

**7. Über die Ausflußgeschwindigkeit einiger Metalle;
von N. Werigin, J. Lewkojeff und G. Tammann.**

H. Tresca¹⁾ zeigte, daß ein Teil der Metalle aus einer Öffnung in einem Stahlgefäße bei gewissen Drucken auszufließen beginne. W. Spring²⁾ wies nach, daß zwischen 300 bis 400° ein Teil der Metalle so plastisch wird, daß zwei Stücke ein und desselben Metalles oder verschiedener Metalle beim Aufeinanderlegen zusammenkleben, wenn nur die Berührungsflächen genügend glatt sind. Die Plastizität kristallisierter Stoffe suchte J. H. Poynting auf eine vorübergehende Schmelzung zurückzuführen, die er durch die Annahme der Existenz der sogenannten zweiten Schmelzkurven zu begründen suchte. Nachdem der eine³⁾ von uns bewiesen hat, daß diese zweiten Schmelzkurven nicht existieren, ist die Plastizität anisotroper Stoffe als eine denselben eigentümliche Eigenschaft aufzufassen.

Da die Plastizität der Metalle besondere Aufmerksamkeit beansprucht, so wurden die früheren messenden Versuche über die Ausflußgeschwindigkeit fester Stoffe auf einige Metalle ausgedehnt. Der Hebelapparat und das Meßverfahren sind früher in der Arbeit des einen von uns beschrieben. Um Wiederholungen zu vermeiden, verweisen wir auf diese Arbeit.³⁾

Zu den Messungen dienten zwei Druckstifte der Form *F'* (Fig. 2, l. c.) mit konischer Druckfläche; die Kegelbasis des Stiftes *N0* betrug 0,1444 qcm und sein Kegelwinkel 95°, die

1) H. Tresca, Memoires présentés à l'Acad. de l'Inst. de France 18. p. 733. 1868; 20. p. 75. 281 u. 617. 1872.

2) W. Spring, Zeitschr. f. phys. Chem. 15. p. 65. 1895.

3) G. Tammann, Ann. d. Phys. 7. p. 198. 1902.

Kegelbasis des Stiftes *N* 1 maß 0,1816 qcm und der Kegelwinkel 100° . Der Querschnitt der Bohrung des Stahlzylinders *A* (Fig. 2, l. c.) betrug wie früher 0,1988 qcm. Ferner mag daran erinnert werden, daß ein Teilstrich von 100 auf der Peripherie der Schraubenmutter *N* (Fig. 3, l. c.) einer Senkung des Druckstiftes um 0,004538 mm entspricht.

Der Druck, unter dem der Ausfluß vor sich ging, betrug immer 500 oder 1000 kg pro 1 qcm, nur beim Zink mußte der Druck, um ein Fließen zu veranlassen, bis auf 2000 kg gesteigert werden und beim Antimon sogar bis zu 3000 kg, um zwischen 200 — 250° die ersten Anfänge des Fließens hervorzubringen.

Da die Ausflußgeschwindigkeit fester Stoffe in hohem Maße von der Temperatur abhängt, so mußte besonders für die Sicherheit der Temperaturangaben Sorge getragen werden. Zu diesem Zweck tauchte der Stahlzylinder *A* mit dem zu untersuchenden Metalle tief in ein Bad mit 20 Liter Rizinusöl, und der Raum zwischen Zylinderwand und Druckstab *E* (Fig. 4, l. c.) war mit demselben Öl gefüllt. War die Rührvorrichtung im Gange, so konnten bis 100° keine Temperaturschwankungen im Bade bemerkt werden, von 100 — 180° stiegen dieselben während der Beobachtungszeit von 15 Min. auf höchstens $0,5^{\circ}$ und bei höheren Temperaturen bis zu 1° .

