

VIII. Das Schwinden und seine Begleiterscheinungen.

A. Allgemeine Betrachtungen.

366. Das Volumen v eines Stoffes ist abhängig von seiner Temperatur t und dem Druck p . Bei festen und flüssigen Stoffen haben geringe Änderungen des Drucks verhältnismäßig sehr geringen Einfluß auf das Volumen, so daß man diesen bei Drücken in der Nähe des Atmosphärendrucks $p=1$ vernachlässigen kann. Unter dieser Voraussetzung ist dann v nur abhängig von t . Irgendeine Längenabmessung l des festen oder flüssigen Stoffes ist dann ebenfalls von t abhängig. Zeichnet man v oder l in Abhängigkeit von der Temperatur auf, so erhält man Linien, die im allgemeinen stetig verlaufen, solange nicht eine Zustandsänderung innerhalb des Stoffes eintritt (Änderung des Aggregatzustandes oder Umwandlung), die plötzliche Änderung im Verlauf der Linie herbeiführt.

Im allgemeinen ist der Verlauf der Schaulinien für v und l umkehrbar, d. h. die durch den Versuch ermittelte Beziehung zwischen v und t ist dieselbe, ob man den Versuch bei steigender oder bei fallender Temperatur ausführt. Bei steigender Temperatur wird z. B. die Linie ABC (Abb. 435) erhalten, bei fallender Temperatur wird dann dieselbe Linie wieder im umgekehrten Sinne zurückgelegt.

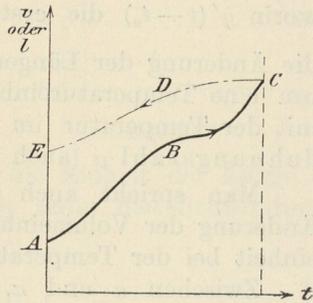


Abb. 435.

Es gibt aber auch einige Fälle (z. B. bei gewissen Eisen-Nickel-Legierungen), wo der Vorgang der Volum- und Längenänderung bei Erhitzung und Abkühlung nicht umkehrbar ist. Man erhält dann bei steigender Temperatur beispielsweise eine Linie ABC , bei abfallender Temperatur eine davon abweichende Linie CDE . Solche Fälle sind möglich, wenn sich die Änderung des Volumens v oder der Länge l nicht sogleich mit der Temperatur t einstellt, sondern infolge starker innerer Reibung innerhalb des Stoffes hinter der Änderung der Temperatur zurückbleibt. Man hat dann eine Art Hysterisis, ähnlich wie beim Magnetisierungsvorgang. Die Energie, die bei der Erwärmung des Stoffes zur Volumvergrößerung aufgewendet wurde, wird in einem solchen Falle bei der Abkühlung nicht vollständig wieder abgegeben. Diese Ausnahmefälle sollen später besprochen werden (II B); im folgenden werde von ihnen vorläufig abgesehen.

Rechnet man die Temperatur von einer Temperatur t_0 als Nullpunkt an, und besitzt der Stoff bei t_0 das Volumen v_0 , so kann man die Beziehung zwischen v und t und ebenso die zwischen l und t in die Form bringen

$$v = v_0 \varphi_1(t - t_0) \dots \dots \dots (1)$$

$$l = l_0 \varphi(t - t_0) \dots \dots \dots (2)$$

Hierin sind φ_1 und φ Funktionen, die den Verlauf der Linie AB in Abb. 436 bestimmen.

Da man bei bekannten Längenabmessungen eines Körpers sein Volumen v berechnen kann, wollen wir vorläufig nur die Längenänderungen betrachten.

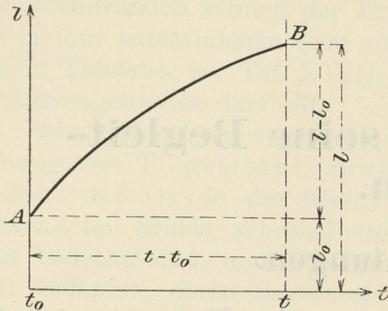


Abb. 436.

Der Verlauf der Linie AB entspreche der Gl. 2. Bei der Erwärmung von t_0 auf t wird ein Stab von der ursprünglichen Länge l_0 um den Betrag $\lambda_w = l - l_0$ verlängert. Das entspricht einer Wärmedehnung ε_w bezogen auf die Einheit der Länge l_0 von

$$\varepsilon_w = \frac{l - l_0}{l_0}.$$

Aus Gl. 2 ergibt sich der Wert der Wärmedehnung

$$\varepsilon_w = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 = \varphi(t - t_0) - 1.$$

Sie ist sonach abhängig von der Temperatur. Einer sehr kleinen Temperaturänderung dt möge die ebenfalls sehr kleine Änderung $d\varepsilon_w$ der Dehnung entsprechen. Dann ist

$$\alpha = \frac{d\varepsilon_w}{dt} = \varphi'(t - t_0), \dots \dots \dots (3)$$

worin $\varphi'(t - t_0)$ die erste Ableitung der Funktion $\varphi(t - t_0)$ bedeutet. $\frac{d\varepsilon_w}{dt}$ gibt die Änderung der Längeneinheit des Stabes infolge der Änderung der Temperatur um eine Temperatureinheit bei der Temperatur t an. Man bezeichnet diesen mit der Temperatur im allgemeinen veränderlichen Wert als lineare Wärmedehnungszahl α (auch als linearen Ausdehnungskoeffizienten).

