

**5. Ueber die Elasticität
und über die Zug- und Druckfestigkeit ver-
schiedener neuer Gläser in ihrer Abhängigkeit
von der chemischen Zusammensetzung; von
A. Winkelmann und O. Schott.**

(Im Auszuge in der Sitzung der med.-naturw. Gesellschaft in Jena am
15. Dec. 1893 mitgetheilt.)

Die physikalischen Eigenschaften verschieden zusammengesetzter Gläser sind schon vielfach zum Gegenstande experimenteller Forschung gemacht. Am ausgedehntesten wurden bisher die optischen Eigenschaften der Gläser untersucht; diese Untersuchungen haben bekanntlich in neuerer Zeit zur Herstellung neuer Gläser und damit zur Vervollkommnung optischer Instrumente wesentlich beigetragen.¹⁾ Ferner wurde für eine grössere Anzahl von Gläsern der thermische Ausdehnungscoefficient²⁾, die specifische Wärme³⁾ und die thermische Leitungsfähigkeit⁴⁾ ermittelt und in ihrer Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung dargestellt.

Von den in der Ueberschrift genannten Eigenschaften liegen dagegen nur wenige Beobachtungen vor, sodass, soviel uns bekannt, es an einer systematischen Untersuchung dieser Eigenschaften für verschieden zusammengesetzte Gläser bisher noch fehlt.

Die Elasticität und Zugfestigkeit ist von Wertheim und

1) Vgl. Abbe, „Ueber Verbesserungen des Mikroskops mit Hilfe neuer Arten optischen Glases“. Sitzb. der med.-naturw. Gesellschaft zu Jena 9. Juli 1886. — S. Czapski, „Mittheilungen über das glastechnische Laboratorium in Jena und die von ihm hergestellten neuen Gläser“. Zeitschrift für Instrumentenkunde. 1886. — Schott, „Ueber Glasmelzerei für optische und andere wissenschaftliche Zwecke“. Vortrag im Verein zur Beförderung des Gewerbevereines in Berlin 4. Juni 1888.

2) O. Schott, „Ueber die Ausdehnung von Gläsern und über Verbundglas“. Vortrag im Verein zur Beförderung des Gewerbevereines in Berlin 4. April 1892.

3) Winkelmann, Wied. Ann. **49**. p. 401. 1893.

4) Paalhorn. Demnächst erscheinende Dissertation.

Chevandier¹⁾ an vier Gläsern, deren chemische Zusammensetzung nicht näher angegeben ist²⁾, untersucht.

Die Resultate waren folgende:

	Dichtigkeit	Elasticitätscoefficient. kg pro qmm	Zugfestigkeit. kg pro qmm
Fensterglas von St. Quirin	2,517	7919	1,763
Spiegelglas von Cirey	2,454	7015	1,400
Krystallglas von Valery	2,446	6890	1,002
Krystallglas von Baccarat	3,320	5477	0,665

Ferner ist in Dingler's Journal³⁾ die Zugfestigkeit für drei verschiedene Gläser angegeben:

	Zugfestigkeit kg pro qmm
Grünes Glas	2,032
Crown Glas	1,795
Flintglas	1,610

Die Druckfestigkeit ist nach der gleichen Mittheilung etwa zehnmal grösser als die Zugfestigkeit; sie beträgt für Flintglas 16,46 kg pro qmm.

W. Voigt⁴⁾ hat den Elasticitätscoefficienten eines grünen Glases (spec. Gew. 2,540; Brechungsverhältniss 1,55) nebst dem Torsionscoefficienten bestimmt und daraus das Verhältniss der Quercontraction zur Längendilation abgeleitet. Er constatirt, dass die den ursprünglichen ebenen Begrenzungen der 50 mm dicken Platte anliegenden Schichten sich in einem anderen Zustande der Elasticität befanden, als die in grösserer Tiefe liegenden. Die Differenz der Coefficienten beweist dies:

Elasticitätscoefficient kg pro qmm	Torsionscoefficient	
6425 }	2635 }	Stäbchen in unmittelbarer Nähe der Oberfläche geschnitten
6442 }	2645 }	
6480 }	2672 }	Stäbchen aus der Mitte der Platte geschnitten
6460 }	2671 }	

Pscheidl⁵⁾ hat die Elasticitätscoefficienten für drei verschiedene Gläser ermittelt:

- 1) Wertheim und Chevandier, Compt. rend. **20**. p. 1637. 1845.
- 2) Auch bei den im Folgenden genannten Untersuchungen ist die chemische Zusammensetzung der Gläser nicht mitgetheilt.
- 3) Dingler's Journal **184**. p. 165. 1867.
- 4) W. Voigt, Wied. Ann. **15**. p. 497. 1882.
- 5) Pscheidl, Beibl. **6**. p. 847. 1882.

	Elasticitätscoefficient		kg pro qmm
Glas aus Fürth	7495	und	7359
Belgisches Glas	7534	„	7493
Böhmisches Glas	7523	„	7550

J. Kiewiet¹⁾ hat den Elasticitätscoefficienten einer Glas-
sorte als Function der Temperatur bestimmt:

$$E_t = E_0(1 - \alpha \cdot t)$$

wo $E_0 = 7692$; $\alpha = 0,000331$ ist.

Die Beobachtungen umfassen das Temperaturintervall von
 10^0 bis 100^0 .

J. v. Kowalski²⁾ hat in seinen Untersuchungen über die
Festigkeit des Glases die Elasticitätscoefficienten aus Biegung
und Torsion bestimmt, ferner die Festigkeit beim Zuge, bei
der Biegung, bei der Torsion und bei der Compression für
eine Glassorte.

Es war

Elasticitätscoefficient	6702	kg pro qmm
Zugfestigkeit	8,767	„ „ „
Druckfestigkeit	37,700	„ „ „

In einer späteren Arbeit hat v. Kowalski³⁾ die Elasti-
cität und die Festigkeit auch bei höherer Temperatur bestimmt.
Er fand für den Elasticitätscoefficienten

$$E_t = E_0(1 - \alpha t), \text{ wo } E_0 = 6770 \text{ und } \alpha = 0,00106.$$

Die Beobachtungen umfassen das Temperaturintervall von
 9^0 bis 200^0 ; bei Temperaturen über 100^0 war eine ziemlich
grosse elastische Nachwirkung bemerkbar, die störend wirkte.

Für Biegungs- und Torsionsfestigkeit als Function der
Temperatur wurde gefunden:

Temperatur	Biegungsfestigkeit $P = \text{maxim. Spannung}$	Temperatur	Torsionsfestigkeit $P = \text{maxim. Spannung}$
12^0	8,794 kg	12^0	10,142 kg
100^0	8,701 „	78^0	9,186 „
150^0	8,639 „	100^0	9,006 „
200^0	8,604 „		

Den Anlass zu den im Folgenden mitgetheilten Unter-
suchungen gab der Wunsch, jene Eigenschaften der Gläser zu

1) J. Kiewiet, Wied. Ann. **29**. p. 650. 1886.

2) J. v. Kowalski, Wied. Ann. **36**. p. 307. 1889.

3) J. v. Kowalski, Wied. Ann. **39**. p. 155. 1890.

ermitteln, von denen die Widerstandskraft abhängt, die die Gläser bei plötzlichen Temperaturänderungen dem Zerspringen entgegensetzen. Zu den hierfür maassgebenden Grössen gehören ausser anderen der Elasticitätscoefficient und die Zugfestigkeit; im Anschluss an letztere wurde auch die Druckfestigkeit einiger Gläser bestimmt.

§ 1. Elasticitätscoefficienten.

Die Elasticitätscoefficienten wurden aus Biegungsbeobachtungen, zu denen die Methode von A. König¹⁾ benutzt wurde, berechnet. Ein massives Stativ von Messing, mit drei Stellschrauben versehen, trägt zwei feste Stahlschneiden in einem Abstände von 100 mm, auf denen der zu untersuchende Stab gelegt wurde. An den Enden des Stabes waren durch Fassungen zwei Spiegel mit ihren Flächen so gegeneinander gerichtet, dass ein Lichtstrahl von einer entfernten Scala über den ersten Spiegel gehend von dem zweiten auf den ersten Spiegel und von da in ein Fernrohr geworfen wird. In der Mitte zwischen den beiden Schneiden wird durch eine Auslösungsvorrichtung eine dritte Schneide, welche die Waagschale trägt, herunter gelassen. Hierdurch wird eine Durchbiegung des Stabes bewirkt, welche eine Neigung der Spiegel zur Folge hat.

Wird durch eine Belastung von P kg eine Neigung φ eines jeden der beiden Spiegel bewirkt, so ist

$$E = \frac{3}{4} \cdot \frac{l^3}{a^3 \cdot b} \cdot \frac{P}{\text{tg } \varphi},$$

wo E des Elasticitätscoefficienten (Kilogramm Gewicht pro Quadratmillimeter), l den Abstand der beiden festen Schneiden in Millimeter, a die Höhe des rechteckigen Stabquerschnittes in Millimeter, b die Breite des rechteckigen Stabquerschnittes in Millimeter bedeutet.

