

Sitzungsberichte

der

mathematisch-physikalischen Klasse

der

K. B. Akademie der Wissenschaften

zu München

1911. Heft III

November- bis Dezembersitzung

München 1911

Verlag der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission des G. Franz'schen Verlags (J. Roth)



Die Sprödigkeit von Glas.

Von A. Föppl.

Vorgelegt in der Sitzung am 2. Dezember 1911.

Die Sprödigkeit ist ein nicht genauer umschriebener Begriff der Umgangssprache, der aus einfachen Erfahrungen des täglichen Lebens abgeleitet ist. Wie alle Begriffe, die der Umgangssprache unmittelbar entnommen sind, ist auch der Begriff der Sprödigkeit zunächst schwankend und dehnbar. Daran hat auch die Wissenschaft bisher nichts geändert; auch im wissenschaftlichen Sprachgebrauche hat das Wort noch keine feste und allgemein anerkannte Bedeutung erlangt. Um zahlenmäßige Angaben über die für manche Zwecke recht wichtige Eigenschaft der Sprödigkeit machen zu können, muß man sich daher zuerst für eine mehr oder weniger willkürliche Definition entscheiden, die bestimmt genug gefaßt ist, um nach ihr aus zweckmäßig angelegten Versuchen das genauere Maß der Sprödigkeit eines Körpers ableiten zu können.

Zunächst ist ein spröder Körper dadurch gekennzeichnet, daß er keine merklichen bleibenden Formänderungen anzunehmen vermag, bevor er zerbricht. Dieses Verhalten führt ferner von selbst dazu, daß ein spröder Körper verhältnismäßig leicht durch Stöße zerstört wird; jedenfalls leichter als ein weniger spröder Körper, der ruhenden Lasten gegenüber von der gleichen Widerstandsfähigkeit ist. Man kann also ein Maß für die Sprödigkeit einerseits dadurch gewinnen, daß man durch hinlänglich feine Messungen feststellt, welche Größe die sehr kleinen bleibenden Formänderungen kurz vor Eintreten

des Bruches auch bei einem spröden Körper immerhin noch anzunehmen vermögen. Oder man kann andererseits die Arbeit messen, die bei einem Stoße aufgewendet werden muß, um den Körper zu zerstören. Ich habe mich bei meinen Versuchen für den zuletzt angegebenen Weg entschieden.

Als Hauptbeispiel für einen spröden Körper gilt überall das Glas. Aber es gibt sehr verschiedene Gläser, die in ihren Eigenschaften weit voneinander abweichen. Sieht man nun die Sprödigkeit von vornherein als eine allen Gläsern gemeinsame Eigenschaft an, so entsteht um so mehr das Verlangen, die Unterschiede, die immerhin auch in dieser Eigenschaft zwischen den verschiedenen Glassorten noch zu erwarten sind, durch geeignete Versuche nachzuweisen und zahlenmäßig auszudrücken.

Das ist, wie es scheint, bisher nicht geschehen. Ich hielt es daher für eine dankbare Aufgabe, ein Verfahren, das ich schon vor einigen Jahren hauptsächlich zu praktischen Zwecken für die Prüfung der Sprödigkeitseigenschaften von Straßenbausteinen ausgearbeitet und seitdem vielfach als zweckmäßig erprobt habe, jetzt auch einmal ohne Änderung auf die zahlenmäßige Ermittlung der relativen Sprödigkeitswerte einer Anzahl bestimmter Glassorten zu übertragen. Ich muß freilich sofort vorausschicken, daß das Verfahren mit erheblichen Mängeln behaftet ist, auf die ich später noch ausführlicher eingehen werde. Immerhin führt es zu bestimmten und nachprüfbaren Zahlenwerten für die Sprödigkeit, die wenigstens ungefähre Gültigkeit beanspruchen können und darin ist gegenüber dem bisherigen Zustande unseres Wissens auf diesem Gebiete jedenfalls ein Fortschritt zu erblicken.

Beschreibung des Verfahrens.

Bei den zu Straßenbauzwecken verwendeten Steinen, für die ich das Verfahren zuerst ausgebildet habe, konnte kein Zweifel darüber bestehen, daß man die Sprödigkeitseigenschaften durch Stoßversuche feststellen müsse. Die Abnützung, die eine Straßendecke durch den sich darüber bewegenden Verkehr er-

fährt, wird nämlich zum Teil durch die Stöße hervorgebracht, die dabei auftreten. Um ein Urteil über den Einfluß zu erlangen, den die Sprödigkeit oder die Zähigkeit auf die mehr oder weniger gute Haltbarkeit eines bestimmten Steinmaterials ausübt, ist es daher geboten, diese Eigenschaft selbst aus Stoßversuchen abzuleiten. Außerdem ist der Versuch auf diese Weise auch viel leichter durchzuführen, als wenn man sich um die Messung der sehr kleinen bleibenden Formänderungen bemühen wollte, die ein Straßenbaustein anzunehmen vermag, ehe er zerbricht.