Bei 242° war die Temperatur des Bades um 1° höher als die Temperatur des ausfließenden Metalles, was aus folgendem Versuche sich ergibt. Steigerte man, während sich unter dem Druckstift Zinn befand, langsam die Temperatur des Bades, so trat der Hebelsturz, verursacht durch die Schmelzung des Zinns, unter dem Druck von 500 kg pro 1 qcm bei 242° ein, während sich der Schmelzpunkt desselben Zinns thermometrisch zu 241° ergab. Eine diesem Umstande entsprechende Verbesserung an den direkt beobachteten Temperaturen wurde nicht angebracht, weil sich diese Differenz jedenfalls bedeutend verkleinert, wenn man die Temperatur des Bades 15 Min. konstant erhält, was vor dem Beginn der Messungen eingehalten wurde. Die direkt abgelesenen Temperaturen wurden auf die Skala der Physikalischen Reichsanstalt reduziert.

Die Metalle flossen in Form von haltbaren Röhren aus. Die Messungen der Ausflußgeschwindigkeiten wurden nur so

lange fortgesetzt, bis die Röhre die obere Verdickung des Druckstiftes *F* (Fig. 2, l. c.) erreichte. Trat diese Berührung ein, so verlangsamte sich der Ausfluß außerordentlich. Die Röhren mit dem nicht ausgeflossenen Metallzylinder konnten nach Öffnen der Verschußschraube des Stahlzylinders durch einen leichten Schlag auf den Druckstab aus dem Stahlzylinder entfernt werden, nur die Wismutröhren zerbrachen immer. Vor Beginn der Messungen mußte natürlich dafür gesorgt werden, daß der ganze Raum im Stahlzylinder unterhalb des Druckstiftes von dem Metall erfüllt war.

Über die chemische Zusammensetzung der untersuchten Metalle ist zu bemerken, daß im Zink und Blei keine fremden Metalle gefunden werden konnten. Das Wismut und Thallium enthielten Spuren von Blei und Eisen, das Kadmium Spuren von Eisen und das Zinn Spuren von Metallen der IV. analytischen Gruppe.

Die Plastizität der Metalle ist bei ein und derselben Temperatur außerordentlich verschieden, sodaß man auch für die untersuchten Metalle, die in dieser Beziehung einander etwas näher stehen, keine Tabelle entwerfen kann, welche für eine Temperatur, einen Druck und eine bestimmte Ausflußöffnung die Ausflußgeschwindigkeiten der Metalle enthielt. Beispielsweise entnimmt man den Tabellen, daß bei 182,8° und dem Druck von 500 kg pro 1 qcm aus der ringförmigen Öffnung, welche der Druckstift *N0* mit der Wand des Stahlzylinders bildet, die Volumen-Ausflußgeschwindigkeiten für Thallium, Zinn und Wismut sich wie die Zahlen 265 : 198 : 4,5 verhalten.

Trotzdem es nicht möglich ist, für eine bestimmte Temperatur Zahlenwerte der Plastizität der Metalle anzugeben, so kann man doch auf Grundlage unserer Versuche eine Reihenfolge der Ausflußgeschwindigkeiten oder der diesen proportionalen Plastizitäten aufstellen. Diese Reihenfolge ist:

K . Na . Pb . Tl . Sn . Bi . Cd . Zn . Sb.

Von links nach rechts nimmt in dieser Reihe bei gleicher Temperatur und gleichem Druck die Ausflußgeschwindigkeit und die Plastizität ab, und die innere Reibung zu.

Nach dem Dehnungsmodul geordnet, hat man die Reihenfolge Zn. Sn. Pb, in welcher der Dehnungsmodul kg/mm abnimmt. Ob bei Berücksichtigung der fehlenden Zwischenglieder der Parallelismus bei beiden Reihen erhalten bleibt, muß dahingestellt bleiben.

Bemerkenswert ist, daß ein nicht duktils sprödes Metall wie Wismut sich betreffs seiner Ausflußgeschwindigkeiten zwischen zwei duktile wie Sn und Cd einordnet.

