gedreht werden, sondern daß sie sich zugleich auch etwas dehnen.

Um eine einwandfreie Messung der Winkeländerung γ beim Zugversuche durchführen zu können, muß man daher verlangen, daß das Instrument solche Dehnungen gestattet, ohne daß die Angabe der Drehung dadurch gefälscht werden könnte. Die Längenänderungen, um die es sich dabei handelt, sind unter gewöhnlichen Umständen so klein, daß sie durch elastische Formänderungen der beiden Hauptbestandteile ohne weitere Folgen an sich leicht ausgeglichen werden können. Dabei muß jedoch vorausgesetzt werden, daß die Befestigungspunkte des Schubmessers an dem Probekörper keine Verschiebung gegen diesen erfahren. An den Befestigungsstellen muß daher eine zur elastischen Formänderung der Bestandteile des Instruments ausreichende Kraft übertragen werden können, ohne daß dabei die Spitzen, in denen die Berührung erfolgt, ins Rutschen kämen.

Das ist eine Forderung, die nicht leicht zu erfüllen ist. Bei einem weichen Metall, wie insbesondere bei Kupfer, genügt es jedoch, wie der Erfolg lehrt, den Schubmesser durch Anziehen der Bügelschraube mit leichtem Druck an dem Probekörper zu befestigen. Die Spitzen setzen sich dadurch fest genug, um an dem Probekörper zu haften, so daß sie sich im Verlaufe des Versuches nicht dagegen verschieben können. Bei einem härteren Metalle muß man dagegen immer mit der Möglichkeit eines Gleitens rechnen. Daß ein solches Gleiten zugleich auch mit einer von Zufälligkeiten abhängigen Drehung verbunden ist, sieht man

leicht ein. Daher darf man den Versuchsergebnissen erst Vertrauen schenken, wenn bei häufiger Wiederholung des Versuches an verschiedenen Stellen des Probekörpers hinreichend miteinander übereinstimmende Werte erhalten werden.

Mit Rücksicht hierauf erblicke ich den Hauptgebrauchswert des Schubmessers, so wie er heute vorliegt, darin, daß es mit seiner Hilfe möglich ist, die Schubspannungen unmittelbar zu messen, die in einem auf Verdrehen beanspruchten Stabe auftreten. In diesem Falle kommt nämlich die Gefahr, daß die Spitzen gleiten könnten, überhaupt nicht in Betracht, da die in den betreffenden Richtungen gehenden Strecken ihre Längen gar nicht ändern.

Im Verlaufe meiner Arbeiten über die Verdrehungssteifigkeit der Walzeisenträger habe ich vor einigen Jahren die Behauptung aufgestellt, daß die größte Schubspannung bei der Verdrehung eines Stabes von doppel-T-förmigem Querschnitt in der Mitte des Flansches auftrete und nicht, wie man früher allgemein annahm, in der Stegmitte. Diese Behauptung ist von manchen Sachverständigen bestritten oder wenigstens bezweifelt und vielleicht von den meisten nicht geglaubt worden. Es mußte mir daher daran liegen, sie auf dem Versuchswege zu prüfen.

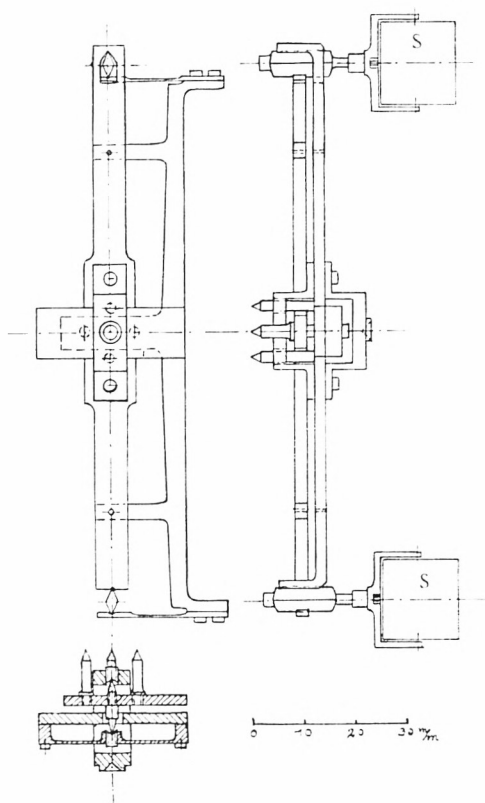
Hierfür stand mir anfänglich kein anderes Mittel zur Verfügung, als die Oberfläche des Versuchskörpers gut zu glätten und zu polieren und die Verdrehung so weit fortzusetzen, bis sich die ersten Fließfiguren deutlich sichtbar gemacht hatten, worauf der Versuch abgebrochen wurde. In der Tat traten auch diese Fließfiguren an der von mir erwarteten Stelle auf und nicht in der Mitte des Stegs. Dieser Befund war beweiskräftig genug, um jeden Sachverständigen, der sich die Versuchsstücke bisher ansehen konnte, für meine Ansicht zu gewinnen. Immerhin war jedoch die Beweisführung insofern nicht ganz einwandfrei, als man bei dem Versuche die Elastizitätsgrenze überschreiten mußte, um die Fließfiguren hervorzubringen, während sich die Behauptung, die geprüft werden sollte, auf einen Zustand im rein elastischen Gebiete der Formänderung bezog. In diesem Falle ist der Schubmesser das einfachste und zuverlässigste Hilfsmittel, um einen in jeder Hinsicht befriedigenden Nachweis für die Richtigkeit der aufgestellten Behauptung zu erbringen.