Man spricht auch von der kubischen Wärmedehnungszahl, die die Änderung der Volumeneinheit infolge Änderung der Temperatur um eine Temperatureinheit bei der Temperatur t angibt. Sie soll das Zeichen α_1 erhalten.

Zwischen α und α_1 besteht eine Beziehung, die sich aus folgender Überlegung ergibt: Ein Würfel mit der Kantenlänge $l = 1$ werde bei einer bestimmten Temperatur t um 1° erhitzt. Jede Kante dehnt sich dann um den Betrag α und nimmt die Länge $1 + \alpha$ an. Das Volumen des Würfels nach der Erwärmung ist somit $(1 + \alpha)^3$; die Änderung des Volumens ist $(1 + \alpha)^3 - 1$; der Begriffserklärung nach muß somit sein

$$\alpha_1 = (1 + \alpha)^3 - 1 = 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3.$$

Da α erfahrungsgemäß bei flüssigen und festen Stoffen sehr klein ist, so kann man die höheren Potenzen α^2 und α^3 gegenüber dem Wert 3α vernachlässigen, und man erhält

$$\alpha_1 = 3\alpha. \dots \dots \dots (4)$$

Die kubische Wärmedehnungszahl ist also dreimal so groß als die lineare.

a) Kann innerhalb eines Temperaturbereichs t_0 bis t die Linie AB , Abb. 436, mit genügender Annäherung durch eine Gerade ersetzt werden, so wird Gl. 2

$$l = l_0 [1 + \alpha(t - t_0)],$$

mithin $\varphi(t - t_0) = 1 + \alpha(t - t_0)$ und $\varphi'(t - t_0) = \alpha$; nun ist aber nach Gl. 3

$$\varphi'(t - t_0) = \alpha,$$

folglich erhalten wir $a = \alpha$ und für den vorliegenden besonderen Fall

$$l = l_0 [1 + \alpha (t - t_0)] \dots \dots \dots (2a)$$

Die Wärmedehnungszahl ist unter der gemachten Voraussetzung innerhalb der Grenzen t_0 bis t unveränderlich.

b) Läßt sich die Gl. 2 mit genügender Genauigkeit innerhalb der Grenzen t_0 bis t ersetzen durch die Gleichung

$$l = l_0 [1 + a(t - t_0) + b(t - t_0)^2 + c(t - t_0)^3 + \dots], \dots \dots (2b)$$

so ergibt sich $\alpha = \varphi'(t - t_0)$ durch Differenzieren der Ausdrucks in der Klammer der Gl. 2b zu

$$\alpha = a + 2b(t - t_0) + 3c(t - t_0)^2 + \dots$$

367. Ein Stab, der bei der Temperatur t_1 die Länge l_1 hatte, werde abgekühlt auf die Temperatur t_2 . Die Längenänderung werde entsprechend der Gleichung 2 dargestellt durch die Linie AB in Abb. 437:

$$l = l_2 \varphi(t - t_2) \dots \dots \dots (5)$$

Die gesamte Verkürzung (Schwindung) bei der Abkühlung von t_1 auf t_2 , wobei t_2 der atmosphärischen Temperatur entsprechen möge, ist $\lambda_w = AC = l_1 - l_2$, die Verkürzung, bezogen auf die Einheit der Länge l_2 , wird $\frac{l_1 - l_2}{l_2}$. Man nennt diese Größe das Schwindmaß für den Temperaturabfall von t_1 bis t_2 . Es soll mit $\epsilon_{1,2}$ bezeichnet werden:

$$\epsilon_{1,2} = \frac{l_1 - l_2}{l_2} \dots \dots \dots (6)$$

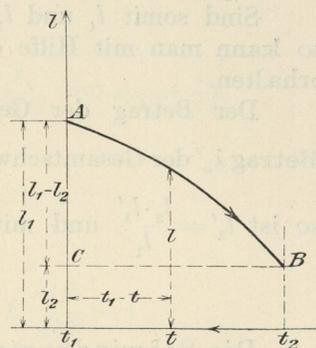


Abb. 437.