Von Interesse sind noch die beim Zinn bei 200° und bei Thallium bei 180° deutlich auftretenden Abnormitäten in der Temperaturabhängigkeit der Ausflußgeschwindigkeiten. Beim Zinn fällt bei jener Temperatur plötzlich die Ausflußgeschwindigkeit und beim Thallium wächst dieselbe plötzlich. Der Grund hierfür kann nur in der Bildung einer neuen Kristallart, also im Auftreten eines Umwandlungspunktes gesucht werden. Vom Zinn ist bekannt, daß es bei 200° spröde, pulverisierbar wird. Genauer sind diese Umwandlungspunkte bisher nicht untersucht worden.

Das Hauptresultat dieser Arbeit ist folgendes: *Ein Temperaturzuwachs von 10° bedingt in der Regel bei gleichen Drucken und gleichen Ausflußöffnungen einen Zuwachs der Ausflußgeschwindigkeit um nahezu des Doppelten der Ausflußgeschwindigkeit.* Es verdient Beachtung, daß derselben Regel gewöhnlich die Temperaturabhängigkeit der Geschwindigkeit chemischer Reaktionen folgt.

In den folgenden Tabellen findet man neben den Temperaturen die Mittelwerte der Ausflußgeschwindigkeiten in Skalenteilen der Schraubenperipherie *N* (Fig. 3, l. c.), durch Multiplikation dieser Senkungen des Druckstiftes *F* (Fig. 2, l. c.) mit einem Faktor, der sich nach obigen Angaben für jeden Druckstift ergibt, kann man leicht erfahren, wieviel Kubikmillimeter pro Minute ausflossen. Zur Beurteilung der Fehler und des Umstandes, wie weit es gelungen war, stationäre Ausflußgeschwindigkeiten zu erzielen, folgt eine Versuchsreihe mit derselben Füllung des Apparates, beispielsweise ein Versuch über den Auffluss des Zinns. Für alle anderen Versuche sind nur die Mittelwerte aus drei Einzelbeobachtungen mit dem Mittel der Abweichungen der Einzelbeobachtungen vom Mittel angeführt.

Zinn.

Druck 1000 kg pro 1 qcm. Druckstift N°0.

Temp.	Skalenteile pro Minute			Mittel
10,0°	0,2	0,2	0,2	0,2 ± 0,0
20,0	0,4	0,4	0,5	0,4 ± 0,0
32,0	0,7	1,0	0,9	0,9 ± 0,1
41,8	1,6	1,5	1,7	1,6 ± 0,1
51,2	4,0	3,8	3,6	3,8 ± 0,1
60,5	8,3	7,7	7,7	7,9 ± 0,3
70,4	14,3	13,2	14,9	14,1 ± 0,6
83,2	32,0	33,6	31,8	32,5 ± 0,8
90,6	59,7	55,5	54,3	56,5 ± 2,1
100,3	107,6	89,2	96,0	97,6 ± 6,6
110,5	206	178	201	195,0 ± 11,3
120,6	—	362	—	362
131,4	—	584	—	584

Kalium.

Druck 260 kg pro 1 qcm.

Der Durchmesser der ebenen, kreisförmigen Stirnfläche des Druckstiftes betrug $4,85 \pm 0,01$ mm, die Ebene der Druckfläche maß also $0,1847$ qcm

Temp.	Skalenteile pro Minute
	Mittel
-21,7°	93 ± 19,0
- 9,5	245 ± 23,3

Natrium.

Druck 260 kg pro 1 qcm.

Der Durchmesser der ebenen, kreisförmigen Stirnfläche des Druckstiftes betrug $4,85 \pm 0,01$ mm, die Ebene der Druckfläche maß also $0,1847$ qcm.