Bezeichnet man mit D die Entfernung zwischen der Scala und dem von dieser entfernteren Spiegel, mit d den Abstand der beiden Spiegel und mit v die infolge der Durchbiegung in

1) A. König, Wied. Ann. 28. p. 108. 1886.

dem Fernrohr beobachtete Verschiebung des anvisirten Scalenspunktes, so ist¹⁾

$$(1) \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{v}{4D + 2d}$$

und daher

$$(2) \quad E = 3(D + \frac{1}{2}d) \frac{l^2}{a^3 \cdot b} \cdot \frac{P}{v}.$$

Nach dieser Formel sind die zunächst folgenden Beobachtungen berechnet.

Glas Nr. 19. $l = 100$ mm
 $a = 3,258$ „
 $b = 15,577$ „
 $D = 6068$ „
 $d = 108$ „

Belastung P in kg	Verschiebung v in mm		Differenz beob. — ber.
	beob.	ber.	
1,15	54,7	54,76	— 0,06
2,15	102,6	102,38	+ 0,22
3,15	150,6	150,00	+ 0,60
4,15	197,8	197,62	+ 0,18
5,15	245,3	245,24	+ 0,06
6,15	292,5	292,86	— 0,36
7,15	339,8	340,48	— 0,68

Berechnet man den Mittelwerth der Verschiebung für 1 kg Belastung, indem man die Summe der Verschiebungen durch die Summe der Belastungen dividirt, so erhält man 47,618 mm; mit diesem Werthe wird $E = 7160$.

Berechnet man ferner mit dem eben gewonnenen Werthe die Verschiebungen für die einzelnen Belastungen, so ergeben sich die unter „berechnet“ angegebenen Zahlen. Die Differenzen dieser gegenüber den beobachteten zeigen einen eigenthümlichen Gang, insofern am Schluss der Beobachtungen wachsende negative Differenzen auftreten. Die Genauigkeit der Ablesung beträgt etwa 0,2 mm, da trotz der doppelten Spiegelung das Bild ein scharfes war; die oben angegebenen Differenzen überschreiten deshalb die wahrscheinlichen Ablesungsfehler. Würde die Durchbiegung mit wachsender Belastung stärker als diese selbst wachsen, so müssten die Zahlen

1) A. König, l. c.

gerade das umgekehrte Verhalten zeigen; es müssten für die stärksten Belastungen die nach der oben angegebenen Art berechneten Werthe kleiner als die beobachteten sein.

Nachdem andere Gläser das gleiche Verhalten gezeigt hatten, wurde ein Metall untersucht, und zwar Eisen.

Eisen. $l = 100$ mm
 $a = 3,076$ „
 $b = 13,083$ „
 $D = 6068$ „
 $d = 108$ „

Belastung P in kg	Verschiebung v in mm		Differenz beob. — ber.
	beob.	ber.	
2,5	64,0	63,62	+ 0,38
4,5	114,8	114,54	+ 0,26
6,5	165,6	165,44	+ 0,16
8,5	216,2	216,34	- 0,14
10,5	266,6	267,24	- 0,64

Der Eisenstab zeigt nach diesen Beobachtungen das gleiche Verhalten, wie der oben angeführte Glasstab.

Die Formel (1) resultirt aus der Gleichung

$$(1a) \quad \operatorname{tg} 4 \varphi = \frac{v}{D + \frac{d}{2}}$$

indem

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{4} \operatorname{tg} 4 \varphi$$

gesetzt ist.

Rechnet man nach der strengeren Formel (1a), so erhält man beim Glase für $P = 7,15$ und $v = 339,8$, für den Elasticitätscoefficienten $E = 7171,1$, während für das gleiche P und v die Formel (1) $E = 7174,0$ liefert. Der Unterschied beträgt nur 0,04 Proc., während die Differenz des beobachteten und berechneten Werthes von v 0,2 Proc. beträgt. Durch die kleine Ungenauigkeit in der Rechnung von $\operatorname{tg} \varphi$ lassen sich die Differenzen daher nicht erklären; dagegen liefert die Berücksichtigung des folgendenden Umstandes den gewünschten Aufschluss.

Der Abstand der beiden Schneiden, auf denen der Stab

$$\operatorname{tg} 4\varphi = \frac{v}{D(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha) + \frac{d}{2} - v \cdot \operatorname{tg} \alpha} = \frac{v}{N},$$

wenn man $(d/2) \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}^2 4\varphi$ gegen v vernachlässigt. Diese Grösse beträgt bei dem Maximalwerth von φ in den Beobachtungen des Glases, also für $v = 339,8$, nur 0,026 und kann deshalb unberücksichtigt bleiben.

Nach dem eben angegebenen Werthe $\operatorname{tg} 4\varphi$ wird daher der Elasticitätscoefficient

$$(2a) \quad E = \frac{3 \cdot l^2}{a^3 \cdot b} \left\{ D(1 + \operatorname{tg}^2 \alpha) + \frac{d}{2} - v \operatorname{tg} \alpha \right\} \cdot \frac{P}{v}.$$

Zur Bestimmung von E ist die Kenntniss von $\operatorname{tg} \alpha$ nöthig; diese ergibt sich unmittelbar aus der Beobachtung der Scalpunkte A und E . Für das untersuchte Glas Nr. 19 war $\operatorname{tg} \alpha = 0,15623$.

Um den das verschiedene Gewicht der Beobachtungen berücksichtigenden Mittelwerth von E zu erhalten, berechnet man für die verschiedenen P und v den Ausdruck $N \cdot P/v$ und bildet

$$\frac{\frac{N_1 \cdot P_1}{v_1} \cdot P_1 + \frac{N_2 \cdot P_2}{v_2} \cdot P_2 + \dots}{P_1 + P_2 + \dots}$$

Dieser Ausdruck wird für das Glas Nr. 19 gleich 130,90 und hiermit

$$E = 7289,8.$$

Berechnet man mit diesem E aus der Gleichung (2a) die Verschiebungen v für die verschiedenen P , so erhält man

Belastung P in kg	Verschiebung v in mm		Differenz beob. — ber.
	beob.	ber.	
1,15	54,7	55,02	— 0,32
2,15	102,6	102,75	— 0,15
3,15	150,6	150,36	+ 0,24
4,15	197,8	197,85	— 0,05
5,15	245,3	245,24	— 0,06
6,15	292,5	292,51	— 0,01
7,15	339,8	339,67	+ 0,13

Die Differenzen sind einerseits kleiner als früher und zeigen andererseits keinen ausgesprochenen Gang in den Vorzeichen mehr.

Berechnet man in der gleichen Weise die Beobachtungen für den Eisenstab, wo $\operatorname{tg} \alpha = 0,15754$ war, so erhält man

$$E = 19322$$

und ferer

Belastung P in kg	Verschiebung v in mm		Differenz beob. — ber.
	beob.	ber.	
2,5	64,0	63,83	+ 0,17
4,5	114,8	114,76	+ 0,04
6,5	165,6	165,55	+ 0,05
8,5	216,2	216,21	— 0,01
10,5	266,6	266,75	— 0,15

Auch hier sind die Differenzen beträchtlich kleiner als bei der ersten Berechnung und liegen sämtlich innerhalb der Grenzen der unvermeidlichen Beobachtungsfehler.

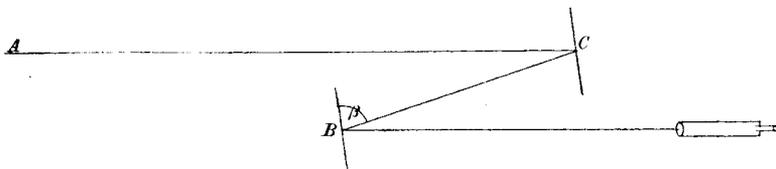


Fig. 2.

Die obige Rechnung ist aber, weil P/v nicht constant ist, etwas weitläufig; es wurde deshalb die spätere Anordnung so getroffen, dass der von der Scala kommende Strahl nicht oberhalb, sondern seitlich an dem ersten Spiegel vorbeiging. Die Spiegelnormale liegt dann nicht mehr in der Verticalebene, die durch die Axe des Stabes geht, sondern seitlich davon. Stellt man die Spiegel so, dass die Strahlen der Scala eben an dem ersten Spiegel vorbeigehen, und schliesst dann der reflectirte Strahl BC mit dem Spiegel den Winkel β ein, so ist mit genügender Annäherung die corrigirte Verschiebung v'

$$v' = \frac{v}{\sin \beta},$$

wenn v die beobachtete Verschiebung ist. Ist ε die Breite eines Spiegels und δ der Abstand der beiden Spiegel, so ist

$$\cos \beta = \frac{\varepsilon}{2\delta}$$

Da $\varepsilon = 15$ mm, $\delta = 110$ mm war, so wird $\sin \beta = 0,99765$; der Einfluss dieser Correction ist also nur 0,235 Proc.