Eine genaue Beschreibung und ausführliche Begründung des Verfahrens habe ich in den von mir herausgegebenen „Mitteilungen aus dem mechanisch-technischen Laboratorium der K. B. Technischen Hochschule“, Heft 30 (München 1906) veröffentlicht. Eine weitere Abhandlung über denselben Gegenstand mit zahlreichen Versuchsergebnissen findet man in Heft 32 der „Mitteilungen“ (München 1912). Hier muß ich mich auf einige kurze Angaben beschränken.

Die Steine werden in Würfelform geprüft; gewöhnlich haben die Würfel eine Kantenlänge von etwa 3,5 cm und sind mit der Diamantsäge aus einem größeren Steinstück herausgeschnitten. Die Druckflächen werden vor dem Versuche entweder mit Schmirgel nachgeschliffen oder mit einem Diamanten auf der Drehbank sorgfältig eben abgedreht. Dann setzt man den Würfel auf ein größeres Gußstück, das als Amboß dient, legt auf die obere Würfelseite ein Stahlplättchen und läßt darauf den Hammer des Schlagwerks aus einer bestimmten Höhe herabfallen. Der Versuch lehrt, daß es innerhalb gewisser Grenzen gleichgültig für den Erfolg ist, ob man einen schweren Hammer mit einer geringen Fallhöhe oder umgekehrt einen leichteren Hammer mit einer größeren Fallhöhe verwendet, wenn nur das Produkt aus beiden Werten, also die Stoßarbeit dieselbe bleibt. Bei Würfeln von verschiedener Größe muß die Stoßarbeit proportional dem Würfelvolumen sein, um gleiche oder entsprechende Wirkungen hervorzu-
bringen.

Ferner lehrten die Versuche, daß es für jede bestimmte Steinsorte eine gewisse „unwirksame“ Hubhöhe eines gegebenen Hammers bei gegebener Würfelgröße gibt, aus der man beliebig viele Schläge auf den Würfel abgeben kann, ohne damit den Bruch oder irgendein Anzeichen einer Schädigung des Würfels herbeizuführen. Gibt man Schläge aus einer Hubhöhe ab, die nur wenig größer ist als die unwirksame, so bedarf es einer großen Zahl aufeinanderfolgender Schläge zur Herbeiführung des Bruches. Bei einer größeren Hubhöhe wird die Zahl der zum Bruche erforderlichen Schläge kleiner und bei einer gewissen Hubhöhe, die sich aber bei meiner Versuchseinrichtung nur ganz ungenau ermitteln ließ, reicht ein einziger Schlag gerade schon hin, um den Bruch zu bewirken.

Ein anderer Versuchsansteller hätte sich unter diesen Umständen vielleicht zu einem Verfahren entschlossen, das bei anderen Stoßversuchen schon öfters benutzt worden ist und das, auf den vorliegenden Fall übertragen, darin bestehen würde, einen einzigen Schlag aus genügend großer Höhe auf den Würfel abzugeben, um ihn sicher zu zertrümmern und hierauf die kinetische Energie zu messen, mit der sich der Hammer nach Vollendung der Zerstörung des Würfels noch weiter bewegt. Die Differenz der kinetischen Energie des Hammers zu Beginn und zu Ende des Stoßes würde dann die zur Zerstörung des Würfels erforderliche Brucharbeit ergeben, die unter sonst gleichen Umständen als umgekehrt proportional der diesem Vorgange entsprechend zu definierenden Sprödigkeit des Würfels angesehen werden könnte.

Ich habe mich aber für ein anderes Vorgehen entschieden, teils wegen der Schwierigkeit, die Geschwindigkeit des Hammers nach dem Stoße mit genügender Genauigkeit zu messen, was jedenfalls viel Mühe gemacht hätte, namentlich aber weil mir die vorher besprochenen Erfahrungen über den Einfluß mehrfach wiederholter Stöße ein Prüfungsverfahren angemessen erscheinen ließen, bei dem nicht ein einziger Stoß, sondern eine Reihe aufeinanderfolgender Stöße zur Verwendung gebracht wird. Diese und andere in meiner früheren Veröffentlichung

ausführlich besprochenen Erwägungen führten mich zur Festsetzung der folgenden Versuchsvorschriften, an die ich mich von da ab stets gehalten habe.

