

**12. Über Beziehungen
zwischen der Zug- und Druck-Festigkeit;
von L. Bergfeld.**

Trotz der großen technischen Bedeutung der Metallprägung begegnet man noch vielfach widersprechenden Ansichten über das Verhalten der Materialien bei ihrer Pressung.

Es sind zwar Versuche zu einer gesetzmäßigen Darstellung dieses Vorganges bekannt, doch decken sich diese Funktionalausdrücke nur innerhalb sehr beschränkter Grenzen mit der Wirklichkeit und versagen völlig nach Überschreitung derselben. Hier ist in erster Linie die Formel von Bauschinger¹⁾ zu erwähnen:

$$K = \left(\alpha + \beta \frac{\sqrt{f}}{h} \right) \sqrt{\frac{\sqrt{f}}{\frac{u}{4}}},$$

für Prismen, bei denen $h \leq 5a$, sofern $\alpha = \sqrt{f}$, wenn

$$\begin{aligned} f &= \text{Querschnitt des Prismas in cm}^2, \\ u &= \text{Umfang} \quad \text{,,} \quad \text{,,} \quad \text{cm}, \\ h &= \text{Höhe} \quad \text{,,} \quad \text{,,} \quad \text{,,} \quad \text{,,} \\ K &= \text{Bruchbelastung in kg/cm}^2, \end{aligned}$$

α und β Konstante, bestimmt durch die Art des Materials.

Diese Gleichung sollte eine ältere von Wöhler ersetzen, welche den Vorgang des Zerdrückens als eine Art halbseitlicher Abschiebung darzustellen suchte. Der gewöhnlichen Auffassung, als ob die Druckfestigkeit einfach ein inverses Multiplum der Zugfestigkeit sei, widerspricht besonders Bach²⁾, der unter anderem die Belastung maß, durch welche Gußbleizylinder von verschiedenen Höhen zur beginnenden seitlichen Ausweichung gebracht werden und für eine gesetz-

1) J. Bauschinger, Mitteilungen aus dem mechanisch-technischen Laboratorium der königl. polytechn. Schule in München. 6. Heft.

2) C. Bach, Zeitschr. d. Vereins Deutscher Ingenieure. 1885.

mäßige Darstellung dieses Vorganges die Forderung aufstellte, daß sie die Druckfestigkeit als Funktion der Höhe geben müsse.¹⁾ Eine dementsprechende Formel soll nun hierunter abgeleitet und ihre Brauchbarkeit an den Ergebnissen mannigfaltig variiertes Zerpressungsversuche geprüft werden.

Um die Resultate praktischer Versuche über ein solches Fließen der gemeinhin „fest“ genannten Metalle einer exakten Berechnung zugänglich zu machen, mußten die Fehlergrenzen, die bei verschiedenen an sich geringfügigen Ursachen unverhältnismäßig groß sind, nach Möglichkeit eingeschränkt werden. Während die Messungen von Bach²⁾ bei Untersuchung der Druckfestigkeit an Gußbleizylindern sich z. B. in dem Falle des hier besonders in Frage kommenden Körpers mit kleiner Höhe darauf beschränkten, daß derselbe noch nicht ausweicht bei einer Einheitsbelastung von 100 kg, während bei 150 kg ein seitliches Abfließen des Materials beobachtet wurde, fand im folgenden die Methode Verwendung, den Zylinder mit wachsendem Drucke bis mindestens zum Maximum der Ausbauchung sehr langsam zu zerpressen und dann nach einem festen Maximaldrucke bei gemessener Zeit und einem bestimmten Minimaltempo der schließlichen Ausweichung, zu dem sie als Differenzbewegung proportional dem jeweils überschüssigen Drucke — nicht dessen Wurzel — herabsinkt³⁾, die resultierende Gleichgewichtsfigur zu untersuchen. Auch wurden die möglichen Fehlerquellen auf den Grad ihrer Einwirkung hin untersucht.

Der vorliegenden Abhandlung liegt die Auffassung von Quincke⁴⁾ zugrunde, welche die Annahme einer eigentlich starren Materie ausschließt. Alle Substanzen müssen auch bei Temperaturen unterhalb ihres Schmelzpunktes schlechtweg als

1) C. Bach, *Elastizität und Festigkeit*, 3. Aufl., p. 157.

2) C. Bach, *Die Maschinenelemente*, 9. Aufl., Stuttgart 1903, p. 100.

3) So zeigte z. B. ein Bleizylinder für $r = 2,43$ und $b = 1,09$, entsprechend einer Totalfestigkeit von 5830 kg, belastet mit 6600 kg, also 770 kg Überdruck, eine Längendilatation pro Minute von 0,7 Proz.; bei gleicher Belastung für $r = 2,5$ und $b = 1,03$, also 270 kg Überdruck eine solche von 0,23 Proz.