Der früher benutzte Eisenstab wurde in der angegebenen Weise mit seitlich an dem Spiegel vorbeigehendem Licht beobachtet. Die Resultate waren folgende:

Belastang P in kg	Verschiebung v in mm		Differenz beob. — ber.
	beob.	ber.	
2,5	62,4	62,27	+ 0,13
4,5	112,0	112,09	- 0,09
6,5	162,0	161,90	+ 0,10
8,5	211,6	211,72	- 0,12
10,5	261,5	261,53	- 0,03

Der Mittelwerth von v/P wird 24,908; berechnet man mit diesem die einzelnen Werthe von v , so erhält man die unter „berechnet“ angegebenen Resultate, welche bis auf kleine Beobachtungsfehler mit den beobachteten Werthen übereinstimmen. Der Elasticitätscoefficient ergibt sich aus der Formel

$$E = 3 \left(D + \frac{d}{2} \right) \frac{l^2}{a^3 b} \cdot \frac{P}{v} \cdot \sin \beta$$

wo

$$\begin{array}{ll} D = 6068 & \text{mm} & b = 13,083 & \text{mm} \\ d = 110 & \text{''} & v = 24,908 & \text{''} \\ l = 100 & \text{''} & \bar{P} & \text{''} \\ a = 3,076 & \text{''} & \sin \beta = 0,99765 & \text{''} \end{array}$$

Hiermit wird $E = 19321$, während früher der fast identische Werth 19322 erhalten wurde.

Auch das früher schon behandelte Glas Nr. 19 wurde noch durch seitliches Licht untersucht; es ergab sich $E = 7302,2$, während früher 7289,8 gefunden war. Wenn hier die Uebereinstimmung auch nicht so vollkommen wie beim Eisen ist, so beweist doch der geringe Unterschied von 0,17 Proc., dass beide Beobachtungsarten zu wesentlich gleichen Resultaten führen.

Indessen ist zu bemerken, dass die Genauigkeit der Resultate nicht allein nach der oben angegebenen Differenz zu bemessen ist. Denn ausser der Scalerverschiebung gehen die Dimensionen des Stabes und die Entfernung der Scala in die Berechnung des Elasticitätscoefficienten ein. Von dem grössten Einfluss ist die Bestimmung der Stabdicke a ; diese wurde

mit Hülfe des Abbe'schen Dickenmessers ausgeführt, der eine fehlerfreie Ablesung bis auf 0,001 mm gestattet; die Einstellungsgenauigkeit ist etwa 0,002 mm. Die Dicke der Stäbe wurde an 15 verschiedenen Stellen gemessen, die gleichmässig über die Oberfläche vertheilt waren; es kamen hierbei (allerdings nur ausnahmsweise) Unterschiede bis zu 0,1 mm vor. Bei der Mittelbestimmung wurde den drei Werthen, die der Stabmitte entsprachen, das doppelte Gewicht gegeben. Setzt man voraus, dass die so gewonnene Dicke eine Unsicherheit von 0,005 mm enthält, so hat dies auf den Elasticitätscoefficienten, da die Stabdicke etwa 3 mm war, einen Einfluss von 0,5 Proc. — In der Breite b der Stäbe werde gleichfalls eine Unsicherheit von 0,005 mm vorausgesetzt, wodurch für E eine Unsicherheit von 0,04 Proc. resultirt. Ein Fehler in $(D + \frac{1}{2}d)$ hat nur einen geringen Einfluss auf E ; 2 mm würden nur 0,03 Proc. ausmachen.

Der Abstand l der beiden Schneiden des Apparates wurde direct mit einem feinen Maassstab gemessen und genau 100 mm gefunden. Eine weitere Controlle erhielt man dadurch, dass man eine Spiegelglasplatte mit einer zarten Wachsschicht bedeckte, auf die Schneiden legte und dann den Abstand der von den Schneiden erzeugten Linien bestimmte. Um zu erfahren, ob die zu belastende Schneide genau in der Mitte der beiden festen Schneiden den Stab berührt, wurden zwei Spiegelglasplatten mit Wachs nacheinander in den Apparat eingesetzt und so durch die Schneiden drei Linien erhalten; die Glasplatten wurden dann umgekehrt aufeinander gelegt, sodass eine kleine Differenz der beiden Theile nachweisbar war. Es konnte aber eine solche nicht erkannt werden.

Fasst man das Gesagte zusammen und berücksichtigt, dass auch die Beobachtungen der Scalenverschiebung höchstens einen Fehler von 0,1 Proc. in E hervorbringen, so ergibt sich, dass, wenn sämmtliche Fehler in dem gleichen Sinne wirken, ein Fehler von 0,7 Proc. resultiren würde; es ist aber unwahrscheinlich, dass die Fehler 0,4 Proc. erreichen. Um eine Controlle zu haben, sind zweimal Gläser gleicher Zusammensetzung, aber von verschiedenen Dimensionen untersucht; die Resultate stimmen bis auf weniger als 0,2 Proc. überein (vgl. Nr. 24 u. Nr. 38).

In der folgenden Tabelle sind die Beobachtungsergebnisse zusammengestellt. Wir haben uns darauf beschränkt, ausser den Dimensionen der Glasstäbe nur noch die Maximalbelastung, die bei der Bestimmung zur Anwendung kam, anzugeben. Die chemische Zusammensetzung der Gläser findet man in § 2 Tabelle V. Sämmtliche Gläser waren gut gekühlt und befanden sich zum grössten Theil in einem Zustande der Homogenität, wie er gutem optischen Glas eigen ist. Ein solches Glas stellt in Hinsicht chemischer und physikalischer Identität in allen seinen Theilen ein Material dar, wie es wohl kaum ein anderes im festen Aggregatzustande gibt.

Tabelle¹⁾ I.

Fortlaufende Nr.	Dicke des Stabes <i>a</i> in mm	Breite des Stabes <i>b</i> in mm	Maximalbelastung kg	Elasticitätscoefficient <i>E</i> in kg/mm ²
19 oder 5	3,258	15,577	7,15	7296 ²⁾
20	3,196	16,299	2,65	5088 ³⁾
21	3,262	15,848	5,15	5474
22 oder 2	3,286	16,348	5,15	4699
23	2,911	15,122	6,15	7952 ³⁾
24	2,695	13,293	2,65	5384
	2,763	13,394	3,15	5393
25	3,165	15,402	4,15	6498 ³⁾
26	3,334	16,076	5,5	5467
27	2,859	15,383	5,15	6780 ³⁾
28	3,133	15,054	6,15	6626
29 oder 8	2,863	15,768	4,15	6514
31	3,000	15,672	4,65	6296 ³⁾
32	3,151	16,040	5,15	5862
33	3,028	15,750	4,15	5512 ³⁾
34	4,159	9,269	7, 5	7001
35 oder 7	4,335	9,314	6,5	7077

1) Unter den Gläsern befinden sich einige, die auch früher bei der Bestimmung der specifischen Wärme untersucht waren. Um Verwechslungen vorzubeugen, beginnt die Nummerierung in der obigen Tabelle mit 19. Ist für ein Glas die specifische Wärme bestimmt, so ist die entsprechende Nummer aus der vorigen Arbeit (Wied. Ann. 49. p. 410. 1893) beigelegt. — Es möge hier bemerkt werden, dass in der damals angegebenen Tabelle beim Glase Nr. 9 = S. 201 ein Fehler sich eingeschlichen hat; das Glas enthielt nämlich 4,0 MgO, während in der Tabelle Null angegeben ist.

2) Mittel der beiden früher angegebenen Werthe.

3) Bei einer zweiten Belastung mit dem angegebenen Maximalgewicht zerbrach das Glas.

Ausser den in der vorigen Tabelle angegebenen Gläsern wurden noch einige andere untersucht, die nicht in Form von Stäben hergestellt werden konnten. Es wurde hierzu die Kundt'sche Methode zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit benutzt, indem die Gläser in Form von Röhren verwendet wurden. Der Elasticitätscoefficient wird bekanntlich nach der Formel

$$E = \frac{U^2 \cdot s}{9810}$$

berechnet, wo U die Schallgeschwindigkeit in $m.$ und s das spezifische Gewicht des Glases bezeichnet. Dabei ist

$$U = 330 \sqrt{1 + 0,004 t} \cdot \frac{L}{l},$$

wenn t die Temperatur und L/l das Verhältniss der Wellenlängen desselben Tones in dem Glase und in der Luft bedeutet.

Die folgende Tabelle enthält die Resultate:

Tabelle II.

Fortl. Nr.	Chemische Zusammensetzung	t	$\frac{l}{L}$	s	E in kg/mm ²	Bemerkungen		
36	11 Na ₂ O	20,6	15,98	2,370	7256	Ein massiver Stab gab das gleiche Resultat wie ein hohler Stab		
	12 B ₂ O ₃	22,7	15,91	2,370	7264			
	5 Al ₂ O ₃							
	72 SiO ₂							
37	14 B ₂ O ₃	20,3	14,55	2,848	7232			
	4,5 Al ₂ O ₃							
	51,3 SiO ₂							
	0,2 As ₂ O ₅							
	2,50 BaO							
5,0 Mn ₂ O ₃								
38 = 6 ¹⁾	14 Na ₂ O	21,2	15,591	2,585	7568	7543	Gekühltes Glas	
	2 B ₂ O ₃	18,7	15,647	2,585	7518			
	7,5 Al ₂ O ₃							7159
	67,3 SiO ₂							
	0,2 Mn ₂ O ₃	21,2	15,181	2,585	7175			
	7 ZnO	21,4	15,142	2,585	7143			
	7 CaO							

Um zu erfahren, ob die beiden Bestimmungsmethoden des Elasticitätscoefficienten vergleichbare Resultate liefern, wurde das zuletzt angeführte Glas auch durch Biegungsbeobachtungen untersucht.

1) Thermometernormalglas.

Glas Nr. 38.