Zuerst wird ein Schlag aus solcher Höhe auf den Würfel abgegeben, daß die Schlagarbeit für jeden ccm des Würfelvolumens 2 cmkg beträgt. Dieser Wert ist so gewählt, daß der erste Schlag bei allen Körpern, die etwa einer Sprödigkeitsprüfung unterzogen werden könnten, unwirksam bleibt, während ein zwei- bis dreifacher Betrag der Schlagarbeit bei den weniger widerstandsfähigen Körpern, wie bei Zementbeton, schon zu einer Zerstörung genügen würde. Dann läßt man einen zweiten Schlag des Hammers aus der doppelten, einen dritten aus der dreifachen und überhaupt jeden n^{ten} Schlag aus der n fachen Hubhöhe solange abgeben, bis der Bruch des Würfels herbeigeführt ist. Bei sehr widerstandsfähigen Körpern können dazu 40 und mehr Schläge erforderlich sein; immerhin läßt sich aber doch auch bei ihnen der Versuch ohne allzu großen Zeitaufwand durchführen.

Als Maß für die Widerstandsfähigkeit des geprüften Stoffes gilt die gesamte auf 1 ccm des Würfels bezogene Schlagarbeit, die bei diesem Verfahren bis zur Zerstörung aufgewendet wurde. Für n Schläge beträgt diese Arbeit $n(n+1)$ cmkg für 1 ccm. Bei aufmerksamer Beobachtung der begleitenden Umstände, namentlich des Hammerrücksprungs, kann man auch wohl zu einem Urteile darüber gelangen, ob der letzte Schlag ganz oder nur teilweise und zu welchem Bruchteile seiner Arbeitsleistung er ungefähr zur Herbeiführung des Bruches erforderlich war. Bei der Feststellung der Brucharbeit kann dann der letzte Schlag schätzungsweise mit dem entsprechenden Anteile eingerechnet werden. Der Schätzungsfehler, den man dabei begeht, bleibt übrigens gegenüber den anderen unvermeidlichen Versuchsfehlern meist unerheblich.

Bei den zu praktischen Zwecken ausgeführten Steinprüfungen werden in der Regel 6 Würfel des gleichen Materials nach den gleichen Vorschriften geprüft. Den Durchschnittswert der auf die vorher angegebene Weise berechneten Bruch-

arbeit für die 6 Würfel bezeichne ich als die „Wertziffer“ des Steinmaterials. Diese Größe kann nämlich unmittelbar als ein Maßstab für die Eignung eines Gesteins zu Straßenbauzwecken betrachtet werden, soweit als dabei die Sprödigkeitseigenschaften in Betracht kommen.

Die „Wertziffer“ hat die Dimension $\frac{\text{cmkg}}{\text{cm}^3}$ oder $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ und stimmt darin mit einer auf die Flächeneinheit bezogenen Spannung, also auch mit der Druckfestigkeit, überein. Die Wertziffer ist selbst von der Druckfestigkeit abhängig und außerdem von der Fähigkeit des Stoffes, Formänderungen zu ertragen, ohne zu brechen. Dividiert man die Wertziffer durch die Druckfestigkeit, so erhält man eine absolute Zahl, die als Ausdruck des Formänderungsvermögens des Körpers betrachtet und daher als Maß für die Zähigkeit benutzt werden kann. Der reziproke Wert dieser Zahl, also das Verhältnis der Druckfestigkeit zur Wertziffer kann und soll hier als Maß der Sprödigkeit gelten.

In den vorher genannten Veröffentlichungen findet man eine Zusammenstellung der Ergebnisse sehr zahlreicher, zu praktischen Zwecken vorgenommener Schlagversuche mit Straßenbausteinen. Freilich war dabei die Ermittlung des Sprödigkeitsverhältnisses gewöhnlich nicht der Zweck der Gesteinsprüfung, sondern als Endziel der Untersuchung wurde die Feststellung der „Wertziffer“ angesehen. Da aber neben den Schlagversuchen sehr häufig auch noch Druckfestigkeitsproben vorgenommen wurden, kann man in vielen Fällen das Sprödigkeitsverhältnis aus den veröffentlichten Angaben nachträglich noch ausrechnen. Um sofort eine ungefähre Vorstellung von dem Betrage des Sprödigkeitsverhältnisses bei den häufiger verwendeten Straßenbausteinen zu geben, erwähne ich, daß das Verhältnis bei Granit gewöhnlich etwa zwischen 6 und 12 liegt. Für einen besonders zähen Granit sank es auf 2,8 herab. Ich schicke schon hieraus voraus, daß die meisten Gläser, die ich untersucht habe, bedeutend spröder als Granit gewesen sind, daß aber doch ein Glas, von dem Jenaer Glaswerk als Borat-

Flint S 389 bezeichnet, mit einem Sprödigkeitsverhältnisse von nur 4,4 die meisten Granite an Zähigkeit übertroffen hat.