Temp.	Skalenteile pro Minute
	Mittel
-21,7°	7,6 ± 0,5
-15,5	10,4 ± 0,9
-10,3	15,6 ± 0,5
- 5,0	33,7 ± 2,2
0,0	63,0 ± 3,0

Blei.

Druck 1000 kg pro 1 qcm.				Druck 500 kg pro 1 qcm.			
Druckstift N 0.		Druckstift N 1.		Druckstift N 0.		Druckstift N 1.	
Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel	Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel	Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel	Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel
-21,7°	6,1 ± 0,5	0,5°	0,8 ± 0,1	60,5°	0,3 ± 0,1	161,8°	1,3 ± 0,2
-10,0	9,2 ± 0,5	10,4	1,2 ± 0,2	70,3	1,0 ± 0,0	172,4	3,2 ± 0,2
0,0	19,8 ± 2,4	20,5	2,3 ± 0,3	79,4	3,1 ± 0,1	182,8	13,3 ± 0,8
10,5	79 ± 7,0	30,4	4,7 ± 0,8	89,6	8,7 ± 0,3	192,5	49 ± 2,3
20,3	197 ± 11,0	40,0	10,6 ± 0,7	99,3	16,7 ± 0,1	203,3	119 ± 9,0
30,5	382 ± 3,0	50,7	22,9 ± 0,9	109,5	40,0 ± 0,0		
		60,3	42,4 ± 0,4	120,4	106 ± 5,7		
		70,0	84,3 ± 6,3	130,7	175 ± 6,3		
		79,3	157,5 ± 12,3	140,3	574 ± 34,3		
		89,6	211,5 ± 9,5				

Thallium.

Druck 1000 kg pro 1 qcm.				Druck 500 kg pro 1 qcm.			
Druckstift N 0.		Druckstift N 1.		Druckstift N 0.		Druckstift N 1.	
Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel	Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel	Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel	Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel
30,0°	3,8 ± 0,1	109,5°	20,3 ± 2,2	100,3°	0,6 ± 0,0	151,1°	2,2 ± 0,1
40,0	6,2 ± 0,6	119,6	37,1 ± 3,6	110,5	1,5 ± 0,2	162,8	4,4 ± 0,4
50,0	9,7 ± 0,3	130,4	77,0 ± 8,2	121,1	2,9 ± 0,2	173,4	14,5 ± 0,1
59,9	17,2 ± 0,6	140,7	149,6 ± 11,2	130,9	4,6 ± 0,1	183,8	101 ± 3,0
69,8	32,9 ± 1,1	151,1	326,4	141,7	8,5 ± 0,3	192,5	224 ± 13,3
79,7	88,5 ± 2,1			151,1	16,5 ± 0,4		
89,6	189			162,8	23 ± 1,0		
99,3	490			172,9	54 ± 2,7		
				182,8	265 ± 25,0		

Zinn.

Druck 1000 kg pro 1 qcm.				Druck 500 kg pro 1 qcm.			
Druckstift N 0.		Druckstift N 1.		Druckstift N 0.		Druckstift N 1.	
Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel	Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel	Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel	Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel
10,0°	0,2 ± 0,0	99,3°	4,7 ± 0,1	110,5°	1,6 ± 0,2	162,8°	0,6 ± 0,3
20,0	0,4 ± 0,0	109,5	7,7 ± 0,4	119,6	2,2 ± 0,1	173,4	1,7 ± 0,3
32,0	9,9 ± 0,1	119,6	15,9 ± 0,4	131,4	6,3 ± 0,1	183,8	3,9 ± 0,0
41,8	1,6 ± 0,1	130,4	25,7 ± 0,7	141,2	16,3 ± 0,3	193,5	8,2 ± 0,1
51,2	3,8 ± 0,1	140,7	48,2 ± 3,8	152,1	35,7 ± 0,7	203,3	12,1 ± 2,1
60,5	7,9 ± 0,3	151,1	64,2 ± 6,0	162,8	50,6 ± 0,2	204,3	3,2 ± 0,3
70,4	14,1 ± 0,6	161,8	134,8 ± 6,3	172,4	101,6 ± 3,9	214,3	4,1 ± 0,5
83,2	32,5 ± 0,8	172,4	395,4 ± 10,8	182,8	198,0 ± 6,0	224,6	10,5 ± 0,4
90,6	56,5 ± 2,1			192,5	410,0	235,7	112,3
100,3	97,6 ± 6,6			203,3	492,0		
110,5	195,0 ± 11,3						
120,6	362						
131,4	584						

Wismut.