4) Man vgl. u. a. G. Quincke, *Eis, Eisen und Eiweiß*. Heidelberg 1906, bei C. Winter.

klebrige Flüssigkeiten angesehen werden. Verunreinigungen der Substanz fügen sich beim Erstarren zu seifenschäumähnlichen Wänden, welche, schwerer erstarrend als das eingeschlossene reinere Material, auch scheinbar fest doch nur eine ölartige Flüssigkeit darstellen, deren Oberflächenspannung gegen jenes in dem Bestreben, die gemeinsame Grenze möglichst zu verkleinern, als der eigentliche Bildner der inneren Form, der Struktur, aufzufassen ist. Diese innere Oberflächenspannung hat auch für das Festigkeitsproblem wesentliche Bedeutung.

Die größere Fließbarkeit der Schaumwände wird deren Gestaltungskraft auch bei einer Rückbildung geltend machen, sobald der Druck entspannt wird, d. h. die Elastizität vermehren. Die innere Oberflächenspannung verstärkt ebenso die eigentliche Festigkeit. Auch starker Druck wird im allgemeinen die Fließbarkeit beeinträchtigen, doch müßte man für Metalle, die sich beim Schmelzen kontrahieren, mit einer verminderten oder selbst negativen Zunahme der Festigkeit rechnen.

Nun sollen im folgenden meist chemisch reine Metalle untersucht werden, wenn auch dieser Begriff wohl immer nur ein relativer bleiben wird. Denn auch das reinste Material erweist sich vor der strengsten physikalischen Prüfung als nicht homogen. So zeigte Quincke¹⁾, welch bedeutende, für jedes Material charakteristische innere Gestaltungskraft Verunreinigungen von nur drei milliontel Prozent betätigen. Indessen dürfen die hier als chemisch rein bezeichneten Materialien ohne merklichen Fehler für den eigentlichen Gegenstand vorliegender Untersuchung als homogen betrachtet werden, denn die Fälle, in denen die Quinckeschen Schaumwände merklicher in Wirkung treten, folgen anderen Gesetzen, die eine selbständige Bearbeitung erfordern, deren Entwicklung sich noch nicht absehen läßt.

Von dem landläufigen Begriffe der Zugfestigkeit, die im folgenden kurzweg F' genannt werde, muß hier, um ihr eine einfache Funktionalbeziehung zu der Zeit zu erteilen, eine kleine Abweichung dadurch vorgenommen werden, daß man

1) G. Quincke, *Ann. d. Phys.* 18. p. 28. 1905.

den charakteristischen Zug für die Zerreißung nicht wie gewöhnlich unter Atmosphärendruck mit momentaner Einschnürung an einem einzigen Punkte, sondern unter dem Drucke F pro cm^2 überall gleichmäßig erfolgen läßt. Dann entspricht F etwa den bekannten Zugfestigkeiten gehmmelter, gewalzter oder gezogener Metalle.

F seien demnach diejenigen gleichen und entgegengesetzten Zugkräfte, welche eine immer nur normal zu den ursprünglichen Flächen eines Würfels von 1 cm^3 , allseitig gegen dessen Inneres gerichtete Einheitskraft F an zwei ausgewählten gegenüberliegenden Flächen des Würfels gerade aufheben und dadurch in der Richtung des Zuges eine Verlängerung des Würfels um $\frac{1}{5}$ Proz. seiner Kantenlänge innerhalb einer Minute bewirken.

Die Messungen wurden vorgenommen in einem soliden Keller, ca. 80 m von der Straße und fern von Maschinenbetrieb. Die elastischen Nachwirkungen sind für die Resultate unwesentlich.

Die Ableitung der nun zu entwickelnden Zerpressungsformel erfordert zunächst eine

Vorbetrachtung.

Ein homogenes, nachgebendes Material sei von zwei als starr vorgestellten parallelen, ebenen Wänden eingeschlossen, an denen es fest haften soll. Diese stehen senkrecht zur Zeichenebene und schneiden dieselbe in Fig. 1 in r . Der Abstand der Wände betrage $2b$,

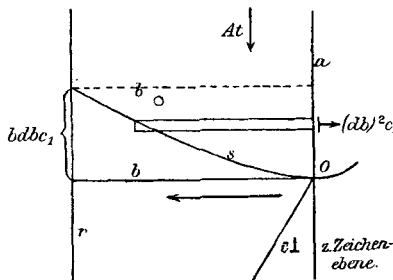


Fig. 1.

so daß $0a$ in der Mitte zwischen beiden liegt. Ein Druck: At pro cm^2 drücke das ursprünglich unterhalb b_0 beginnende nachgebende Medium abwärts, das hier nach seine obere Begrenzung in der parabolischen Kurve s findet. Ein Ausweichen der Masse nach der Dimension c

senkrecht zur Zeichenebene werde durch eine Begrenzung ohne Reibungswiderstand verhindert. Dann ist offenbar die Dehnungs-

beanspruchung von s abgesehen von c für jedes b gleich $At \cdot b$. Ist diese Senkung unmerklich klein, so bleibt die dieser Dehnung entsprechende Kontraktionsschwächung normal zu s unmerklich, ebenso verschwindet die Biegeungsarbeit gegen die Dehnungsarbeit als Differential höherer Ordnung. Belege ich nun s mit kugelartigen differentialen Elementen, die zur Vereinfachung in der Zeichenebene durch die Quadrate 1, 2 der Fig. 2 vorgestellt seien, so entspricht der Horizontaldehnung ($\delta s \cdot ds$) die gleiche Vertikalverkürzung durch Kontraktion,

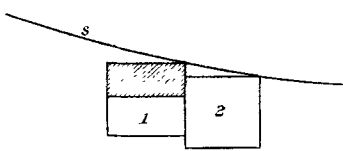


Fig. 2.