Bei vielen Gesteinsarten, insbesondere bei Granit, Sandstein, Grauwacke usf. macht die Durchführung des Versuchs nach dem besprochenen Plane keinerlei Schwierigkeiten. Namentlich unterschieden sich die Ergebnisse der 6 Einzelversuche, die man in der Regel ausführt, nicht allzuviel voneinander. Es kommt freilich vor, daß ein Würfel etwa schon beim 10., ein anderer erst beim 12. oder auch erst beim 14. Schläge zerstört wird. Bei der für die Ermittlung der Wertziffer angenommenen Berechnungsweise stellen sich dann schon recht erhebliche Unterschiede in den Einzelzahlen heraus. Immerhin bleiben aber diese Einzelzahlen doch noch innerhalb genügend enger Grenzen, um den aus den 6 Versuchen abgeleiteten Durchschnittsbetrag der Wertziffer als einen hinlänglich gesicherten Mittelwert ansehen zu können.

Das gilt aber nicht von allen Steinen und namentlich machen darin, soweit meine bisherigen Erfahrungen reichen, die meisten Basalte eine Ausnahme. Ich muß jedoch ausdrücklich betonen, daß auch Basalte vorkommen, die sich in ihrem Verhalten gegen stoßweise Beanspruchung eng an die vorher genannten Steine anschließen und namentlich auch hinsichtlich der verhältnismäßig guten Übereinstimmung zwischen den Einzelversuchen nicht hinter diesen zurückstehen. Aber bei den meisten Basalten ist die Eigenschaft der Sprödigkeit offenbar ungleichmäßig über die ganze Masse verteilt in solcher Art, daß bei manchen Versuchskörpern neben spröden Stellen, die beim Schlagversuche zum frühzeitigen Auftreten von Spaltrissen führen, weit zähere Massen liegen, die der stoßweisen Beanspruchung für sich genommen einen viel größeren Widerstand entgegensetzen. Daneben kommen zugleich auch Versuchskörper vor, die mit den vorigen aus demselben Gesteinsstücke herausgeschnitten sind, aber spröde Stellen vermissen lassen und daher erst nach einer viel größeren Zahl von Schlägen zerbrechen. In beiden Fällen sind übrigens auch die Bruchformen verschieden. Ein Würfel, in dem keine spröderen

Stellen vorkommen, zerbricht gleichmäßig nach allen vier freien Seitenflächen, unter Pyramidenbildung, ganz ähnlich wie bei einem gewöhnlichen Druckversuche. Im anderen Falle tritt zunächst gewöhnlich nur eine Spaltfläche auf, die ziemlich genau parallel zur Schlagrichtung mitten durch den Würfel hindurchgeht. Stellt man die beiden Bruchstücke nebeneinander, so ergänzen sie sich ohne merklichen Materialverlust wieder zu einem Würfel, der sich gegenüber weiteren Schlägen fast ebenso widerstandsfähig erweist, als wenn er noch zusammenhing. In solchen Fällen ist man im Zweifel, ob man das Auftreten der ersten Spaltung überhaupt schon als Bruch gelten lassen oder ob man unter Zusammenstellung der Bruchstücke, die man etwa mit einer Gummischnur zusammenbinden kann, den Versuch fortsetzen soll, bis eine vollständige Zerstörung eingetreten ist.

Als Beispiel führe ich hier eine Basaltsorte an, die mit der Laboratoriumsnummer 8225 bezeichnet ist und bei der die 6 Würfel die folgenden Schlaganzahlen bis zum Bruche ergaben: 36,9; 35,5; 20,0; 21,5; 28,5; 12,0. Von diesen Würfeln brachen der 3., 4. und 6. durch vorzeitige Spaltungen und zwar wurde der Versuch mit dem Auftreten der ersten Spaltung als beendet angesehen. Dagegen wurden der 1., 2. und 5. Würfel gleichmäßig zerstört. In solchen Fällen kann natürlich eine Mittelbildung aus einer beschränkten Zahl von Versuchen nur einen sehr unsicheren Aufschluß über die Sprödigkeitseigenschaften des betreffenden Körpers liefern.