Zuweilen bezieht man das Schwindmaß nicht auf die Einheit der Länge l_2 , sondern auf 100 Einheiten dieser Länge. Man erhält dann das Schwindmaß in Prozenten, es ist

$$\frac{l_1 - l_2}{l_2} \cdot 100 = \epsilon_{1,2} \cdot 100 \dots \dots \dots (7)$$

Die Kenntnis des Schwindmaßes ist von großer Bedeutung für die technologische Verarbeitung der metallischen Stoffe. Wird z. B. ein Stab gegossen und hat das Modell und somit auch angenähert die Gußform die Länge l_1 , so wird der fertige Abguß die Länge l_2 haben. Will man also einen Stab von der genauen Länge l_2 haben, so muß das Modell bzw. die Gußform um den Betrag der Schwindung $l_1 - l_2$ größer gemacht werden. Dieser Betrag ist $l_2 \cdot \epsilon_{1,2}$. Bei Gußeisen ist das mittlere Schwindmaß von der Gießhitze bis zu gewöhnlicher Temperatur $\epsilon \cdot 100 = 1\%$. Um einen Gußeisenstab von der Länge 100 cm zu erhalten, muß man die Gußform 101 cm lang machen.

Von gleicher Wichtigkeit ist die Kenntnis des Schwindmaßes bei Walzmaterial, das genaue Querschnittsabmessungen haben soll. Sind z. B. Stahlschienen herzustellen mit einer Höhe h , so muß das Kaliber der Fertigwalze die Höhe $h(1 + \epsilon)$ erhalten, wenn ϵ das Schwindmaß von der Temperatur des

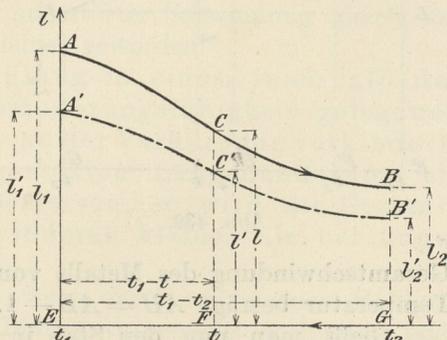


Abb. 438.

um den Betrag CD seine Länge bis zur Temperatur t_3 unverändert beibehalten. Er verhält sich nun bei seiner weiteren Abkühlung wie ein Stab desselben Stoffes von der Länge FD , der von der Temperatur t_3 ungestört auf t_2 abkühlt. Bei der letzteren Temperatur besitzt jede Einheit seiner Länge die Größe GJ , wobei sich GJ nach Abs. 367 ergibt zu

$$JG : BG = DF : CF,$$

also

$$JG = BG \cdot \frac{DF}{CF}.$$

Die Schwindung bei ungehinderter Ausdehnung des Metalls beträgt

$$\lambda_w = AE - BG,$$

die Schwindung λ_w' bei verhinderter Ausdehnung des Stoffes während der Erstarrung

$$\lambda_w' = AE - JG = AE - BG \cdot \frac{DF}{CF}.$$

λ_w' ist somit größer als λ_w .

Die Beziehung zwischen dem Gesamtschwindmaß $\varepsilon_{1,2} = \frac{\lambda_w}{BG}$ und $\varepsilon'_{1,2} = \frac{\lambda_w'}{JG}$

findet man ferner wie folgt:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{AE - BG}{BG} = \frac{AE}{BG} - 1 = AE - 1.$$

$$\varepsilon'_{1,2} = \frac{AE - BG \cdot \frac{DF}{CF}}{BG \cdot \frac{DF}{CF}} = \frac{AE \cdot CF}{BG \cdot DF} - 1 = AE \cdot \frac{CF}{DF} - 1.$$

Das Schwindmaß $\varepsilon'_{1,2}$ ist also größer als $\varepsilon_{1,2}$.

Verhindert man einen Stoff, der sich während der Erstarrung ausdehnt, durch bleibende Formänderung an dieser Ausdehnung, so wird sowohl die Schwindung als auch das Schwindmaß gesteigert.

b) Wird ein Stoff, der von dem Beginn der Erstarrung bis zur gewöhnlichen Temperatur seine Länge nach der Linie ACB in Abb. 439 ändert, innerhalb des Temperaturintervalls t_3 bis t_4 , in dem vorwiegend nur plastisches Formänderungsvermögen vorausgesetzt werde, an der freien Schwindung verhindert, so behält er bei t_4 noch die Länge $PM = CF$. Hört dann bei t_4 das der Schwindung entgegenstehende Hindernis auf, so entspricht die Weiterschwindung der Linie MO , also der Schwindung eines Stabes von der Länge $MP = CF$ nach demselben Gesetz, das dem Kurvenstück NB zugrunde liegt. Es muß dann sein $MP : NP = OG : BG$.