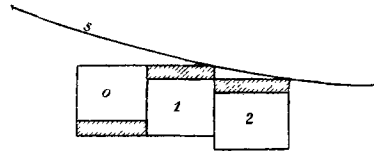


Fig. 3.

welche den Schwerpunkt des Elementes 1, mithin das ihm adhärierende Nachbarelement 2 an s um $(\delta b \cdot db)/2$ senkt. Da nun die Kontraktion des 1. Elementes — und aller vertikal darunter liegenden — als gleiche Gegenwirkung dieser Senkung der Elemente 2 aufzufassen ist, so erfolgt Gleichgewicht bei nochmaliger Senkung der Elemente 2 um $(\delta b \cdot db)/2$ (Fig. 3). Während nun (2) die Schraffur oben verliert, nimmt andererseits (0) um die Schraffur unten ab, was sich kompensiert. Der Weg von $Atbc$ zur Senkung der dem zugehörigen b entsprechenden vertikalen Elementreihe ist also $(\delta b \cdot db) \cdot c_1$.

Da nun der Dehnung von ds nur die Kontraktion in der Zeichenebene entspricht, aber die koordinierte Kontraktion in c fehlt, so wird die Festigkeit pro $\text{cm}^2: F$ nur zur Hälfte beansprucht, bez. F legt in der Zeiteinheit nur die Hälfte des bei seiner Definition geforderten Weges zurück. Die Beziehung zwischen Wirkung und Gegenwirkung lautet also:

$$\frac{1}{2} c \cdot F \cdot r \cdot (\delta s \cdot ds) \cdot c_1 = c \cdot At \cdot b \cdot (\delta b \cdot db) \cdot c_1;$$

zweimalige bestimmte Integration, beiderseits bis zum b der Hauptsummation, ergibt:

$$(1) \quad F \cdot r = \frac{1}{2} At \cdot b.$$

Das Ergebnis ist schon a priori einleuchtend. Man kann

zu demselben auch auf elementarem Wege gelangen, wenn man in Fig. 4 die Schraffur als Summe der Effekte von At

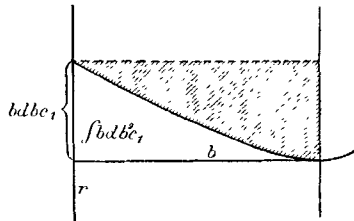


Fig. 4.

betrachtet und auf der anderen Seite die Dehnungskomponenten parallel r einsetzt.

Ableitung der Hauptformel.

Fig. 5 entspricht einem Rotationskörper um die Achse AB . Bezeichnungen gemäß Fig. 1. Es bedeute:

$$P = (A t_{\text{mittel}}) r^2 \pi = \text{Totalbelastung.}$$

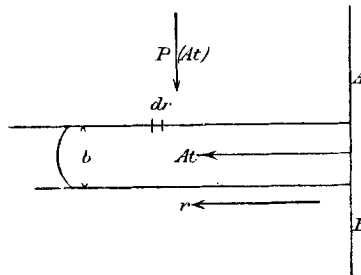


Fig. 5.

1. Innere Reibung ohne Rücksicht auf die Dehnung. Aus Gleichung (1) folgt:

$$2 F \delta r = A t_1 \delta b.$$

Nun ist offenbar:

$$2 r \pi dr \cdot At = - dP;$$

ebenso wegen Konstanz des Volums von $r^2 \pi b$ auch:

$$\delta b = - \frac{2 b [dr]}{r}; \quad [dr] = \varphi(r) dr;$$

Vereinigung dieser drei Gleichungen:

$$2 F \delta r = \frac{d P_1}{2 r \pi d r} \cdot \frac{2 b [d r]}{r},$$

oder:

$$2 F r^2 \pi \delta r \cdot d r = d P_1 b [d r],$$

bestimmt integriert beiderseits bis zum r der Hauptsummation:

$$\frac{2}{3} F r^3 \pi d r = d P_1 \cdot b,$$

nochmals integriert:

$$(2) \quad P_1 = \frac{2}{9} \cdot \frac{F r^3 \pi}{b}.$$

2. Dehnung ohne Beachtung der relativen Verschiebung.

Die Zugfestigkeit gemäß obiger Definition wird hier doppelt beansprucht, weil jeder differentiale Ring, Fig. 6, einen vollen Zug in tangentialer und einen ebensolchen in radialer Richtung erleidet.