Indessen glaube ich, daß man dem gewählten Verfahren keinen Vorwurf daraus machen darf, daß es bei einzelnen Gesteinsarten zu derartigen Schwierigkeiten führt. Ich bin vielmehr eher geneigt, einen Vorzug darin zu erblicken, daß das Verfahren die offenbar auch tatsächlich innerhalb der betreffenden Gesteinsmassen sehr ungleichförmig verteilten Sprödigkeitseigenschaften durch die stark voneinander abweichenden Ergebnisse der Einzelversuche deutlich hervortreten läßt.

Wenn ich hier von spröden Stellen sprach, die gelegentlich in den Würfeln vorkommen, so lag mir nur daran, die

beobachteten Erscheinungen möglichst einfach zu beschreiben. Ich will also damit keineswegs die naheliegende Annahme zurückweisen, daß die Sprödigkeit an diesen Stellen auf Eigenspannungen beruhen könne, die vom Abkühlungsvorgange bei der Bildung des Gesteins her darin zurückgeblieben sein mögen. Will man sich dieser Annahme anschließen, so wären die beim Schlagversuch vorzeitig auftretenden Spaltungen mit den Spaltflächen in Vergleich zu bringen, die bei den Säulenbasalten in der Natur zu beobachten sind. Für den Zweck der hier durchzuführenden Untersuchung kommt es aber nicht auf den besonderen Grund an, der zu der verschiedenen großen Widerstandsfähigkeit der einzelnen Würfel gegen Stöße führt, und diese Frage kann daher hier unentschieden gelassen werden.

Bei den Gläsern haben sich nun ebenfalls ähnlich starke Unterschiede wie bei den Basalten zwischen den einzelnen Versuchsergebnissen herausgestellt. Die Mittelwerte sind daher ungenau und können nur als grobe Annäherungen angesehen werden. Wenn man das hier angewendete Verfahren beibehalten will, muß man diese Unsicherheit im Werte des Sprödigkeitsverhältnisses als unvermeidlich mit in den Kauf nehmen.

Das Versuchsmaterial.

Vom Jenaer Glaswerk Schott u. Gen. wurden mir freundlichst von 7 verschiedenen Glassorten je 8 Würfel zur Verfügung gestellt. Ich benütze diese Gelegenheit, meinen Dank für dieses Entgegenkommen hier auch öffentlich auszusprechen.

Die Würfel hatten ursprünglich etwa 2,2 cm Kantenlänge. Sie waren zum Teil nicht ganz regelmäßig in der Form und die Seitenflächen waren nicht genügend eben. Im Laboratorium wurden sie daher zuerst durch Schleifen mit Karborundum auf genauere Form gebracht, wobei so viel Material abgeschliffen wurde, daß die Kantenlänge nachher ungefähr 2,0 cm betrug.

Alle Würfel wurden dann ausgemessen und gewogen und daraus das spezifische Gewicht festgestellt. Dieses diente hauptsächlich dazu, die einzelnen Glassorten zu kennzeichnen und

Verwechselungen zwischen den Versuchskörpern zu verhüten. Ich führe zunächst die Bezeichnungen an, unter denen mir die 7 Glassorten aus Jena geliefert wurden und die dafür gefundenen spezifischen Gewichte γ :

- | | |
|-------------------------------------|-----------------|
| 1. Flint O 118 | $\gamma = 3,51$ |
| 2. Schweres Flint S 386 | $\gamma = 5,87$ |
| 3. Borat-Flint S 389 | $\gamma = 2,83$ |
| 4. Normalglas | $\gamma = 2,57$ |
| 5. Geräteglas | $\gamma = 2,47$ |
| 6. Glas 59 ^{III} | $\gamma = 2,38$ |
| 7. Zylinderglas | $\gamma = 2,29$ |

Von den 8 Würfeln jeder Sorte wurden 3 zur Ermittlung der Druckfestigkeit, die übrigen zu den Schlagversuchen verwendet. Von der ersten Sorte O 118 war jedoch ein Würfel bei den Vorbereitungen verunglückt und von der fünften Sorte, Geräteglas, sprang ein Würfel beim Schlagversuche sofort nach dem ersten Schlage, so daß kein Zweifel darüber bestehen konnte, daß auch dieser Würfel bei den Vorbereitungen zum Versuche schon eine Beschädigung erlitten haben mußte, die nur bei Beginn des Schlagversuchs nicht bemerkt worden war. Deshalb muß auch dieser Würfel bei der Verwertung der Versuchsergebnisse außer Betracht bleiben. Man verfügt daher bei der ersten und fünften Glassorte über je 4, bei den übrigen Sorten über je 5 Ergebnisse von Schlagversuchen.