Ich brauche kaum besonders hinzuzufügen, daß dieser Versuch ausgeführt wurde und daß er das erwartete Ergebnis lieferte. Die zahlenmäßige Wiedergabe dieses Versuches und einiger anderer Versuche, bei denen der Schubmesser verwendet wurde, möchte ich meinem Mitarbeiter Herrn Dr. Huber überlassen, der darüber an anderer Stelle zu berichten beabsichtigt.

Das Instrument besteht, wie die beistehende Zeichnung erkennen läßt, aus zwei Hauptbestandteilen, nämlich aus zwei Stängelchen von rund 10 cm Länge, die nebeneinander liegen und von vornherein ungefähr in der gleichen Richtung gehen, sich aber im Verlaufe des Versuches ein wenig gegeneinander drehen, nämlich um den Betrag des Winkels γ , den man zu messen beabsichtigt. Die beiden Hauptbestandteile werden von beiden Seiten her durch zwei Deckel zusammengehalten, in denen sich die Lagerung für die Spitzen befindet, um die sich die Stängelchen gegeneinander drehen können.

Das eine Stängelchen stützt sich mit zwei Spitzen gegen den Probekörper, die um 1 cm voneinander entfernt sind und deren Verbindungslinie in der Richtung des Stängelchens geht. Das andere Stängelchen hat in der Mitte einen kurzen Querarm und in diesem sind die beiden Spitzen gelagert, mit denen es sich gegen den Probekörper stützt. Auch diese beiden Spitzen sind um 1 cm voneinander entfernt und die Verbindungsstrecke geht in der Richtung des Querarms, also senkrecht zur Richtung der beiden Stängelchen. Der zu 1 cm gewählte Abstand von je zwei zusammengehörigen Spitzen könnte ebenso gut auch größer oder kleiner sein, ohne daß dadurch eine wesentliche Änderung in der Wirkungsweise des Instruments herbeigeführt würde. Vermutlich wird es sich empfehlen, ihn bei späteren Ausführungen etwas kleiner, vielleicht gleich 5 mm zu wählen.

Im Mittelpunkte des durch die vier Befestigungsspitzen gebildeten Quadrats sind die beiden Hauptbestandteile drehbar gegeneinander gelagert. Die Lagerung erfolgt in verschiebbaren Körnern, die in die beiden Deckel eingelassen sind. Sie bedarf einer besonders sorgfältigen Ausbildung, weil das Instrument in vier Punkten mit dem Probekörper verbunden werden soll, während ein starrer Körper schon beim Festhalten an drei Punkten unverschieblich festliegt. Um die hiernach erforderliche Anpassung



zu ermöglichen, ist der kleine Stahlbolzen, der nach beiden Seiten hin die Spitzen trägt, um die sich die beiden Stängelchen gegeneinander drehen können, federnd gelagert, wie aus dem Schnitte im untern Teil der Abbildung zu erkennen ist.

Der Winkel γ , um den sich die beiden Stängelchen gegeneinander drehen, wird durch zwei Spiegel gemessen, die an beiden Enden nach Art des Dehnungsmessers von Martens stützenartig einerseits gegen das eine Stängelchen und andererseits gegen zwei an den Enden des anderen Stängelchens angebrachte federnde Arme gestützt sind. Die Anordnung ist dabei so getroffen, daß eine Drehung der beiden Stängelchen um einen Winkel γ zu entgegengesetzten Drehungen der beiden Spiegel führt. Hierdurch wird ähnlich wie beim Dehnungsmesser der Fehler ausgeschaltet,

der andernfalls durch eine Drehung des ganzen Instruments oder des Probekörpers herbeigeführt würde, an dem es befestigt ist. Die Ablesung erfolgt mit Fernrohren, die in einem geeigneten Abstände von etwa 1,5 bis 2 m aufgestellt werden und mit denen man die Verschiebungen des Spiegelbildes eines feststehenden Maßstabes abliest.

Das aus Stahl hergestellte Instrument wiegt mit Einschluß der beiden kleinen Bügel, durch die die beiden Hauptbestandteile in der Mitte drehbar zusammengehalten werden und mit Einschluß der beiden Spiegel, jedoch ohne den großen Bügel, der dazu dient, das Instrument an dem Probekörper festzuklemmen und der je nach Bedarf ausgewechselt werden kann, rund 53 gr. Wenn das Instrument angebracht werden soll, stellt man die beiden Stängelchen zuerst gegeneinander fest, so daß sie sich nicht gegeneinander drehen können. Dazu dienen zwei kleine Stifte, die man durch die in etwa 35 mm von der Mitte beiderseits angebrachten und aus der Zeichnung ersichtlichen Löcher steckt. Nach dem Anlegen des Instruments zieht man diese Stifte wieder heraus.

Etwaige Anfragen wegen Lieferung eines solchen Schubmessers und des Preises, zu dem er bezogen werden kann, wären an den Werkmeister des mechanisch-technischen Laboratoriums der Technischen Hochschule in München, Herrn Joh. Mertel zu richten.