Dicke des Stabes a in mm	Breite des Stabes b in mm	Maximalbelastung in kg	Elasticitätscoefficient E in kg/mm ²
3,032	15,001	5,15	7343
3,658	15,824	8,50	7338

} 7340

Da die untersuchten Stäbchen sämtlich gekühlt waren, ist der Werth 7340, welcher sich aus den Biegungsbeobachtungen ergibt, mit 7543 aus den Beobachtungen der Schallgeschwindigkeit zu vergleichen; die letzte Zahl ist um 2,8 Proc grösser, als die erste.

Das nicht gekühlte Glas (Nr. 38) zeigt nach Tabelle II einen um mehr als 5 Proc. kleineren Elasticitätscoefficienten, als das gekühlte Glas. Auch Quincke¹⁾ fand E bei schlecht gekühlten Glasfäden kleiner, als bei gut gekühlten; der Unterschied bei Quincke war aber viel grösser, als oben angegeben.

Bei der Tabelle I ist mehrfach bemerkt, dass der untersuchte Glasstab durch eine zweite Belastung, die nicht grösser als die vorher benutzte Maximalbelastung war, zerbrach; es vergingen zuweilen mehrere Minuten, bis nach der neuen Belastung der Bruch eintrat. Um diesen Vorgang genauer zu verfolgen, wurde eine einfache Einrichtung benutzt, die ein in Gang befindliches Uhrwerk arretirte, sobald der Bruch erfolgte. Es zeigte sich hierbei, dass die Gläser oft nach längerer Zeit zerbrachen bei einer Belastung, die *kleiner* war, als jene, die sie früher, wenn auch nur kürzere Zeit ausgehalten hatten. Es wurden, um möglichst fehlerfreie Oberflächen zu haben, Spiegelglasscheiben benutzt; die Resultate waren folgende:

Das Glas trug:	bei einer Belastung von	zerbrach es nach
4 kg	$3\frac{1}{2}$ kg	80 Min.
5 "	$4\frac{1}{2}$ "	245 "
6 "	$5\frac{1}{2}$ "	15 "
6 "	$5\frac{1}{2}$ "	20 "
7 "	7 "	690 "

Eine mit der Zeit wachsende Durchbiegung des Glases

¹⁾ Quincke, Wied. Ann. 19. p. 548. 1883.

konnte nicht nachgewiesen werden; bei dem Versuche mit 7 kg Belastung wurde constatirt, dass in der Zeit von 45 Minuten eine Scalenverschiebung nicht eintrat, die Beobachtung wurde dann abgebrochen. Es ist deshalb wahrscheinlich, dass eine minimale Verletzung an der Oberfläche des Glases, die sich äusserst langsam durch das belastende Gewicht vergrössert, plötzlich den Bruch herbeiführt.

Vergleicht man die gewonnenen Resultate für die Elasticitätscoefficienten mit der chemischen Zusammensetzung, so sieht man leicht, dass einzelne Bestandtheile (z. B. B_2O_3) einen hervorragenden Einfluss auf die Grösse des Elasticitätscoefficienten ausüben. Die zahlenmässige Darstellung dieses Einflusses lässt sich aber nur schwer erreichen. Der Grund ist vermuthlich der, dass Volumenänderungen ins Spiel treten, deren Grösse uns für die einzelnen Bestandtheile ganz unbekannt ist. Wenn trotzdem der Versuch gemacht ist, die Elasticitätscoefficienten als Function der chemischen Zusammensetzung darzustellen, so geschieht dies in der Absicht, eine Einsicht über den Einfluss der einzelnen Bestandtheile zu gewinnen, die besser ist, als ohne eine solche Darstellung erreichbar wäre.

Besteht das Glas aus den Bestandtheilen 1, 2, 3 . . . , die in den Gewichtsmengen $a_1, a_2, a_3 \dots$ vorhanden sind, wo

$$a_1 + a_2 + a_3 + \dots = 100$$

ist, so wurden in der Gleichung

$$(3) \quad E = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \dots$$

die Grössen $x_1, x_2, x_3 \dots$ aus den beobachteten Werthen ermittelt. Man erhielt folgende Zahlen:

Tabelle III.

Na_2O ;	K_2O ;	B_2O_3 ;	Al_2O_3 ;	SiO_2 ;	PbO ;	As_2O_5 ;
100	71	20	160	65	47	40
	BaO ;	ZnO ;	MgO ;	P_2O_5 ;	CaO .	
	100	15	600	38	100	

Mit diesen Werthen wurden die in der folgenden Tabelle mitgetheilten Elasticitätscoefficienten berechnet.

Tabelle IV.

Glas Nr.	Elasticitätscoefficient		Differenz beob.-ber. in Proc.
	beob.	ber.	
19 oder 5	7296	6695	+ 8
20	5088	5060	+ 1
21	5474	5323	+ 3
22 oder 2	4699	4910	- 4
23	7952	7694	+ 3
24	5389	5619	- 4
25	6498	6495	± 0
26	5467	5502	- 1
27	6780	6714	+ 1
28	6626	6894	- 4
29 oder 8	6514	6714	- 3
31	6296	6461	- 3
32	5862	5817	+ 1
33	5512	5301	+ 4
34	7001	7275	- 4
35 oder 7	7077	7125	- 1
36	7260	6820	+ 6
37	7232	6922	+ 4
38	7340	7032	+ 4

Die Differenzen gehen bis zu 8 Proc., eine grössere Uebereinstimmung war von vornherein nicht zu erwarten.¹⁾

Die Werthe in der Tabelle III, die den Einfluss der einzelnen Bestandtheile auf den Elasticitätscoefficienten angeben, verdienen um so mehr Vertrauen, je häufiger und in je stärkerer Menge diese Bestandtheile in den untersuchten Gläsern vorkommen; am unsichersten in dieser Beziehung stellen sich As_2O_5 , MgO , CaO . Sieht man hiervon ab, so ordnen sich die Bestandtheile in folgender Reihenfolge: ZnO , B_2O_3 , P_2O_5 , PbO , SiO_2 , K_2O , BaO , Na_2O , Al_2O_3 .

§ 2. Zugfestigkeit.

Bei der Bestimmung der Zugfestigkeit sind zwei Punkte besonders zu berücksichtigen: 1. dass beim Zerreißen die ausgeübte Zugkraft *central* wirkt, sodass nur eine Längsdehnung hervorgebracht, ohne dass gleichzeitig eine Biegung des untersuchten Stabes herbeigeführt wird; 2. dass die Ober-

1) Auch der Versuch, durch andere Formen der Gleichung als der oben benutzten (3) eine grössere Uebereinstimmung zu erzielen, war ohne Erfolg.

fläche des zu zerreisenden Glaskörpers wenigstens in der Nähe der Zerreißungsstelle fehlerfrei ist.

Auf beide Punkte hat W. Voigt bei seinen in Verbindung mit A. Sella ausgeführten Beobachtungen über die Zerreißungsfestigkeit des Steinsalzes ausführlich hingewiesen¹⁾ und einen Apparat angegeben, der die centrale Belastung möglichst vollkommen zu erreichen strebt. Der von uns benutzte Apparat war dem erwähnten nachgebildet und auf einem schweren Holzblock montirt. Die Belastung ging mehrfach über 100 kg hinaus und geschah nicht durch zuffließendes Quecksilber, wie bei Voigt, sondern blos durch Gewichte, sodass eine besondere Arretirungsvorrichtung nöthig wurde.

Das viereckige

Glasstäbchen *a b* (Fig. 3) mit quadratischem Querschnitt von 6 mm Seite wurde mit Siegellack in zwei Messingfassungen eingekittet.

Die obere Fassung *c*

ruhte mit einer Stahlspitze auf einer Schiene *ff*, die durch zwei Winkelstücke, die an dem Holzblock befestigt waren, getragen wurde. Die untere Fassung *d* trug gleichfalls auf einer Stahlspitze den Bügel *g*; dieser nahm in kleinen Vertiefungen die Spitzen *hh* auf, die mit dem Gehänge verbunden waren. Durch die Schraubenmutter *ss* konnte mittels des Eisenstabes *ll*, der durch den oben abgeflachten Ring *m* ging, das Gehänge ganz allmählich ausgelöst werden; beim Zerreißen war die Fallhöhe des Gehänges nur etwa 0,5 mm.

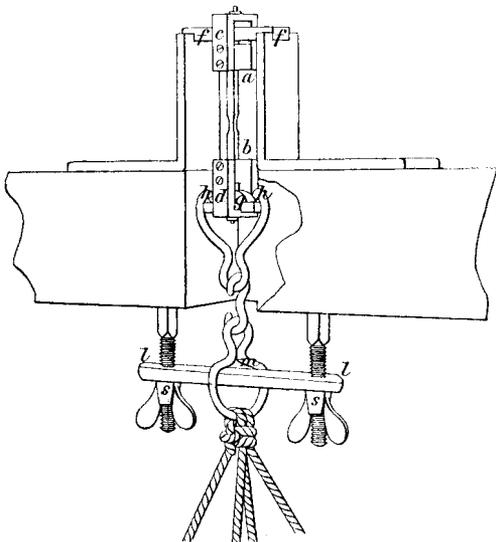


Fig. 3.

1) A. Sella u. W. Voigt, Gött. Nachrichten Nr. 14 p. 494. 1892.