Die Schwindung ist jetzt statt AH bei ungestörter Schwindung gleich der Strecke AQ bei gestörter Schwindung, also kleiner geworden.

Wird ein Stoff während der Abkühlung in einem innerhalb der Zone der vorwiegend plastischen Formänderungsfähigkeit gelegenen Temperaturbereich durch äußere Kräfte an der Verkürzung verhindert, bei weiterer Abkühlung aber der ungestörten Längenänderung bis herab zu gewöhnlicher Temperatur überlassen, so wird die Gesamtschwindung und auch das Gesamtschwindmaß kleiner als bei unge störter Längenänderung.

Der Fall b kann z. B. verwirklicht werden, wenn der Kern in einem Hohlguß die Schwindung innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs verhindert oder erschwert.

Die Fälle a und b können eintreten, wenn Formwände oder Kerne der freien Längenänderung des Gußstücks entgegenwirken; sie können aber auch dadurch bedingt werden, daß sich starr verbundene Teile des Gusses gegenseitig in ihrer Schwindung behindern, so daß der eine bleibend verkürzt, der andere bleibend gestreckt wird. Dieser Fall ist früher bereits bei den Spannungen besprochen worden (331 bis 338). Beide Fälle sind natürlich nur bis zu einem gewissen Grade möglich; übersteigen die Widerstände ein gewisses Maß, so treten Warmrisse auf (335).

B. Die Bildung von Schwindhohlräumen (Lunkern).

369. Zur groben Versinnlichung der Vorgänge bei der Bildung von Schwindhohlräumen diene folgende Betrachtung an der Hand der Abb. 441. Es liege eine Gußform vor, die einen würfelförmigen Hohlraum von 600 mm Seitenlänge umfaßt. In diese werde ein flüssiger Stoff eingegossen. Es wird vorausgesetzt,

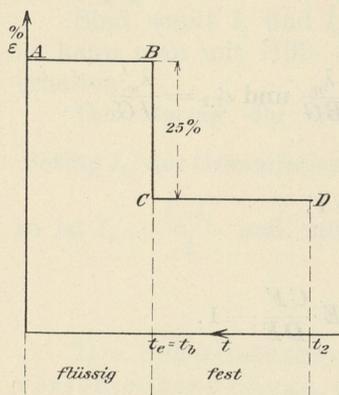


Abb. 440.

daß nach vollendetem Guß nichts mehr von dem flüssigen Material in die Gußform nachfließen kann. Die Schwindungslinie des gegossenen Stoffes habe den Verlauf wie in Abb. 440, d. h. weder das flüssige noch das feste Material ändere sein Volumen mit der Temperatur. Nur beim Übergang aus dem flüssigen in den festen Zustand trete eine Längenverkürzung um beispielsweise 25% ein. Dieser Verlauf der Schwindung ist zugrunde gelegt worden, weil sich hierbei die Überlegung am einfachsten gestaltet; insbesondere sind die Einflüsse von Strömungen innerhalb der Flüssigkeit durch diese Annahme ausgeschaltet gedacht, weil sie die Sachlage wesentlich verwickeln können.

Wir denken uns die Erstarrung in drei Zeitabschnitte zerlegt. Die Abkühlung erfolgt von der Oberfläche der Gußform her von außen nach innen. Es werde vorausgesetzt, daß die Abkühlungsgeschwindigkeit in den Richtungen senkrecht zu den Würfelflächen an allen Stellen gleich sei.

1. Zeitabschnitt. Von dem Würfel von 600 mm Seitenlänge denke man sich eine Außenschicht von 120 mm Dicke abgetrennt und zur Erstarrung gebracht. Zurück bleibt dann von dem flüssigen Stoff ein Würfel von der Seitenlänge $600 - 2 \cdot 120 = 360$ mm, entsprechend einem Rauminhalt von 360^3 cbmm. Bei der Erstarrung der Außenschicht wird dem flüssigen Material Wärme von der Formwand entzogen. Es werden sich deswegen Kristalle an dieser ansetzen, und an diesen ersten Kristallen wachsen dann weitere an. Die erstarrte Kruste I wird daher außen einen Würfel von der Seitenlänge 600 mm bilden. Ihre Dicke, die im flüssigen Zustand 120 mm betrug, wird sich aber wegen der Schwindung von 25% auf 90 mm verringern. Man erhält so innerhalb der erstarrten Kruste einen würfelförmigen Hohlraum mit der Seitenlänge $600 - 2 \cdot 90 = 420$ mm. Dem flüssigen Rest von 360^3 cbmm Rauminhalt steht nun ein durch die erstarrte Kruste I gebildeter Hohlraum von 420^3 cbmm zur Verfügung, den er nicht auszufüllen vermag. Er wird sich deshalb im unteren Teil über der zur Verfügung stehenden Grundfläche von 420^2 qmm ausbreiten und eine Höhe h_1 annehmen, die sich aus der Beziehung $420^2 \cdot h_1 = 360^3$ ergibt, woraus $h_1 = 265$ mm. Von der zur Verfügung stehenden Höhe 420 mm des Hohlraums werden also nur 265 mm ausgefüllt. Über der Flüssigkeit bleibt deswegen ein luftlerer Raum H_1 von $420 - 265 = 155$ mm Höhe (Abb. 441).