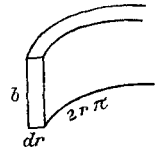


Fig. 6.

$$2 F \cdot \underbrace{b d r}_{\text{Querschn.}} \cdot \underbrace{2 \pi d r}_{\text{Weg}} = d P_2 \cdot d b = - d P_2 \frac{b [d r]}{r}.$$

[Da ein Differentialkörper in Betracht steht, war hier:

$$b \cdot 2 r \pi \cdot d r / d r = c \cdot d r / d r \quad \text{oder} \quad b r = c_1$$

konstant zu setzen, also $d b = - b [d r] / r$].

Integration wie in den vorigen Fällen:

$$(3) \quad P_2 = - F r^2 \pi,$$

also die inverse Zugfestigkeit.

Da nun die Reibung P_1 durch die Dehnung P_2 aufgehoben wird, so ist

$$P_1 - P_2 = \text{Effektivbetrag } P,$$

$$(4) \quad P = \frac{2}{9} \frac{F r^3 \pi}{b} + F r^2 \pi.$$

Diese Formel genügt bei Ausschluß einer reibenden Verschiebung der Berührungsflächen. Eine solche Reibung fordert jedoch besonders bei guter *Politur* und kurzer *Berührungszeit* Berücksichtigung. Im folgenden diene ein fein eben geschmirgelter, doch unpolierter, gehärteter Stahl als Preßkopf.

Festsitzen tritt offenbar ein, sobald $A t f = F$ ist, wenn f den Reibungskoeffizienten bedeutet. Wurde Blei auf dem benutzten Stahlblock über seine Festigkeit belastet, und ging die Gleitung von der Ruhe aus, so betrug dann f durch-

schnittlich etwa 0,4. Bei idealer Reibung völlig reiner Metallflächen wäre, wenn man die Vorgänge der inneren Reibung in die Zone der äußeren Reibung verlegt denkt, gemäß Gleichung (1), nach der nur die Hälfte der widerstehenden Kräfte ausgenutzt wurde, $f=0,5$ zu erwarten. Die Kondensationen an der Oberfläche bringen diesen Wert, wenn man blankes ebenes Blei unter klein gewähltem Eigendrucke auf eine schiefe Ebene von glattem Stahl bringt, für fettfreie Flächen auf etwa 0,2 herunter. Bei der naheliegenden Annahme, daß solche Kondensationen proportional dem Drucke entweichen, hätte man also als variablen Reibungskoeffizienten:

$$(5) \quad f = f_{\min.} + \frac{(f_{\max.} - f_{\min.})}{A t_{\max.}} \cdot A t$$

in die Differentialgleichung einzuführen; man setze:

$$f_{\min.} = 0,2 \text{ und } f_{\max.} = 0,5.$$

Festsitzen bei $f_{\max.} \cdot A t_{\max.} = F$, also $A t_{\max.} = 2 F$; demnach wegen Gleichung (1):

$$d A t_1 b = 2 (f A t) d r = 2 \left(0,2 + \frac{0,3}{2 F} \cdot A t \right) \cdot A t d r,$$

$$d A t_1 b = \left(0,4 A t + \frac{0,3}{F} A t^2 \right) d r;$$

nun ist $A t = A t_1 + F$:

$$\left(A t_1^2 + \frac{10}{3} A t_1 F + \frac{7}{3} F^2 \right) d r = \frac{10}{3} F b d A t_1,$$

integriert:

$$r - \varrho = \frac{10 F b}{3 \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{25}{9} F^2 - \frac{7}{3} F^2}} \left[\ln \left(\frac{A t_1 + \frac{5}{3} F - \mathcal{V}}{A t_1 + \frac{5}{3} F + \mathcal{V}} \right) \right]_0^F;$$

$$\mathcal{V} = \frac{2}{3} F;$$

$$r - \varrho = \frac{10}{4} b \cdot \ln \frac{7}{5};$$

$$(5a) \quad r - \varrho = 0,8387 b.$$

Erfahrungsgemäß gilt diese Zahl auch für andere Materialien, so daß deren Grad des inneren Zusammenhanges auch ihrer Zähigkeit im Festhalten fremder Kondensationen zugeordnet erscheint.

Der absolute Druck aus äußerer Reibung ist nach vorigem eine komplizierte Funktion; eine Vereinfachung liefert folgende Überlegung.

$A t_1$ wächst in schwach aufwärts gekrümmter Kurve von 0 bis F ; bei Berücksichtigung des Druckes der Ausbauchung kann man aber dafür die Gerade setzen, indem $A t_1$ dadurch um eine dieser Differenz nahezu gleiche kleine Größe vermehrt wird. Für kleine $(r-\rho)/r$ ist daher der Totaldruck aus äußerer Reibung gleich der Hälfte dessen für innere Reibung bei haftenden Flächen. Für wachsende b/r muß sich dagegen entsprechend diesem Zuwachs die Reibung in ihrem Druckwerte offenbar demjenigen der Ausbauchung nähern, da eines das andere bedingt. Diesen Anforderungen wird streng genügt, wenn man dem Drucke bei haftenden Flächen folgende für große r/b nur unbedeutende Randkorrektur — der Form nach negative innere Reibung, in die sie sich in der Tat auch umsetzt — hinzufügt:

$$(6) \quad -\frac{r}{r+\rho} \cdot \frac{2}{9} \cdot \frac{F\pi}{b} (r^3 - \rho^3).$$