Die Druckfestigkeit.

In dem Buche von H. Hovestadt, Jenaer Glas, Jena 1900, findet man eine Zusammenstellung von Druckfestigkeitswerten für eine Reihe von Gläsern, mit denen sich jedoch die von mir untersuchten nicht unmittelbar vergleichen lassen. Ich hielt es daher für notwendig, die Druckfestigkeit selbst zu bestimmen, um so mehr als mir die dazu erforderlichen Einrichtungen von vornherein zur Verfügung standen. Nur die Druckplatten, zwischen denen die Würfel zerdrückt werden sollten, mußte ich besonders anfertigen lassen. Sie bestehen

aus gehärtetem Werkzeugstahl; um eine gut zentrische Druckübertragung zu sichern, ist ein aus einer Gustahlkugel von 2 cm Durchmesser gebildetes Gelenk¹⁾ zwischen die eine Druckplatte und die Platte der hydraulischen Presse eingeschaltet.

Die von mir gefundenen Druckfestigkeitswerte sind durchschnittlich etwas niedriger als die von Hovestadt angeführten, wenn auch ein unmittelbarer Vergleich, wie schon bemerkt, nicht möglich ist. Vermutlich wird der Unterschied dadurch bedingt, daß bei den Versuchen von Winkelmann u. Schott Glassäulchen, die annähernd Würfel von 0,6 cm darstellten, zerdrückt wurden, während ich Würfel von 2 cm Kantenlänge prüfte. Wenn man annimmt, daß in den Gläsern trotz sorgfältiger Abkühlung nach der Herstellung noch Eigenspannungen zurückbleiben, die sich bei größeren Stücken natürlich viel mehr bemerklich machen können als bei kleineren, braucht man sich nach einem weiteren Grunde für die etwas niedrigeren Druckfestigkeitswerte bei meinen Versuchen nicht umzusehen.

Die Würfel zerfallen beim Bruch in zahllose kleine Splitter; bei Hovestadt ist angegeben, daß sie in Staub zerfallen. Es schien mir der Mühe wert zu sein, den Grad der Zerkleinerung auch noch zahlenmäßig festzustellen. Dazu benutzte ich die feinen Siebe, mit denen man bei der Zementprüfung den Grad der Mahlfeinheit des Zementpulvers feststellt. Das feinere der beiden Siebe, die dazu dienen, hat auf 1 qcm 4900 Maschen, das gröbere 900 Maschen. Ich ließ nun von je einem Würfel der 7 Glassorten nach der Druckfestigkeitsprobe die Bruchstücke über die beiden Siebe gehen und sie dadurch in 3 Teile zerlegen, von denen der feinste Teil durch das 4900-Sieb gegangen war, der mittlere auf diesem zwar liegen blieb, aber durch das 900-Sieb gefallen war, während der gröbste Teil auf dem 900-Sieb liegen geblieben ist. Ich gebe zunächst die Zusammenstellung der Siebergebnisse, ausgedrückt in Hundertteilen des Gesamtgewichtes:

¹⁾ Hierzu wurden mir von der Schweinfurter Gußstahlkugelfabrik Fichtel & Sachs einige Kugeln, die sich zu dem Zweck sehr gut eigneten, schenkweise überlassen, wofür ich hier meinen Dank ausspreche.

Nummer	fein	mittel	grob
1	16,6	23,7	59,7
2	11,6	17,3	71,1
3	6,1	12,3	81,6
4	15,8	20,9	63,3
5	22,2	24,6	53,2
6	22,3	24,6	53,1
7	21,7	23,9	51,4

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsversuche sind in der folgenden Zusammenstellung enthalten, in die ich auch alle Einzelwerte aufgenommen habe, um die recht erheblichen Unterschiede, die darin vorkommen, erkennen zu lassen.

Nummer	Bezeichnung	Einzelwerte			Durchschnitt in kg/cm ²
		1.	2.	3.	
1	O 118	5720	6900	6200	6273
2	S 386	4740	4090	4580	4470
3	S 389	5800	6860	6010	6223
4	Normalglas	8090	8500	9720	8770
5	Gerätéglass	8250	10600	7880	8910
6	59 ^{III}	7300	10120	10720	9380
7	Zylinderglas	7500	9140	11550	9397

Auffällig erscheint hier der Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und dem spezifischen Gewichte; je leichter das Glas bei diesen 7 Sorten war, desto größer war seine Druckfestigkeit. Wie ein Vergleich mit früheren Versuchen erkennen läßt, handelt es sich aber hierbei nur um ein mehr zufälliges Zusammentreffen.