2. Zeitabschnitt. Von dem flüssigen Teil des Materials, der einem Prisma vom 420^2 qmm Grundfläche bei 265 mm Höhe entspricht, werde wieder eine 120 mm dicke Schicht von außen her abgegrenzt und zur Erstarrung gebracht. Es hinterläßt alsdann ein flüssiger Rest, dessen Volumen sich ergibt zu

$$(420 - 2 \cdot 120)^2 \times (265 - 2 \cdot 120) = 180^2 \cdot 25 \text{ cbmm.}$$

Die erstarrte Kruste nimmt wegen des Schwindens die Dicke 90 mm an. Die Kristalle setzen sich bei der Erstarrung an die bereits früher im ersten Zeitabschnitt erstarrte Kruste I an, so daß man einen prismatischen Hohlkörper II erhält, der im Innern einen Hohlraum von der Grundfläche $(420 - 2 \cdot 90)^2 = 240^2$ qmm und einer Höhe von $265 - 2 \cdot 90 = 85$ mm übrigläßt. Dem nach Erstarrung von Kruste II übrigbleibenden flüssigen Rest von $180^2 \cdot 25$ cbmm Rauminhalt steht ein Hohlraum von 240^2 qmm Grundfläche zur Verfügung, dessen unterer Teil ausgefüllt wird bis zur Höhe h_2 , die sich aus der Beziehung $240^2 \cdot h_2 = 180^2 \cdot 25$ ergibt; mithin ist $h_2 = 14$ mm. Von der zur Verfügung stehenden Höhe 85 mm des Hohlraums werden nur 14 mm ausgefüllt; es bleibt also ein zweiter luftleerer Hohlraum H_2 von der Höhe $85 - 14 = 71$ mm übrig.

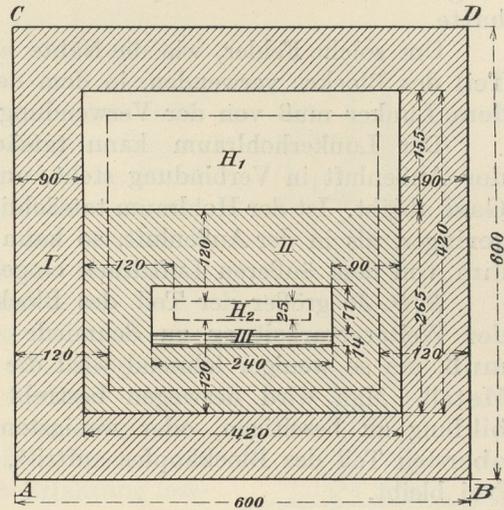


Abb. 441.

3. Zeitabschnitt. Schließlich wird auch der letzte flüssige Rest erstarren, wiederum unter Bildung eines luftleeren Raums, der weiter nicht in Betracht gezogen werden soll.

Als Endergebnis erhalten wir in dem erstarrten Würfel Hohlräume H_1 und H_2 in der in Abb. 441 gezeichneten Weise übereinander. Falls Gasentwicklung aus dem Gußmaterial nicht stattfindet, sind diese Hohlräume tatsächlich luftleer.

In Wirklichkeit darf man sich die Erstarrung nicht bloß in drei Zeitabschnitte zerlegt denken, sondern in unendlich viele. Man erhält deswegen auch eine ganze Reihe von Hohlräumen H_1, H_2, H_3, \dots übereinander, deren Gesamtheit man als Schwindhohlraum, Saugtrichter oder Lunker bezeichnet. Tafelabb. 83, Taf. XVIII, zeigt einen längs durchgebrochenen Naphtalinblock von etwa 420 mm Höhe, 240 mm oberem und 100 mm unterem Durchmesser, der in eine Blechform gegossen und darin zur Erstarrung gebracht wurde. Naphtalin wurde gewählt, weil es beim Übergang aus dem flüssigen in den festen Zustand stark schwindet. Der Lunker ist außerordentlich regelmäßig ausgebildet; er liegt in der oberen Hälfte des Blocks und ist durch zahlreiche wagerechte Wände unterteilt, wie es die obige Überlegung erwarten läßt. Nach der Blockmitte zu verjüngt sich der Lunker trichterförmig, was ebenfalls mit der oben gemachten Überlegung in Einklang steht.