Die vollständige Pressungsgleichung für homogenes, nicht sprödes Material lautet mithin:

$$(7) \quad \left\{ \begin{aligned} [P] &= \frac{2}{9} \frac{F r^3 \pi}{b} + F r^2 \pi - \frac{r}{r+\rho} \cdot \frac{2}{9} \cdot \frac{F \pi}{b} (r^3 - \rho^3) \\ &\quad + \frac{r+\rho}{10} \cdot F b \pi, \quad 1) \\ [\rho &= r - 0,8387 b; \quad r > 0,8387 b; \quad F = \varphi(t, (r, b), c)], \end{aligned} \right.$$

Der letzte Posten ist eine der Erfahrung entnommene kleine Korrektur für den Druck der vollendeten Ausbauchung, die nach einer Zerpressung bis auf halbe Höhe des Ursprunges als erreicht gelten darf. $2r$ ist an den Stirnflächen, b am Rande etwa viermal überkreuz zu messen; sollte b wegen ungenügender Parallelität der Druckflächen nicht völlig gleichmäßig ausfallen, so genügt

$$b_{\text{mittel}} = \frac{2 b_{\text{min.}} + b_{\text{max.}}}{3},$$

1) Dekadische Logarithmen der Konstanten für die Berechnung:

$$\begin{aligned} \log \frac{2}{9} \pi &= 0,84394 - 1; \\ \log 0,8387 &= 0,92361 - 1. \end{aligned}$$

da der Wirkungswert der kleineren b der größere ist. Der Druck darf erst entspannt werden, sobald das Tempo der Ausweichung auf das festgesetzte Minimum pro Minute zurückgegangen ist.

Es erübrigt noch die Formel für größere b :

$$(7a) \quad \begin{cases} [P] = F(R - \varepsilon)^2 \pi; \\ [b/n < r \leq 0,8387 b]. \end{cases}$$

R gilt für $b/2$; ε , der Zentrifugaleffekt der Ausbauchung, fällt mit wachsendem b von etwa $(R - r)/3$ bis um Null gegen $b = 2r/0,84$. Für größere b tritt leicht Verbiegung ein.

Unter Berücksichtigung der in obiger Arbeit von Bauschinger dargestellten Sprengstücke ist anzunehmen, daß das Pressungsobjekt kegelförmige, von den Stirnflächen gegen seine Mitte zulaufende Partien mit Keilwirkung bildet, deren Spitzen sich bei größerer Höhe nicht mehr berühren.

Verbindet man in einem Axialschnitt unseres Grenzzylinders (mit $r = 0,84 b$) die Endpunkte des Mantelschnittes miteinander und mit der Mitte der Achse, so bilden diese Verbindungslinien nahezu gleichseitige Dreiecke. Die Dimension senkrecht zum Schnitte sei zunächst konstant und verhalte sich wie jene bei der Ableitung von Gleichung (1). In den Keilflächen kann man die innere Reibung konzentriert vorstellen, während die Dreieckskörper wesentlich nur auf Dehnung beansprucht werden und unter Berücksichtigung der Ausbauchung bei einer gleichmäßigen vertikalen Einheitsbelastung mit F' vermöge ihrer Form die vertikal verlaufende Arbeit in der horizontal gerichteten nach Kraft und Weg unverändert wiedergeben, so daß $P/(R - \varepsilon)^2 \pi$ der Gleichung (7a) in der Tat auch gleich F' ist. Daß dies für kleine b gemäß Gleichung (7) nicht der Fall sein kann, bestätigt sich auch dadurch, daß offenbar entsprechend dieser Auffassung die axialen Pressungskräfte gegen die radialen und tangentialen Dehnungskräfte pro Quadratzentimeter im Verhältnis des Zylinderquerschnittes zum Mantel, also abgesehen von Konstanten, wie r/b zunehmen müssen.

Darin liegt auch eine Motivierung für die eingangs erwähnte Gleichung von Bauschinger in ihrer älteren Spezialform von Vicat für die sogenannte „Druckfestigkeit“. Beide Formeln wurden für das Verhalten spröder Materialien, wie

Gesteine, Gips, Zemente, anscheinend nur empirisch, aufgestellt. Aber gerade für diese Stoffe stellen sie bei geringen Höhen des Pressungsobjektes den wirklichen Vorgang auch nicht annähernd dar. Der Umstand, daß die Berührungsflächen nie absolut eben sind, also der Druck nicht überall gleichmäßig, sondern vorzugsweise in einzelnen Punkten angreift, findet dabei keine befriedigende Erklärung, ebensowenig der Einfluß der zur Vermeidung dieses Übelstandes verwendeten schützenden Deckschichten, endlich auch die Bedeutung der Geschwindigkeit der Anpressung.

Beispiele.