Die Schlagversuche.

Die Versuche wurden in der schon vorher beschriebenen Weise, also ebenso wie bei den Steinprüfungen ausgeführt. Abgesehen von dem Abbrechen kleinerer Splitter an den Kanten und Ecken, das auf zufällige Umstände von rein örtlicher Bedeutung zurückzuführen ist und mit der Widerstandsfähigkeit des ganzen Würfels gar nichts zu tun hat, besteht die erste erkennbare Beschädigung, die sich im weiteren Verlaufe des Versuchs vergrößert und schließlich zum Bruche führt, in

einem Risse, der sich gewöhnlich auf der unteren Druckfläche ausbildet, mit der der Würfel auf dem Amboss des Schlagwerks aufsitzt. In den meisten Fällen geht der Riß ungefähr in der Richtung einer Diagonalen des Basisquadrates, so daß er entweder mit der Diagonale zusammenfällt oder parallel dazu geht. Der Riß erstreckt sich zunächst nicht über die ganze Grundfläche des Würfels, sondern nur über den mittleren Teil, ohne den Umfang zu erreichen. In das Innere des Würfels erstreckt er sich zunächst etwa 1 mm oder etwas weniger oder mehr. Bei diesen Angaben ist zu beachten, daß die Seitenflächen des Würfels vom Abschleifen her rauh waren, so daß man feinere Risse, die sich etwa vorher schon gebildet haben könnten, nicht wahrzunehmen vermochte.

Nach der Bildung des ersten Risses hielt der Würfel oft noch mehrere Schläge aus, bis sich der Riß merklich weiter ausgedehnt hatte. Der Riß dehnte sich meist in ungefähr geradliniger Fortsetzung bis zum Umfange der Würfelgrundfläche und zugleich auch weiter ins Würfelinnere hin aus, bis er endlich die obere Würfelfläche erreichte, womit der Würfel in zwei oder auch bei einer zuletzt eintretenden Verzweigung in mehrere Teile zerfiel. Hiermit wurde der Versuch abgeschlossen.

Übrigens war die Rissebildung nicht immer von der vorher beschriebenen Art; es traten auch öfters Abweichungen davon ein. So kam es vor, daß der Würfel durch einen Schlag plötzlich vollständig zertrümmert wurde, ohne daß sich vorher ein Riß gezeigt hätte. Oder der Riß war nicht parallel zur Diagonale, sondern ungefähr parallel zu einer Würfelkante; oder er beschränkte sich anfänglich nicht auf den mittleren Teil der Grundfläche, sondern lief von Anfang an durch die ganze Grundfläche hindurch, so daß sie durch ihn in zwei Teile getrennt wurde. Es kam auch vor, daß gleichzeitig zwei Risse auf der unteren Grundfläche entstanden. Einigemal trat auch der erste Riß nicht auf der unteren, sondern an der oberen Druckfläche des Würfels auf. Aber alle diese Abweichungen kamen gegenüber dem vorher beschriebenen gewöhnlichen Ver-

halten des Würfels nur seltener vor, so daß sie wohl auf zufällige Unregelmäßigkeiten zurückzuführen sind.

Der Würfel wurde während des Versuches nach jedem Schlage genau angesehen, wobei eine etwa bemerkenswert erscheinende Änderung in seinem Aussehen aufgeschrieben wurde; also anfänglich auch z. B. das Abspringen kleinerer Splitter an den Kanten, während davon bei den späteren Versuchen meist abgesehen wurde, nachdem man erkannt hatte, daß es sich hierbei nur um eine ganz gleichgültige Nebenerscheinung handelte. In den folgenden Zusammenstellungen verzichte ich auf eine Wiedergabe aller Einzelheiten dieser Aufschreibungen. Dagegen soll jeder einzelne Würfel aufgeführt und für ihn angegeben werden, nach welchem Schlage der erste Riß beobachtet wurde und der wievielte Schlag zum Zerfall in mehrere Teile führte.