Tafelabb. 84, Taf. XIX, zeigt einen Block von mittelhartem Martinflußeisen, der in eine gußeiserne Form (Kokille) gegossen wurde, vgl. Abb. 443. Der Block ist etwa 1630 mm hoch, oben 430, unten 535 mm dick und von quadratischem Querschnitt mit stark abgerundeten Ecken. Er wurde in der Mittelebene längs durchgeteilt, geschliffen und mit Kupferammoniumchlorid geätzt. Der Lunker ist am Kopf des Blockes stark, wird nach unten zu schwächer, setzt sich aber sehr tief nach dem Fuß zu fort, so daß nur etwa die unteren $\frac{2}{5}$ der Blockhöhe ganz lunkerfrei sind. Der obere Teil des Blockes mit dem starken Lunkerhohlraum

ist für die Weiterverarbeitung zu einem Schmiede- oder Walzstück nicht zu verwenden. Er spleißt beim Schmieden oder Walzen auf und liefert mehr oder weniger verschweißte Nähte, wie in Tafelabb. 86, Taf. XIX, bei *n*. Diese ist die Abbildung eines Trägers von 260 mm Höhe, der aus einem mit Lunker behafteten Block desselben Materials und derselben Art wie in Tafelabb. 84 gewalzt wurde. Der dargestellte Abschnitt entspricht dem Ende, das im Kopf des Blockes gelegen hatte.

Um solche Fehler, wie die Nähte *n*, zu vermeiden, darf man nur den unteren Teil des Blockes verwenden, in dem der Lunker zurücktritt. Der obere Teil mit dem Lunker muß von der Verwendung ausgeschlossen werden.

Der Lunkerhohlraum kann tatsächlich luftleer sein, wenn er nirgends mit der Außenluft in Verbindung steht, und wenn das Metall bei der Erstarrung keine Gase abgibt. Ist der Hohlraum tatsächlich leer, oder ist der Druck in ihm wesentlich geringer, als in der Außenluft, so kann es vorkommen, daß die dünne Decke über ihm von dem äußeren Luftdruck eingedrückt wird.

370. Je größer der Teil des Blockkopfes ist, der wegen seiner Lunker von der Weiterverarbeitung zu Schmiede- oder Walzstücken ausgeschlossen werden muß, um so weniger lohnend wird die Arbeit wegen der Verluste an Löhnen und Metall. Man wird deswegen bestrebt sein, wenn irgend möglich, die Lunkerbildung zu beseitigen, oder wenigstens sie so zu beeinflussen, daß sie nur im obersten Teil des Blockkopfes auftritt, und der übrige Teil des Blockes lunkerfrei bleibt.

Die Mittel dazu ergeben sich aus den Gesetzen der Lunkerbildung. In Abs. 369 wurde gezeigt, daß der Lunker in einem gleichmäßig von allen Seiten abkühlenden Würfel dort ansetzt, wo das Metall zuletzt erstarrt (bei H_2 in Abb. 441), und sich von da aus nach oben erstreckt. Hätten wir ein Mittel, um die im Würfel zuletzt erstarrende Stelle von der Mitte aus nach oben zu rücken, so würde dadurch der vom Lunker durchsetzte Teil des Blockes kleiner.

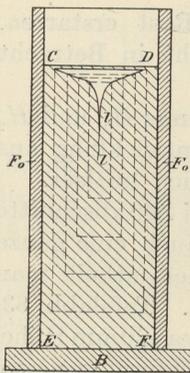


Abb. 442.

In einer eisernen Blockform ist dies dadurch möglich, daß die Abkühlung von der oberen Fläche *CD* her (Abb. 442) verlangsamt wird gegenüber der Abkühlung von den Flächen *CE*, *DF*, *EF*, die mit den eisernen Wänden der Form *F₀* oder mit dem eisernen Boden *B* in Berührung stehen. Die Erstarrung wird dann in den einzelnen Zeitabschnitten so vorschreiten, wie es in Abb. 442 durch die punktierten Linien angegeben ist. Die obere Kruste parallel *CD* wird wegen der dort herrschenden langsamen Abkühlung dünn, die Krusten an den übrigen Abkühlungsflächen sind wesentlich dicker. Das Ende der Erstarrung liegt bei *U*, von da ab erstreckt sich der Lunker trichterförmig nach oben.

Die langsamere Abkühlung der Fläche *CD* geschieht entweder dadurch, daß man sie mit einem schlechten Wärmeleiter (Sand usw.) abdeckt, oder daß man den Block von der Kopffläche *CD* her durch Wärmezufuhr von außen heizt (Verfahren nach Riemer, *L₆ 3*, oder nach Beikirch, *L₆ 4*). Durch dieses Hilfsmittel erreicht man namentlich bei Blöcken für Schmiedestücke, daß man einen wesentlich kleineren Teil des Blockes am Kopfe zu verwerfen braucht, als wenn die Blöcke in der gewöhnlichen Weise zur Erstarrung gebracht werden.