Druck 1000 kg pro 1 qcm.				Druck 500 kg pro 1 qcm.			
Druckstift N 0.		Druckstift N 1.		Druckstift N 0.		Druckstift N 1.	
Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel	Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel	Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel	Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel
96,4°	1,3 ± 0,0	151,1°	1,6 ± 0,1	162,8°	1,3 ± 0,1	214,3°	0,8 ± 0,5
10,8	4,1 ± 0,1	161,8	3,4 ± 0,4	173,4	2,7 ± 0,3	224,5	1,4 ± 0,2
20,1	9,3 ± 0,6	172,4	6,8 ± 0,6	183,8	5,0 ± 0,0	234,7	1,2 ± 0,0
30,9	21,4 ± 1,3	182,8	12,6 ± 0,6	193,5	8,3 ± 0,3	245,0	2,9 ± 0,2
41,5	56,4 ± 1,6	192,5	23,4 ± 0,2	204,3	10,8 ± 0,4	255	5,1 ± 0,3
51,1	114 ± 9,0	203,3	37,8 ± 3,0	215,3	24,7 ± 0,7	260	7,7 ± 0,9
61,8	225 ± 27,0	214,3	57 ± 3,0	225,6	41,4 ± 3,8	266	13,9 ± 1,6
72,4	456	224,5	123 ± 3,0	234,7	58,8 ± 1,8	271	48,4
82,8	648	234,7	276 ± 24,0	245,0	93 ± 3,0		
				255,0	156 ± 12,0		

Kadmium.				Zink.			
Druck 1000 kg pro 1 qcm.				Druck 500 kg pro 1 qcm.	Druck 2000 kg pro 1 qcm.		
Druckstift N 0.		Druckstift N 1.		Druckstift N 0.		Druckstift N 1.	
Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel	Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel	Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel	Temp.	Skalenteile pro Minute Mittel
100,3°	0,4 ± 0,0	140,7°	0,7 ± 0,2	172,4°	0,9 ± 0,2	151,1°	8,8 ± 0,1
110,0	1,7 ± 0,0	151,1	1,7 ± 0,3	182,8	2,0 ± 0,1	161,8	6,1 ± 0,2
120,1	2,1 ± 0,1	161,8	3,3 ± 0,3	192,5	2,8 ± 0,2	172,4	9,5 ± 1,0
131,4	3,6 ± 0,0	172,4	5,6 ± 0,4	203,3	4,9 ± 0,2	182,8	12,1 ± 0,8
141,2	6,4 ± 0,3	182,8	7,4 ± 0,7	214,3	9,7 ± 1,4	192,5	17,0 ± 1,8
151,6	14,2 ± 0,5	192,5	17,2 ± 1,1	224,6	25,7 ± 2,0	203,3	24,3 ± 0,8
162,8	24,9 ± 0,7	203,3	33,3 ± 1,7	235,2	72,5 ± 2,9	214,3	40 ± 0,6
172,4	56,7 ± 2,5	214,3	59,6 ± 2,9	244,3	155,7 ± 12,3	224,5	66 ± 5,8
183,3	112 ± 4,5	224,6	120'			235	160 ± 13,8
193,5	202,8	234,7	215			245	370 ± 20,0
203,3	426,6	244,6	420				
		254,5	660				

Dorpat, im Dezember 1902.

(Eingegangen 24. Dezember 1902.)