Die ersten Versuche über die Zugfestigkeit zeigten an der Rissfläche, dass nur an einem Theil des Querschnittes ein wirkliches Zerreißen stattgefunden hatte, im übrigen dagegen ein Bruch eingetreten war. Die Bruchstelle ist nicht matt oder faserig, wie die Zerreißungsstelle, sondern glatt und glänzend.

Das Glas Nr. 19 der später angegebenen Tabelle V lieferte in dieser Weise folgende Werthe für die Zugfestigkeit.

Querschnitt q in qmm	Zerreissungsgewicht in kg	Zugfestigkeit P in kg pro qmm
22,9	102,92	4,50
17,4	67,92	3,90
17,95	77,92	4,34
13,33	52,90	3,96

Die so erhaltenen Werthe sind um mehr als 50 Proc. zu klein; denn der Mittelwerth der späteren genaueren Versuche gibt für die Zugfestigkeit 6,76 kg pro Quadratmillimeter. Die oben angegebenen Resultate wurden mit Stäbchen erhalten, die, ohne polirt zu sein, in der Mitte dünner geschliffen waren.

Um eine möglichst vollkommene Centrirung der Stäbchen zu erhalten, wurden einige, nachdem sie in die Fassungen eingesetzt und die Spitzen dieser Fassungen durch Doppelspitzen ersetzt waren, sorgfältig auf der Drehbank (während sie in den Fassungen sassen) in der Mitte abgeschliffen und dann polirt. Aber auch diese Vorsichtsmaassregel hatte nicht den gewünschten Erfolg, wie eine Betrachtung der Rissfläche sofort ergab; es zeigte sich an dieser noch ein grosser Theil glänzend. Da eine mangelhafte Centrirung hier ausgeschlossen war, konnte die Ursache nur noch in der Oberfläche der Stäbchen gesucht werden. Es war anzunehmen, dass das Abschleifen senkrecht zur Längsrichtung der Stäbchen kleine Verletzungen in der gleichen Richtung an der Oberfläche zurückliess, die auch durch das spätere Poliren nicht beseitigt waren. Es wurde deshalb in der gleichen Weise, wie dies Voigt hatte ausführen lassen, eine Verjüngung des mittleren Querschnittes dadurch herbeigeführt, dass auf den vier Seitenflächen des Stäbchens mittels eines Cylinders flache Höhlungen eingeschliffen und diese dann in der gleichen Richtung polirt wurden. So erhielt man Rissflächen, die mit Ausnahme eines

sehr kleinen Stückchens, ein faseriges Aussehen hatten, also wirklich durch Zerreißen zu Stande gekommen waren.

Die im Folgenden mitzutheilenden Versuchsergebnisse enthalten neben der Nummer die chemische Zusammensetzung, die Zugfestigkeit P in Kilogramm pro Quadratmillimeter, den Querschnitt q des Stäbchens in Quadratmillimetern, endlich die Zeit in Secunden, die das Stäbchen die Gesamtbelastung $P \cdot q$ ausgehalten hat, ehe ein Zerreißen eintrat. Diese Zeit wurde in jedem Falle bestimmt, indem man die Belastung höchstens 40 Sec. dauern liess; trat dann noch kein Zerreißen ein, so wurde das Gehänge arretirt, die Belastung um 1 bis 3 kg vergrößert und die Arretirung langsam gelöst. Dies wurde so lange wiederholt, bis ein Zerreißen eintrat.

Tabelle V.

Fortl. Nr.	Chemische Zusammensetzung	Zerreißungs-gewicht P kg pro qmm	Querschnitt q in qmm	Zeit in Sec. bis zum Zerreißen	Maximal- und Mittel-werth von P
19 oder 5	14 B_2O_3	6,51	11,55	30	6,95
	5 Al_2O_3	6,84	16,50	6	
	71 SiO_2	6,95	15,52	32	
		6,82	15,68	40	
	10 Na_2O	6,67	15,12	0	
20	20 SiO_2	3,53	15,05	35	3,53
	80 PbO	3,47	14,44	40	3,28
		2,90	17,26	35	
		3,21	17,81	28	
21	1 Na_2O	5,18	16,00	8	6,12
	3 K_2O	5,30	17,55	6	
	31 B_2O_3	5,43	16,75	14	
	7 Al_2O_3	5,73	17,26	12	
		6,12	18,34	13	
	32,75 SiO_2	5,61	18,75	0	
	25 PbO	5,99	18,40	0	
		5,82	18,42	23	
	0,25 As_2O_5	5,72	18,40	2	
22 oder 2	8 Na_2O	5,76	15,95	5	5,76
	69,1 B_2O_3	4,58	16,40	10	
	18 Al_2O_3	4,63	16,24	10	
	0,2 As_2O_5	4,79	15,70	3	
	4,7 BaO	4,91	16,73	11	

Fortl. Nr.	Chemische Zusammensetzung	Zerreisungsgewicht P kg pro qmm	Querschnitt q in qmm	Zeit in Sec. bis zum Zerreißen	Maximal- und Mittelwerth von P
23	10,2 B ₂ O ₃	6,78	17,00	0	7,52
	5 Al ₂ O ₃	7,24	17,30	12	
	34,5 SiO ₂	7,39	19,52	7	
	0,5 As ₂ O ₅	7,28	17,05	3	
	42,0 BaO	7,02	16,40	0	
	7,8 ZnO	7,52	16,64	0	
24	0,5 Na ₂ O	6,07	15,68	4	6,07
	8 K ₂ O	5,95	16,00	3	6,01
	44,2 SiO ₂				
	47 PbO				
	0,2 As ₂ O ₅				
	0,1 Mn ₂ O ₃				
25	17,0 Na ₂ O	7,69	17,72	8	8,51
	70,6 SiO ₂	7,00	16,48	5	7,84
	0,4 As ₂ O ₅	8,22	17,05	1	
		7,79	17,35	2	
	12,0 ZnO	8,51	16,48	11	
26	7 K ₂ O	5,39	17,22	7	5,39
	41 SiO ₂	4,75	17,47	0	
	51,7 PbO	4,34	19,27	4	4,67
	0,2 As ₂ O ₅	4,25	18,31	13	
	0,1 Mn ₂ O ₃	4,63	17,89	3	
27	12 K ₂ O	5,36	15,92	4	5,56
	3 B ₂ O ₃	5,56	15,84	3	
	10 Al ₂ O ₃				5,46
	1,5 As ₂ O ₅				
	4,0 MgO				
69,5 P ₂ O ₅					
28	5 Na ₂ O	5,91	17,30	2	6,76
	15 K ₂ O	5,60	17,72	11	6,09
	2,7 B ₂ O ₃	6,76	17,90	12	
	64,6 SiO ₂				
	0,4 As ₂ O ₅				
	10,2 BaO				
	0,1 Mn ₂ O ₃				
2 ZnO					
29 oder 8	16,8 Na ₂ O	6,79	16,97	9	6,79
	1,0 Al ₂ O ₃	6,72	18,62	25	6,42
	67,9 SiO ₂	6,00	18,43	3	
	8,1 PbO	6,16	17,90	15	
	0,3 As ₂ O ₅				
	0,1 Mn ₂ O ₃				
	5,8 ZnO				

Fortl. Nr.	Chemische Zusammensetzung	Zerreissungsgewicht P kg pro qmm	Querschnitt q in qmm	Zeit in Sec. bis zum Zerreißen	Maximal- und Mittelwerth von P
30 oder 10	33 K ₂ O	7,02	16,40	12	7,82
	58,7 SiO ₂	7,82	16,65	3	7,52
	0,3 As ₂ O ₅	7,72	15,52	13	
	8 CaO				
31	3 B ₂ O ₃	7,62	15,10	30	7,63
	8 Al ₂ O ₃	7,19	16,75	3	7,42
	1,5 As ₂ O ₅	7,63	16,40	2	
	28 BaO	7,06	14,20	18	
	59,5 P ₂ O ₅	7,60	17,14	5	
32	28 K ₂ O	8,08	14,25	2	8,32
	54,8 SiO ₂	8,32	14,44	17	8,09
	0,2 As ₂ O ₅	7,87	14,63	5	
	17 ZnO				
33	3 K ₂ O	4,66	14,00	15	5,32
	29,3 SiO ₂	5,17	14,28	5	4,97
	67,5 PbO	5,32	11,32	15	
	0,2 As ₂ O ₅	4,65	16,16	10	
34	10,3 Na ₂ O	7,93	14,52	10	8,16
	12,0 B ₂ O ₃	7,66	15,68	25	7,92
	4,5 Al ₂ O ₃	8,16	14,97	10	
	70,2 SiO ₂				
	3,0 MgO				
37 oder 7	10,5 Na ₂ O	8,35	15,60	8	8,35
	3,5 Al ₂ O ₃	7,73	14,90	0	7,46
	73,8 SiO ₂	6,62	15,90	14	
	0,2 Mn ₂ O ₃	7,16	16,08	8	
	5,0 ZnO				
	7,0 CaO				

Die Werthe für die Zugfestigkeit zeigen bei dem gleichen Glase zuweilen sehr grosse Unterschiede, die bis zu 24 Proc. (vgl. Nr. 26 u. 35) ansteigen; aber auch jene Gläser, welche die kleinsten Unterschiede für die Zugfestigkeit ergeben haben, zeigen doch noch Differenzen von mindestens 5 Proc. (von den Gläsern, bei denen nur zwei Beobachtungen vorliegen, ist hier abgesehen). W. Voigt hat schon die Ursache angegeben, weshalb die Bestimmungen der Zugfestigkeit eine viel geringere Uebereinstimmung ergeben, als sonstige Messungen, z. B. Elasticitätsuntersuchungen. „Bei den Elasticitätsbeobachtungen ist die gemessene Grösse das Product des gesetzmässigen Zu-

sammenhanges *aller* Theile des deformirten Körpers; infolgedessen kommen locale Störungen, Inhomogenitäten, Sprünge u. dgl. in kaum merklicher Weise zur Wirkung. Bei den Festigkeitsbestimmungen sind dagegen aber jene localen Störungen das eigentlich Ausschlaggebende; an einer fehlerhaften und geschwächten Stelle beginnt der Sprung, der sich unaufhaltsam ausbreitet . . .“¹⁾

Untersucht man zunächst die Lage der Rissflächen, so findet man sie gegenüber der Stäbchenaxe schief gestellt, nicht senkrecht dazu; zwischen den beiden Rissflächen springt ein kleiner Glaskeil heraus, dessen Kante an der Stelle liegt, wo der Riss begonnen hat.