Ein anderes Mittel, die Lunkerbildung zu vermindern oder ganz zu unterdrücken, besteht darin, daß man das Material während der Erstarrung in dem Maße von außen zusammendrückt, als sich die Hohlräume im Innern bilden wollen.

Als zweckentsprechend hat sich hierbei das Harmetsche Verfahren erwiesen. (Harmet, *L₆ 5*; Wiecke, *L₆ 6*; Osann, *L₆ 7*; E. Heyn und O. Bauer, *L₆ 8*).

Das Flußeisen wird in eine mit Reifen verstärkte, nach oben hin verjüngte eiserne Kokille 1 eingegossen, s. Abb. 443. Der bewegliche eiserne Boden 2 der Kokille ruht auf einem Stempel 3, der in dem Wagen 4 geführt ist. Nach dem Guß wird der Wagen 4 mit der darauf befindlichen Kokille unter die Presse in die in Abb. 443 gezeichnete Stellung gefahren. In dieser vermag ein Plunger 5 unter Vermittlung des Zwischenstücks 6, des Stempels 3 und des Bodens 2 von unten her auf das in der Kokille erstarrte Eisen einen Druck auszuüben. Dadurch wird der außen erstarrte Block in dem Maße, wie die Erstarrung weiterschreitet, in die sich nach oben verjüngende Kokille eingedrückt. Durch einen hydraulisch betätigten Gegenstempel 7 wird ein Gegendruck von oben her auf den Block ausgeübt, der wesentlich geringer ist als der Andruck, den der Boden 2 erfährt. Die Folge ist, daß der Block in dem Grade, wie er weiter nach oben in die Kokille eintritt, Seitendruck erhält. Dieser und der axiale Druck bewirken Schließung der Lunkerhohlräume. Während des ganzen Preßvorgangs wird die Kokille von außen mit Wasser berieselt, damit sie kühl erhalten bleibt.

Zur Erzeugung fehlerfreier Blöcke ist es nötig, den Hub des Plungers 5 je nach Größe des Blockes und der Art des vergossenen Eisens in einer durch Erfahrung festgestellten Weise zu regeln.

Die mittels des Preßverfahrens erzielbare Wirkung ergibt sich aus dem Vergleich der Tafelabb. 84 und 85, Taf. XIX. Blöcke von mittelhartem Martinflußeisen in nahezu gleichem Gewicht wurden aus derselben Pflanze in Kokillen gleicher Abmessungen nach Art der in Abb. 443 gezeichneten gegossen. Der in Tafelabb. 84 dargestellte Block wurde nicht gepreßt, während der Block Tafelabb. 85 in der oben beschriebenen Weise gepreßt wurde. Die Blöcke wurden genau in der Mittelebene längs durchgeschnitten.

Man sieht, daß die Lunkerbildung durch das Preßverfahren völlig beseitigt ist.

371. Bei manchen Legierungen, wie z. B. bei den Kupfer-Zinn-Legierungen (Bronzen), bei deren Erstarrung sich zunächst tannenbaumförmige Kristalle bilden, zwischen deren Maschen sich der flüssige Rest wie in den Hohlräumen eines Schwammes befindet (s. Tafelabb. 39, Taf. VIII), kann bei genügend langsamer Abkühlung an Stelle des Lunkers eine schwammige, poröse Stelle entstehen. Dies erklärt sich wie folgt. Die Erstarrung sei so weit vorgeschritten, daß nur noch der Hohlraum *H* in Abb. 444 übrig ist. Der darin befindliche Flüssigkeitsrest kann den Hohlraum nicht ausfüllen; er hat das Bestreben, sich in seinem unteren Teile anzusammeln und oberhalb des Flüssigkeitsspiegels einen großen Lunker zu bilden, wie in Abb. 444 angedeutet. Diesem Bestreben kann der flüssige Rest aber nicht folgen, weil die Erstarrung so vor sich geht, daß wie in Abb. 445 von der erstarrten Kruste aus die Tannenbaumkristalle in den Hohlraum vorschießen, und zwischen ihren Maschen den flüssigen Rest wie ein Schwamm festhalten, so daß er sich in dem ganzen Hohlraum *H* nahezu gleichmäßig verteilt. Nach Erstarrung dieses letzten flüssigen Restes fehlt es nun an Material, um den Hohlraum *H* ganz auszufüllen. Zwischen den Maschen der Tannenbaumkristalle entstehen somit gleichmäßig im

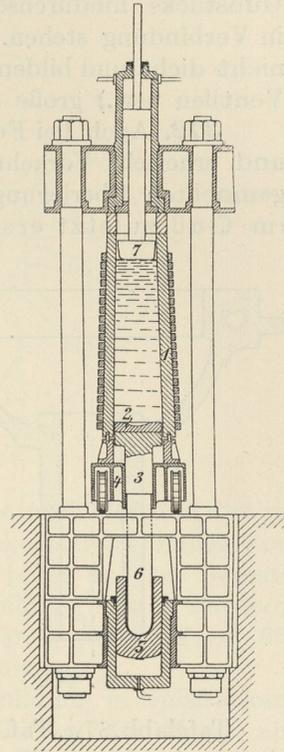


Abb. 443.
Harmetpresse.