Die hier verwendeten verschiedenen Metalle wurden zunächst sorgfältig gegossen, dann wiederholt gepreßt und gehämmert, endlich zylindrisch abgedreht und entfettet. Bei einer mindestens viertelstündigen Anpressungsdauer zeigten die Gleichgewichtsfiguren eine schöne Regelmäßigkeit. Die Dauer des Maximaldruckes war im Durchschnitt die gleiche.

A. Reines Blei.

Beste Handelsware, von der Fabrik als 100 proz. bezeichnet; nach vorliegenden Angaben¹⁾ mit 0,04 Proz. Verunreinigungen, hauptsächlich Sb, As, Ag, Cu, Fe. Pressungsergebnisse:

$$1. \quad P = 3000 \text{ kg. } b = 1,76 . r = 1,91 . \rho = 0,434 .$$

$$F = P : (2,764 + 11,46 - 2,226 + 1,296) = 225,7 \text{ kg/cm}^2 .$$

$$2. \quad P = 4800 \text{ kg. } b = 1,24 . r = 2,27 . \rho = 1,23 .$$

$$F = P : (6,586 + 16,19 - 3,568 + 1,367) = 233,2 \text{ kg/cm}^2 .$$

$$3. \quad P = 6600 \text{ kg. } b = 1 . r = 2,535 . \rho = 1,6963 .$$

$$F = P : (11,373 + 20,184 - 4,774 + 1,329) = 234,8 \text{ kg/cm}^2 .$$

$$4. \quad P = 9000 \text{ kg. } b = 0,82 . r = 2,78 . \rho = 2,092 .$$

$$F = P : (18,292 + 24,278 - 5,99 + 1,255) = 237,9 \text{ kg/cm}^2 .$$

$$5. \quad P = 12000 \text{ kg. } b = 0,68 . r = 2,98 . \rho = 2,41 .$$

$$F = P : (27,17 + 27,9 - 7,075 + 2,3) = 238,6 \text{ kg/cm}^2 .$$

1) Die chemisch-analytischen Daten beziehen sich im folgenden auf Durchschnittsproben und dürften keine Abweichungen von Belang enthalten.

Gewöhnliche ZerreiBungsproben ergaben hiernach 236 kg im Mittel. Der letzte Klammerkoeffizient entspricht genau einer kleinen Ausquellung über den Preßkopftrand.

B. Chemisch reines *Blei*, elektrolytischen Ursprunges.

1. $P = 1800 \text{ kg} . b = 0,886 . r = 1,64 . \rho = 0,897 .$
 $F = P : (3,476 + 8,449 - 1,879 + 0,706) = 167,4 \text{ kg/cm}^2 .$
2. $P = 3000 \text{ kg} . b = 0,63 . r = 1,94 . \rho = 1,4116 .$
 $F = P : (8,091 + 11,823 - 2,878 + 0,663) = 169,5 \text{ kg/cm}^2 .$
3. $P = 6000 \text{ kg} . b = 0,431 . r = 2,35 . \rho = 1,9985 .$
 $F = P : (21,02 + 17,35 - 4,365 + 0,589) = 173,4 \text{ kg/cm}^2 .$
4. $P = 12000 \text{ kg} . b = 0,32 . r = 2,76 . \rho = 2,429 .$
 $F = P : (45,87 + 23,93 - 7,768 + 0,521) = 191,8 \text{ kg/cm}^2 .$

C. *Blei* wie ad A., mit 0,98 Proz. Zn.

1. $P = 4800 \text{ kg} . b = 0,92 . r = 1,972 . \rho = 1,2004 .$
 $F = P : (7,326 + 12,218 - 2,802 + 0,917) = 271,8 \text{ kg/cm}^2 .$
2. $P = 9600 \text{ kg} . b = 0,587 . r = 2,46 . \rho = 1,9677 .$
 $F = P : (17,70 + 19,012 - 4,803 + 0,817) = 293,3 \text{ kg/cm}^2 .$

D. *Zinn*, chemisch rein.

1. $P = 4200 \text{ kg} . b = 0,894 . r = 2,03 . \rho = 1,28 .$
 $F = P : (6,533 + 12,947 - 3,003 + 0,93) = 241,3 \text{ kg/cm}^2 .$
2. $P = 7200 \text{ kg} . b = 0,64 . r = 2,39 . \rho = 1,853 .$
 $F = P : (14,89 + 17,95 - 4,48 + 0,85) = 246,5 \text{ kg/cm}^2 .$
3. $P = 12000 \text{ kg} . b = 0,488 . r = 2,738 . \rho = 2,329 .$
 $F = P : (29,36 + 23,55 - 6,10 + 0,78) = 252,2 \text{ kg/cm}^2 .$

E. *Zink*, chemisch rein.

1. $P = 12000 \text{ kg} . b = 0,693 . r = 1,32 . \rho = 0,7388 .$
 $F = P : (2,317 + 5,474 - 1,225 + 0,448) = 1711 \text{ kg/cm}^2 .$
2. $P = 18000 \text{ kg} . b = 0,534 . r = 1,54 . \rho = 1,062 .$
 $F = P : (4,501 + 7,163 - 1,723 + 0,431) = 1735 \text{ kg/cm}^2 .$