1. Flint O 118.

Würfel- Nummer	Schlaganzahl bis zum	
	ersten Risse	Bruche
5	13	24
6	8	19
7	12	23
8	15	15
Mittel	12	20,25

2. Schweres Flint S 386.

Würfel- Nummer	Schlaganzahl bis zum	
	ersten Risse	Bruche
4	8	8
5	6	14
6	5	7
7	2	7
8	1	11
Mittel	4,4	9,4

3. Borat-Flint S 389.

Würfel- Nummer	Schlaganzahl bis zum	
	ersten Risse	Bruche
4	26	37
5	28	43
6	14	25
7	24	52
8	22	28
Mittel	22,8	37,0

4. Normalglas.

Würfel- Nummer	Schlaganzahl bis zum	
	ersten Risse	Bruche
4	4	13
5	8	18
6	5	8
7	14	31
8	7	8
Mittel	7,6	15,6

5. Geräteglas.

Würfel- Nummer	Schlaganzahl bis zum	
	ersten Risse	Bruche
4	33	34
5	*)	*)
6	32	32
7	27	30
8	14	19
Mittel	26,5	28,75

*) Nach dem ersten Schlage zerstört und daher als verunglückt zu betrachten, wie vorher bereits angegeben war.

6. Glas 59^{III}.

Würfel- Nummer	Schlaganzahl bis zum	
	ersten Risse	Bruche
4	9	13
5	7	21
6	15	23
7	8	11
8	7	10
Mittel	9,2	15,6

7. Zylinderglas.

Würfel- Nummer	Schlaganzahl bis zum	
	ersten Risse	Bruche
4	9	22
5	3	6
6	22	30
7	12	15
8	18	25
Mittel	12,8	19,6

Bei den großen Unterschieden zwischen den Einzelzahlen, die nach den früheren Darlegungen nicht dem Prüfungsverfahren zur Last zu legen sind, sondern von Unterschieden im Verhalten der einzelnen Stücke herrühren, ist jeder Versuch einer genaueren Bestimmung der Wertziffer dieser Glassorten als aussichtslos zu betrachten; man muß sich mit einer groben Annäherung begnügen, wie sie aus den Durchschnittswerten dieser Versuchsreihen gefunden werden kann. Man könnte zwar durch eine Vermehrung der Zahl der Einzelversuche einen von Zufälligkeiten freieren und daher wahrscheinlicheren Wert erhalten; für einen ersten Überblick dürfen aber die hier gefundenen Zahlen immerhin schon als ausreichend angesehen werden.

Anstatt für die Schlaganzahl jedes Einzelversuchs die Arbeitsleistung zu berechnen und daraus den Mittelwert zu bilden, wie ich es sonst vorziehen zu müssen glaubte, ist es bei so weit auseinandergehenden Zahlen, um den Einfluß der vom Mittel am meisten abweichenden Einzelwerte nicht zu sehr ins Gewicht fallen zu lassen, wie mir jetzt scheinen will, besser, zuerst den Mittelwert der Schlaganzahl festzustellen und die zu diesem Mittelwert gehörige Arbeitsleistung als Wertziffer anzusehen. Dabei soll auf die Zahl der bis zum Eintreten des ersten Risses erforderlichen Schläge nicht weiter geachtet, sondern nur die Schlaganzahl bis zum Bruche als maßgebend betrachtet werden. Wenn man in dieser Weise verfährt, erhält man für die 7 Glassorten die nachstehenden Wertziffern:

Sorte	1	2	3	4	5	6	7
Schlagzahl	20,25	9,4	37,0	15,6	28,75	15,6	19,6
Wertziffer in kg/cm ²	430	98	1406	259	855	259	404

Die Sprödigkeitszahlen.

Der Vergleich der soeben ermittelten Wertziffern mit den früher angegebenen Druckfestigkeitszahlen liefert sofort die Verhältniszahlen, die als Maß für die Sprödigkeit benutzt werden können. Man erhält so die in der folgenden Zusammenstellung angegebenen Werte:

Nummer	Bezeichnung	Druckfestigkeit kg/cm ²	Wertziffer kg/cm ²	Sprödigkeits- verhältniszahl
1	Flint O 118	6273	430	14,6
2	Schweres Flint S 386	4470	98	45,6
3	Borat-Flint S 389	6223	1406	4,4
4	Normalglas	8770	259	33,9
5	Geräteglas	8910	855	10,4
6	59III	9380	259	36,2
7	Zylinderglas	9397	404	23,3

Die Dezimalstellen haben bei den Sprödigkeitszahlen natürlich keine Bedeutung, da schon die Einerstellen als ganz unsicher betrachtet werden müssen.

Von den 7 Glassorten sind demnach drei als besonders spröde und eine, nämlich das Borat-Flint S 389, als verhältnismäßig sehr wenig spröde erkannt worden, während die drei übrigen Mittelstellungen einnehmen.

München, im Dezember 1911.