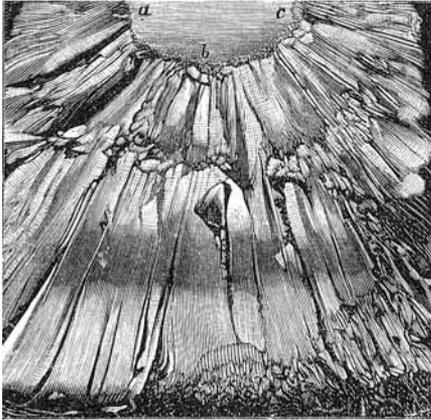


Fig. 4.

Diese Stelle ist durch eine kleine glänzende Fläche markirt, die in Fig. 4 durch *abc* bezeichnet ist.²⁾ Die Fläche stellt annähernd ein Stück eines kleinen Kreises dar, dessen Mittelpunkt in einer Seite oder einer Ecke des Rissquerschnittes liegt. Je grösser die glänzende Fläche im Verhältniss zur ganzen Rissfläche ist, um so geringer wird bei

dem gleichen Glase die Zugfestigkeit des Stäbchens gefunden. Nimmt die Fläche den grösseren Theil der Rissfläche ein (dies war der Fall bei den zuerst mitgetheilten unbrauchbaren Versuchen), so konnte das erwähnte Ausspringen eines Keiles nicht beobachtet werden. Aber auch dann, wenn die glänzenden Flächenstücke nur klein waren, ergaben sich doch bei fast vollkommen gleicher Grösse dieser Flächenstückchen noch beträchtlich verschiedene Werthe für die Zugfestigkeit. Es scheint die Zugfestigkeit um so grösser sich zu ergeben, je feiner die Faserung resp. die Structur der Rissfläche ist.

1) A. Sella u. W. Voigt, Gött. Nachrichten Nr. 14. p. 499. 1892.

2) Die Figur zeigt die Rissfläche in etwa 14facher linearer Vergrösserung.

Bei jenen Gläsern, für welche in der Tabelle nur zwei Versuche mitgetheilt sind, waren weniger Stäbchen vorhanden; von diesen haben nur solche brauchbare Resultate geliefert, bei denen die Rissfläche an der verjüngten Stelle eintrat, oder wenn dies nicht der Fall war, eine solche Structur zeigte, dass man auf ein stattgehabtes Zerreißen schliessen konnte. War aber die Rissfläche glatt (man kann dann, wie erwähnt, von einem eigentlichen Zerreißen nicht sprechen), so wurde der Versuch als misslungen betrachtet.

Da jeder Fehler an der Oberfläche des Materials und in der Centrirung des Stäbchens einen zu kleinen Werth für die Zerreißfestigkeit liefert, so kommen die Maximalwerthe wahrscheinlich den wahren Werthen näher, als die Mittelwerthe; deshalb sind die ersteren der späteren Berechnung zu Grunde gelegt.

Um für die Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der chemischen Zusammensetzung einen Anhalt zu gewinnen, wurde dieselbe durch die Formel

$$P = a_1 y_1 + a_2 y_2 + a_3 y_3 + \dots$$

darzustellen versucht. Es bedeuten hier $a_1, a_2 \dots$ die Gewichtsmengen der einzelnen Bestandtheile; $y_1, y_2 \dots$ werden aus den beobachteten Werthen von P ermittelt. Man erhielt so folgende Grössen:

Tabelle VI.

$\text{Na}_2\text{O} = 0,02$	$\text{As}_2\text{O}_5 = 0,03$
$\text{K}_2\text{O} = 0,01$	$\text{BaO} = 0,05$
$\text{B}_2\text{O}_3 = 0,065$	$\text{ZnO} = 0,15$
$\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,05$	$\text{MgO} = 0,01$
$\text{SiO}_2 = 0,09$	$\text{P}_2\text{O}_5 = 0,075$
$\text{PbO} = 0,025$	$\text{CaO}^1) = 0,20$

Mit diesen Grössen erhält man:

1) Für Mn_2O_3 , das im Maximum nur in 0,2 Proc. in den Gläsern vorkommt, ist kein Werth berechnet; die geringe Menge dieses Bestandtheiles ist mit jenem zusammengefasst, der in dem betreffenden Glase vorherrschend ist.

Tabelle VII.

Nr.	Zugfestigkeit in kg pro qmm		Differenz beob.-ber. in Proc.
	beob.	ber.	
19 oder 5	6,95	7,75	- 11
20	3,53	3,80	- 8
21	6,12	5,98	+ 2
22 oder 2	5,76	5,79	- 1
23	7,52	7,33	+ 3
24	6,07	5,27	+ 13
25	8,51	8,53	± 0
26	5,39	5,16	+ 4
27	5,56	6,21	- 12
28	6,76	7,06	- 5
29 oder 8	6,79	7,38	- 9
30 oder 10	7,82	7,24	+ 7
31	7,63	6,50	+ 15
32	8,32	7,78	- 6
33	5,32	4,37	+ 18
34	8,16	7,56	+ 7
35 oder 7	8,35	9,19	- 10

Die Differenzen zwischen den berechneten und beobachteten Werthen gehen bis zu 18 Proc., im Mittel beträgt diese Differenz 7,7 Proc. Eine grössere Uebereinstimmung konnte nach dem Obigen nicht erwartet werden.

Von den Werthen in der Tabelle VI, die den Einfluss der einzelnen Bestandtheile auf die Zugfestigkeit darstellen, enthalten diejenigen für As_2O_5 , MgO , CaO eine grosse Unsicherheit, da diese Bestandtheile nur in geringer Menge vorkommen. Sieht man von diesen Werthen ab, so ordnen sich die Bestandtheile in folgender Reihenfolge:

ZnO , SiO_2 , P_2O_5 , B_2O_3 , BaO , Al_2O_3 , PbO , Na_2O , K_2O , sodass ZnO den günstigsten Einfluss, K_2O den ungünstigsten Einfluss auf die Zugfestigkeit ausübt.

§ 3. Druckfestigkeit.

Die Bestimmung der Druckfestigkeit wurde mit einer hydraulischen Presse, die mit Oel gefüllt war, ausgeführt. Die Presse gestattete Drucke bis zu 10 000 kg anzuwenden und besass ein Manometer, welcher 100 kg ablesen liess.¹⁾ Dieses

1) Das Manometer gab den Druck in Atmosphären an; die obigen Angaben beziehen sich auf den Druck in Kilogramm, die der Druckcylinder in den einzelnen Fällen auszuhalten hat.

Manometer wurde durch ein solches mit kleineren Intervallen ersetzt, sodass die Theilung 50 kg angab; dasselbe reichte bis 7500 kg.

Die Einrichtung der Presse erlaubte durch Eindrehen einer mit der Presse verbundenen Schraube den Druck ganz allmählich zu steigern. Es zeigte sich zunächst, dass zur Hebung des Druckcylinders (zur Ueberwindung der Reibung etc.) ein Druck von 150 kg nöthig war, wenn die Presse nicht belastet wurde. Dann wurde durch eine doppelte Hebelvorrichtung mit einer Uebertragung von 1 zu 15 der Druckcylinder belastet und gleichzeitig das Manometer abgelesen, während die Schraube langsam eingedreht wurde. Die Beobachtungen waren folgende:

Belastung des Druckcylinders in kg	Angabe des Manometers in kg	Belastung — Angabe
0	150	— 150
1677	1900	— 223
3177	3550	— 373
4677	5150	— 473
6177	6700	— 523

Aus diesen Beobachtungen wurde eine Correctionstabelle berechnet, indem man zunächst von den Angaben des Manometers die Grösse 150 abzog und dann in den einzelnen Beobachtungsintervallen linear interpolirte.

Die ersten Versuche wurden mit einer verhältnissmässig weichen Unterlage ausgeführt, indem die Glasstückchen, die Würfel von etwa 6 mm Seite darstellten, zwischen zwei ebene Zinnplättchen gelegt und dem Druck der Presse ausgesetzt wurden. Im Folgenden sind drei Versuche dieser Art angegeben.

Glas Nr. 19 zwischen Zinnplättchen.