F. *Kadmium* (gut gereinigt).

1. $P = 9600 \text{ kg} . b = 0,703 . r = 1,46 . \rho = 0,8704 .$
 $F = P : (3,09 + 6,7 - 1,52 + 0,52) = 1092 \text{ kg/cm}^2 .$
2. $P = 13800 \text{ kg} . b = 0,545 . r = 1,657 . \rho = 1,2 .$
 $F = P : (5,828 + 8,626 - 2,095 + 0,489) = 1074 \text{ kg/cm}^2 .$
3. $P = 19800 \text{ kg} . b = 0,42 . r = 1,875 . \rho = 1,523 .$
 $F = P : (10,71 + 11,04 - 2,8 + 0,45) = 1020 \text{ kg/cm}^2 .$

G. *Aluminium* (beste Handelsware).

1. $P = 8400 \text{ kg} . b = 0,934 . r = 1,147 . \rho = 0,3636 .$
 $F = P : (1,13 + 4,13 - 0,83 + 0,44) = 1725 \text{ kg/cm}^2 .$
2. $P = 13200 \text{ kg} . b = 0,714 . r = 1,306 . \rho = 0,707 .$
 $F = P : (2,18 + 5,36 - 1,19 + 0,45) = 1941 \text{ kg/cm}^2 .$
3. $P = 18000 \text{ kg} . b = 0,595 . r = 1,42 . \rho = 0,921 .$
 $F = P : (3,36 + 6,335 - 1,48 + 0,435) = 2081 \text{ kg/cm}^2 .$

Das Aluminium zeigte die Eigentümlichkeit, auf geringen Überdruck fast momentan zu reagieren; ebenso schnell verringerte sich die weitere Ausfußgeschwindigkeit beim Festhalten dieses Druckes. Die oben besprochene Rückbildungskraft der Quinckeschen Schaumwände dürfte hier also der Festigkeitsbelastung verhältnismäßig nahe kommen.

H. *Silber* (chemisch rein, durch Elektrolyse entstanden).

Da reines Silber beim Erstarren unter Gasentbindung fehlerhafte Gußstücke liefert, und sich andererseits im Vakuum geschmolzen verunreinigt, indem es ähnlich dem Kupfer¹⁾ Materialien wie Quarzglas nach Art der Alkalien angreift, so wurde ein Block aus gewalzten, gut gereinigten Platten bei Glühhitze auf Magnesia zusammengepreßt und bearbeitet. Demnächst erfolgte die weitere Behandlung bei gewöhnlicher Temperatur nach dem bisherigen Verfahren. Versuchsdaten:

1) L. Bergfeld, Über Verdampfung von Metallen etc. Dissertation. Heidelberg bei J. Hörning 1904.

$$1. \quad P = 4800 \text{ kg} . b = 0,43 . r = 0,7 . \rho = 0,331 .$$

$$F = P : (0,557 + 1,539 - 0,339 + 0,139) = 2532 \text{ kg/cm}^2 .$$

$$2. \quad P = 9600 \text{ kg} . b = 0,285 . r = 0,87 . \rho = 0,631 .$$

$$F = P : (1,613 + 2,378 - 0,578 + 0,134) = 2706 \text{ kg/cm}^2 .$$

$$3. \quad P = 14400 \text{ kg} . b = 0,23 . r = 0,961 . \rho = 0,7681 .$$

$$F = P : (2,694 + 2,901 - 0,733 + 0,125) = 2887 \text{ kg/cm}^2 .$$

$$4. \quad P = 19200 \text{ kg} . b = 0,198 . r = 1,035 . \rho = 0,869 .$$

$$F = P : (3,909 + 3,365 - 0,868 + 0,1184) = 2943 \text{ kg/cm}^2 .$$

I. Chemisch reines Kupfer.

(Stück eines Leitungskabels, als elektrolytisches Material bezeichnet.)

$$1. \quad P = 4200 \text{ kg} . b = 0,476 . r = 0,557 . \rho = 0,158 .$$

$$F = P : (0,2535 + 0,9751 - 0,1931 + 0,1069) = 3677 \text{ kg/cm}^2 .$$

$$2. \quad P = 9000 \text{ kg} . b = 0,288 . r = 0,716 . \rho = 0,4745 .$$

$$F = P : (0,8898 + 1,6105 - 0,379 + 0,1077) = 4038 \text{ kg/cm}^2 .$$

$$3. \quad P = 15000 \text{ kg} . b = 0,216 . r = 0,833 . \rho = 0,6518 .$$

$$F = P : (1,868 + 2,18 - 0,546 + 0,101) = 4163 \text{ kg/cm}^2 .$$

K. Nickel,

nach vorliegender Angabe mit 1,7 Proz. Verunreinigungen, Kobalt, Kupfer, Eisen, auch etwas Kohle. Die Höhe des Versuchszylinders betrug ursprünglich 0,90 cm bei einem Durchmesser von 0,92 cm. Der Körper wurde gemessen nach Belastungen mit 1800, 4200, 9000 und 15000 kg. Zuverlässige Daten ließen sich nicht erzielen, da der Zylinder nach der Pressung am Rande von Rissen durchsetzt war und außerdem der gehärtete Stahl des Preßkopfes infolge des durch die innere Reibung nach der Mitte hin bis auf schätzungsweise 11000 kg pro Quadratcentimeter wachsenden Druckes stark eingebault wurde. Die Festigkeit des Nickels schien mit dem Drucke um mehr als das Doppelte zu wachsen, jedoch dürfte der Zusammenhang des Materials schon nach der ersten Bearbeitung gelitten haben. Derartige Stoffe zeigen übrigens grundsätzliche Abweichungen von dem Verhalten der anderen hier behandelten Metalle.