Seiten und Höhe der Stäbchen mm	mm	Druck in kg pro qmm	Mittel
6,16	6,40	41,6	} 39,2 kg
6,16			
6,23	6,39	39,6	
6,20			
6,16	6,40	36,4	
6,15			

Die Drucksteigerung wurde soweit fortgesetzt, bis das Glas mit einem Knall auseinander gesprengt war; es wurde dabei als Staub nach allen Seiten fortgeschleudert. Die Zinnplättchen zeigten nach einem Versuche starke Vertiefungen und in diesen schmale, linienartige kleine Erhebungen. Letztere beweisen, dass das Metall in kleine, während der Drucksteigerung sich bildende Risse eindringt.

Da v. Kowalski¹⁾ bei seinen Versuchen über die Druckfestigkeit des Glases Kupfer als Unter- und Auflage benutzt hat, wurden auch einige Versuche mit diesem Material an der gleichen Glassorte wie oben ausgeführt. Die Kupferplättchen waren sorgfältig eben abgeschliffen; zu jedem Versuch wurden zwei neue Plättchen verwendet.

Glas Nr. 19 zwischen Kupferplatten.			
Seiten und Höhe der Stäbchen mm	Höhe mm	Druck in kg pro qmm	Mittel
6,15	6,35	66,0	65,8 kg
6,20			
6,18	6,39	68,3	
6,18			
6,16	6,43	58,4	
6,19			
6,14	6,34	70,7	
6,10			

Diese Versuche ergeben beträchtlich grössere Werthe als die obigen mit den Zinnplättchen. Auch die Kupferplatten zeigten nach dem Versuch, zwar nicht so deutlich wie die Zinnplatten, die kleinen Erhebungen in der starken Vertiefung.

Aus den obigen Versuchen ist zu schliessen, dass eine weiche Unterlage, die in etwa sich bildende Risse des Glases eindringt, nicht anzuwenden ist, weil hierdurch ein Auseinanderreissen des spröden Glases begünstigt wird. Es wurden deshalb *harte* Stahlplatten von quadratischem Querschnitt, 5 cm breit und 1,5 cm hoch, benutzt; diese Platten wurden sorgfältig eben abgeschliffen und zwischen ihnen das Glas zerquetscht. Auch hier brachten die widerstandsfähigsten Gläser deutliche Eindrücke hervor; es mussten deshalb die Platten

1) v. Kowalski, Wied. Ann. **36**. p. 319. 1889.

oft neu abgeschliffen werden, um nicht zu kleine Werthe für die Druckfestigkeit zu erhalten. In der folgenden Zusammenstellung sind einige Beobachtungen mit dem Glase Nr. 19 angegeben, welche den Einfluss geringer Verletzungen der Oberfläche der Stahlplatten deutlich zeigen.

Tabelle VIII.

Glas Nr. 19 zwischen Stahlplatten.

Nr. des Versuches	Seiten d. Glaswürfel senkrecht zur Druckrichtung		Druck in kg pro qmm	Bemerkungen
1	4,35 mm	4,41 mm	112,7	
2	4,47 "	4,30 "	110,2	
3	4,32 "	4,30 "	96,7	
4	4,37 "	4,44 "	86,4	
5	4,26 "	4,26 "	109,4	Die Platten neu abgeschliffen
6	4,35 "	4,44 "	121,1	
7	4,60 "	4,65 "	77,1	
8	4,42 "	4,37 "	123,0	Die Platten neu abgeschliffen

Die Versuche Nr. 3, 4 und 7 der obigen Tabelle beweisen, dass, wenn die das Glas berührenden Flächen nicht vollkommen eben sind, zu kleine Werthe für die Druckfestigkeit sich ergeben. Es wurden deshalb diese Werthe nicht berücksichtigt, das Mittel der übrigen (Nr. 1, 2, 5, 6, 8) ist 115,3 kg.

In der folgenden Tabelle sind die Resultate für die verschiedenen Gläser zusammengestellt.

Tabelle IX.

Nr. des Glases	Seitenlänge der Stäbchen in mm		Druckfestigkeit kg pro qmm Mittel	Nr. des Glases	Seitenlänge der Stäbchen in mm		Druckfestigkeit kg pro qmm Mittel
19 oder 5	6,15	6,21	125,0	21	6,07	6,07	113,0
	6,12	6,15	125,5		6,07	6,08	98,8
	6,10	6,04	120,6		6,32	6,30	112,7
	6,10	6,06	134,3		5,98	5,95	98,5
			126,4				105,7
20	5,95	6,10	51,7	22 oder 2	6,10	6,10	79,4
	5,97	5,94	61,0		6,12	6,19	75,7
	5,95	6,00	63,0		6,27	6,12	82,8
	5,95	6,00	66,7		6,25	6,25	72,8
			60,6		6,04	6,00	95,4
							81,2

Nr. des Glases	Seiten- länge der Stäbchen in mm		Druck- festigkeit kg pro qmm	Nr. des Glases	Seiten- länge der Stäbchen in mm		Druck- festigkeit kg pro qmm
			Mittel				Mittel
23	6,12	6,09	73,4	32	6,05	6,06	79,4
	6,12	6,10	94,5		5,70	5,77	79,8
	6,12	6,20	73,8		6,02	5,93	69,2
	6,05	6,11	91,0		5,90	5,93	68,1
	6,06	6,04	88,7		6,00	6,00	72,3
	6,21	6,10	99,6		6,11	6,09	74,7
	6,17	6,03	86,6				
	6,08	6,08	75,2				
	6,06	6,05	73,4				
			84,0				73,9
24	6,07	6,10	74,4	33	6,14	6,00	69,5
	6,07	6,06	88,1		6,00	6,02	64,7
	6,11	6,11	66,2		6,07	6,11	64,2
	6,32	6,22	80,8		6,04	6,01	70,9
	6,17	6,15	77,9				
			77,5				67,3
25	6,10	6,09	90,6	34 langsam ge- kühlt	7,34	6,93	89,2
	6,06	6,06	100,5		7,35	6,82	92,4
	5,99	5,97	101,9		7,65	7,25	106,1
	6,08	6,05	98,4		7,68	7,22	111,4
			97,8	7,32	6,83	97,4	
26	5,87	5,91	87,1	34 schnell geöhlt	7,35	6,92	93,9
	5,87	5,87	87,3		7,00	7,50	102,0
	6,05	6,02	76,3		7,03	7,40	96,4
	5,95	5,92	86,5		7,55	7,00	98,6
			84,3	7,50	7,00	90,9	
27	5,97	5,96	76,9	35 oder 7 langsam ge- kühlt	6,65	6,65	100,6
	6,12	5,93	70,7		6,72	6,67	117,2
	6,06	6,05	66,7		6,73	6,75	126,4
	6,09	6,10	72,5		6,75	6,75	107,4
					71,7		
28	5,84	5,82	92,2	35 oder 7 schnell ge- kühlt	6,70	6,68	134,8
	6,17	6,22	103,5		6,71	6,72	101,6
	6,33	6,34	79,1		6,70	6,70	99,0
			91,6	6,71	6,71	119,2	
29 oder 8	6,03	5,97	94,7	Einige andere Substanzen			
	6,04	6,12	90,4	Schwarzer	6,21	6,24	21,6
	6,15	6,22	89,7	belgischer	6,14	6,13	32,8
	6,10	6,10	121,9	Marmor	6,25	6,20	22,9
	6,07	6,13	98,4		6,30	6,32	24,1
			99,0	Weisser	6,30	6,40	6,11
30 oder 10	6,03	6,10	68,3	italienischer	6,35	6,35	7,33
	6,04	5,90	68,1	Marmor	6,42	6,46	8,08
	5,96	6,00	64,1		6,30	6,33	6,81
	5,92	5,94	72,7	Sächsischer	6,42	6,43	18,7
			68,3	Granit	6,45	6,56	19,8
31	6,06	6,01	83,6		6,60	6,52	19,5
	6,20	6,07	75,6		6,46	6,60	18,5
	6,01	5,92	65,7	74,6	Brasilianischer Achat	6,35	6,20
					6,31	6,45	147,0
							131,7

Substanz	Seitenlänge der Stäbchen in mm		Druckfestigkeit kg pro qmm Mittel		Nr. des Glases	Seitenlänge der Stäbchen in mm		Druckfestigkeit kg pro qmm Mittel	
	Bergkrystall	4,30	4,15	185,9		181,6	Bergkrystall	4,16	4,15
Druckrichtung \parallel Axe	3,95	4,12	184,3	Druckrichtung \perp Axe	4,15		4,15	165,2	
	3,97	3,95	171,6	4,27	4,13		163,8		
	3,87	3,83	184,5	4,13	4,20		147,5		

Das Glas Nr. 19 ist in zwei Dimensionen untersucht; der Mittelwerth der Druckfestigkeit für den grösseren Querschnitt von etwa 37 qmm ist 126,4 kg, für den kleineren Querschnitt von etwa 18 qmm nach Tabelle VIII, wie schon angegeben, 115,3 kg. Es scheint hiernach, dass die Druckfestigkeit bei grösserem Querschnitt grösser ausfällt, wenn auch der Unterschied nicht bedeutend ist. Bei den übrigen Gläsern war der Querschnitt annähernd der gleiche, sodass die Vergleichbarkeit der Resultate gewahrt bleibt.

Eine Durchsicht der Tabelle lässt erkennen, dass oft sehr bedeutende Unterschiede bei dem gleichen Glase auftreten; dieselben sind durchschnittlich noch grösser als bei der Zugfestigkeit.

Am Schluss der Tabelle ist die Druckfestigkeit einiger weiterer Körper angegeben, um sowohl eine Vergleichung mit den untersuchten Gläsern als auch mit früheren Beobachtungen zu erhalten. Es ergab sich:

	Druckfestigkeit in kg pro qmm.
Schwarzer belgischer Marmor	25,4
Weisser italienischer Marmor	7,1
Sächsischer Granit	19,1
Harter Marmor ¹⁾	10,4
Granit ¹⁾	17,3

} Nach Tabelle IX

Eine Untersuchung von Gusseisen zeigte einen Maximaldruck von 94,1 kg pro Quadratmillimeter; dasselbe zersprang nicht, sondern wurde breit gedrückt, ohne dass der Druck weiter stieg. Nach Hodgkinson²⁾ liegt die Druckfestigkeit

1) Navier, *Mecanique appliquee*. 1. (5) Paris 1820.

2) Hodgkinson, *Brit. Assoc. Report*. 1833 u. 1837.

von Gusseisen zwischen 60 und 100 kg. In neuester Zeit ist die Druckfestigkeit für Korund und gehärteten Gussstahl ermittelt: für Korund ergab sich 60 kg pro Quadratmillimeter, für Gussstahl 430 kg pro Quadratmillimeter.¹⁾

Tabelle X.

Nr. des Glases	Druck- festigkeit kg pro qmm	Verhältniss der Druckfestigkeit zur Zugfestigkeit		Druckfestigkeit	
		a	b	ber.	Differenz ber. — beob. in Proc.
19 oder 5	120,8	17,9	17,4	110,9	+ 16
20	60,6	18,5	17,2	63,0	- 4
21	105,7	18,7	17,3	88,2	+ 17
22 oder 2	81,2	16,5	14,1	87,9	- 8
23	84,0	11,6	11,2	87,8	- 5
24	77,5	12,9	12,8	77,9	- 1
25	97,8	12,5	11,5	95,7	+ 2
26	84,3	18,1	15,6	75,7	+ 10
27	71,7	13,1	12,9	72,0	± 0
28	91,6	15,0	13,6	90,7	+ 1
29	99,0	15,4	14,6	102,3	- 3
30 oder 10	68,3	9,1	8,7	76,6	- 12
31	74,6	10,1	9,8	73,3	+ 2
32	73,9	9,1	8,8	79,2	- 7
33	67,3	13,5	12,7	68,8	- 2
34	99,3	12,5	12,2	110,9	- 12
35 oder 7	112,9	15,1	13,5	105,2	+ 7
Bergkrystall. Druck- und Zugrichtung Axe	181,6	11,1 ¹⁾			
⊥ Axe	160,0	12,8 ¹⁾			

Der Bergkrystall hat eine Druckfestigkeit, welche die der sämtlichen Gläser bedeutend überragt. Bei der Untersuchung dieses Körpers wurden für jeden einzelnen Versuch die Stahlplatten neu abgeschliffen, da bei dem hohen Druck die Einwirkung des Krystalles auf die Platten so gross war,

1) Die Versuche wurden in der Versuchsanstalt für Bau- und Maschinenmaterial am technologischen Gewerbemuseum in Wien durch Hrn. Prof. Kirsch angestellt. Vereinsblatt der deutschen Gesellschaft für Mechanik und Optik. Nr. 21. p. 164. 1893.

2) Diese Werthe sind mit Hülfe der Zahlen berechnet, welche W. Voigt (Göttinger Nachr. 2. p. 103. 1893) für die Zugfestigkeit des Bergkrystalles gefunden hat: 16,3 kg pro qmm || Axe und 12,5 kg ⊥ Axe.

dass nach den früheren Erfahrungen ein zweiter Versuch mit den gleichen Platten nicht rathsam erschien.

In der Tabelle X ist neben einer übersichtlichen Darstellung der Druckfestigkeit auch das Verhältniss der Druckfestigkeit zur Zugfestigkeit angegeben. Dieses Verhältniss ist in doppelter Weise berechnet: unter a steht der Quotient, den man erhält, wenn für die Zugfestigkeit der Mittelwerth der Beobachtungen eingeführt wird, unter b jener, der dem Maximalwerth für die Zugfestigkeit entspricht.

Das Verhältniss der Druck- zur Zugfestigkeit liegt nach obigen Versuchen bei den verschiedenen Gläsern zwischen 18,7 und 9,1. Dass dieses Verhältniss so starke Unterschiede zeigt, kann nicht überraschen, wenn man bedenkt, wie verschiedenartig die Zusammensetzung der Gläser ist.

Aus den in der Einleitung angegebenen Werthen, die v. Kowalski für die Druck- und Zugfestigkeit des von ihm untersuchten Glases erhalten hat, folgt für das Verhältniss beider 4,3. Während die Zugfestigkeit mit 8,767 kg. pro Quadratmillimeter im Vergleich mit den hier untersuchten Gläsern einen hohen Werth darstellt, liegt die Druckfestigkeit mit 37,7 kg weit unterhalb des kleinsten der oben mitgetheilten Grössen. Die bereits erwähnte Thatsache, dass v. Kowalski bei der Untersuchung der Druckfestigkeit die Glasstäbchen zwischen zwei Kupferplatten stellte, ist wohl nicht ausreichend, um die Kleinheit der Werthe zu erklären; vielmehr scheint v. Kowalski bei seinen Versuchen den Druck nur so weit gesteigert zu haben, bis der erste Bruch des Stäbchens parallel der Druckrichtung eintrat und diesen Druck (berechnet pro Flächeneinheit) als Druckfestigkeit zu betrachten. Die so bestimmte Druckfestigkeit stellt dann eine ganz andere Grösse dar, als die schon ermittelte, bei der der Druck so weit gesteigert wurde, bis eine Zerstäubung der ganzen Glasmasse erfolgte, was mit einem Ruck unter starker Detonation eintrat.¹⁾ Das erste Anzeichen einer Verletzung konnte zuweilen schon bei kleinen Drucken gehört werden, in anderen Fällen trat dasselbe aber bei dem gleichen Glase viel später ein.

1) Gleichzeitig konnte man bei Ausführung des Versuches im Dunkeln einen deutlichen Lichtschein der zerstäubenden Glasmasse wahrnehmen.

In der Tabelle X sind in der vorletzten Verticalspalte die Druckfestigkeiten nach der Formel

$$D = a_1 z_1 + a_2 z_2 + \dots$$

berechnet, in der a_1 , a_2 , \dots die procentischen Gewichtsmengen der einzelnen Bestandtheile in den Gläsern darstellen, und z_1 , z_2 \dots aus den Beobachtungen ermittelt sind. Für diese Grössen wurden folgende Werthe benutzt:

Tabelle XI.

$\text{Na}_2\text{O} = 0,6$	$\text{BaO} = 0,62$
$\text{K}_2\text{O} = 0,05$	$\text{ZnO} = 0,6$
$\text{B}_2\text{O}_3 = 0,9$	$\text{MgO} = 1,1$
$\text{Al}_2\text{O}_3 = 1,0$	$\text{P}_2\text{O}_5 = 0,76$
$\text{SiO}_2 = 1,23$	$\text{CaO} = 0,2$
$\text{PbO} = 0,48$	

Die letzte Verticalspalte der Tabelle X gibt die Differenz zwischen den beobachteten und berechneten Werthen in Procenten der ersteren an. Diese Differenzen erreichen im Maximum den Betrag von 17 Proc.; der Mittelwerth ist 6,5 Proc. Die Rechnung wurde ebenso wie die entsprechenden bei der Untersuchung der Elasticitätscoefficienten und Zugfestigkeiten durchgeführt, um den Einfluss der einzelnen Bestandtheile auf die ermittelte Eigenschaft der untersuchten Gläser wenigstens annähernd darzustellen.

Die kurz zusammengefassten Resultate der vorliegenden Arbeit sind folgende:

1. Die Elasticitätscoefficienten, die Zug- und Druckfestigkeit sind für 18 verschiedene Gläser experimentell bestimmt.

2. Die Werthe für die Elasticitätscoefficienten liegen zwischen den Grenzen 4699 und 7592 kg pro Quadratmillimeter; für die Zugfestigkeit zwischen 3,5 und 8,5 kg pro Quadratmillimeter; für die Druckfestigkeit zwischen 60,6 und 120,8 kg pro Quadratmillimeter.

3. Die Unsicherheit für die Bestimmung der Elasticitätscoefficienten beträgt 0,4 Proc.; für die Zug- und Druckfestigkeit durchschnittlich 10 Proc.

4. Die erlangten Resultate lassen sich durch Formeln in ihrer Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung darstellen; die Elasticitätscoefficienten mit einer durchschnittlichen

Uebereinstimmung von 3 Proc., die Zug- und Druckfestigkeit mit einer solchen von 8 Proc.

5. Ist für ein Glas die chemische Zusammensetzung bekannt und weicht dieselbe nicht in extremer Weise von den bisher untersuchten Gläsern ab, so lässt sich der Elasticitäts-coefficient, die Zug- und Druckfestigkeit mit einer Genauigkeit berechnen, die unter 4. angegeben ist.

Jena, December 1893.