Die vorstehenden Ergebnisse legen die Annahme nahe, daß die Zugfestigkeit unter wachsendem Drucke um wenige Prozente der Einheitsbelastung zunimmt. Eine vielleicht durch Allotropien erklärliche Ausnahme scheint hier das Kadmium zu machen, wenn auch die Abweichungen kein wesentliches Überschreiten der hierunter festzulegenden Fehlergrenze bedeuten.

Besonders augenfällig ist die Zunahme der Zugfestigkeit von Gußblei nach zunehmenden Druckbelastungen. Es wurde ein Anwachsen der Festigkeit von etwa 60 kg/cm^2 bis gegen den sechsfachen Betrag davon beobachtet, als das Maximum der Einheitsbelastung in der Achse des Preßkuchens schließlich nicht weniger als 5000 kg/cm^2 betrug. Die Beziehungen der Zugfestigkeit zu dem Grade der Prägung ließ sich als Funktion von r und b darstellen:

$$(8) \quad F = 360 \left(1 - \frac{5}{8} \cdot 0,8387 \frac{b}{r} \right)$$

Nach 18 Vorversuchen, bei denen die Fehlergrenze im ungünstigsten Falle ± 20 Proz. betrug, gelang es nach Prüfung der Fehlerquellen, in 7 Versuchen, mittels Gleichung (8) nach Gleichung (7) den angewandten Druck bis auf ca. ± 5 Proz. Genauigkeit aus der Gleichgewichtsfigur des Preßkuchens zu berechnen. Es wurden aus gewöhnlichem Blei in Asbestformen Zylinder von *verschiedener* Größe gegossen, die unter tunlichster Druckvermeidung mit scharfem Werkzeug nachgedreht wurden. Die Daten waren überaus empfindlich gegen geringfügige Fehlerquellen, wie Mängel des Gusses, oder kleine Ungleichmäßigkeiten im Tempo des Anpressens, auch wurde die Ausweichung hierbei nur durch das Manometer kontrolliert, so daß wegen der Abnahme von b die wirkliche Zunahme von F gegen die berechnete ein wenig zurückbleiben könnte. Dauert die Ausprägung nur ein wenig zu kurz, so wird r um einige Prozente zu klein. Ein Prozent Abweichung kann sich im Resultate bis zum fünffachen Prozentbetrage potenzieren.

Um den Einfluß des Reibungskoeffizienten bei Anwesenheit von Fettspuren zu beobachten, wurden noch zwei Zylinder zerpreßt, bei denen in einem Falle die Stirnflächen mit weicher Butter, beim zweiten mit einer konsistenten Mischung von Wachs und Lanolin leicht bestrichen wurden. Es resultierten

beträchtliche Abweichungen, gegen 100 Proz. und mehr. Die scheinbare Regellosigkeit dieser Abweichungen dürfte interessante Anhaltspunkte für die Kenntnis des noch wenig aufgeklärten Charakters des Reibungskoeffizienten bieten.

Um die Druckzunahme in der Achse des Preßkuchens infolge der inneren Reibung zu schätzen, genügt es für die hier in Frage kommenden Zylinder mit geringer Höhe, nur die beiden Hauptposten von P zu differenzieren:

$$\frac{dP}{dr} = \frac{2}{3} \frac{F r^2 \pi}{b} + 2 F r \pi = 2 r \pi A t;$$

$$(9) \quad A t = F \left(\frac{r}{3b} + 1 \right).$$

Zur Nachprüfung dieses Wertes kann man an der betreffenden Stelle des Preßkopfes eine kleine Kerbe anbringen und messen, wie tief der Druck das Blei in dieselbe hineintreibt. Berechnung einfach unter Verwendung von Gleichung(1), indem man für b die Breite des Spaltes bei der tiefst gedungenen Partie setzt und den Überschuß nach obenhin schlechtweg als starr behandelt.

So lassen sich unschwer nur durch Bleikörper Drucke erreichen und messen, welche die Festigkeit des besten Stahles beliebig überschreiten, und dabei läßt sich ein Nachgeben des Stahles durch den immer noch beträchtlichen Druck desselben oder auch eines anderen vorgelagerten Materials verhindern.

Auch auf theoretischem Gebiete wäre diesen Untersuchungen wohl noch ein weiteres Interesse abzugewinnen.

(Eingegangen 27. März 1906.)