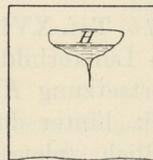


Abb. 444.

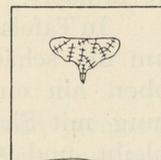


Abb. 445.

Raum *H* verteilte kleine Hohlräume. Statt eines großen Lunkers hat sich eine Stelle mit außerordentlich vielen kleinen, feinverteilten Lunkern gebildet.

Solche Erscheinungen finden sich nicht nur bei Bronze, sondern auch bei einer ganzen Anzahl anderer Legierungen, z. B. auch beim Gußeisen.

Unter Umständen kann sich die Porosität durch die ganze Wandstärke des Gußstücks hindurchsetzen, so daß die vielen kleinen Lunker mit der Außenluft in Verbindung stehen. Solche Gußstücke sind dann gegen Wasser- und Gasdruck nicht dicht und bilden bei der Herstellung von druckdichten Hohlgüssen (Zylindern, Ventilen usw.) große Schwierigkeiten.

372. Auch bei Formgüssen macht sich die Lunkerbildung störend bemerkbar und erheischt Vorkehrungen zu ihrer Beseitigung. Entsprechend den in Abs. 369 gemachten Überlegungen bildet sich der Lunker immer an der Stelle, die im Guß zuletzt erstarrt. Da an Stellen, wo sich Materialanhäufungen im Guß

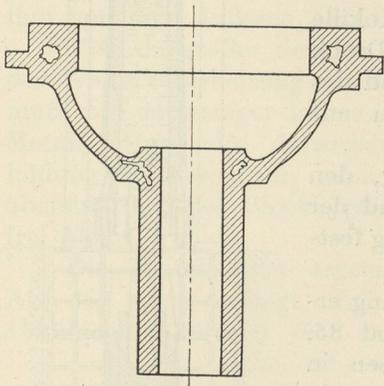


Abb. 446.

befinden, die Abkühlung langsamer vor sich geht, als an Stellen mit geringerer Wandstärke, so wird auch an diesen Massenanhäufungen noch flüssiges Metall vorhanden sein, während die übrigen dünneren Teile bereits erstarrt sind. An diesen zuletzt erstarrenden Stellen werden sich dann die Lunker bilden. Sie sind in solchen Fällen besonders ausgeprägt, weil die angrenzenden dünneren Gußteile ihren Lunkerhohlraum durch flüssiges Metall aus den noch flüssigen Stellen der Materialanhäufungen auszufüllen bestrebt sind. Sie saugen flüssiges Material von dort ab. Abb. 446, die einen Längsschnitt durch ein kleines Gußstück aus weißem Roheisen zur Tempergußzeugung darstellt, läßt die Lunker an den verdickten Stellen erkennen.

Tafelabb. 87 *a*, Taf. XVIII, zeigt in etwa 0,21facher Vergrößerung den Längsschnitt durch eine kleine Platte mit zwei Rippen aus Stahlguß. Die Stellen langsamster Abkühlung liegen dort, wo sich die Mittellinien der Rippen und der Platte innerhalb der Schnittfläche schneiden. Dort wird sich auch der Schwindhohlraum bilden, wie dies die Tafelabbildung erkennen läßt. Bei der linken Rippe hat der Luftdruck es vermocht, die dünne erstarrte Kruste in der einspringenden Kante durchzubrechen, so daß der Lunker dort mit der Außenluft in Verbindung steht. (In Tafelabb. 87 *a* durch Pfeil angedeutet.) Dies ist besonders gefährlich, weil die Materialstärke am Übergang zwischen Platte und Rippe stark geschwächt ist, und weil außerdem die Kerbwirkung des durch den Lunker hervorgebrachten einspringenden Winkels die Widerstandsfähigkeit des Konstruktionsteils erheblich vermindert.

In Tafelabb. 87 *b*, Taf. XVIII, ist gezeigt, wie das Gußstück gegossen werden muß, um die schädliche Lunkerbildung zu beseitigen. Man gibt dem Gußstück nach oben hin eine Fortsetzung *K*, deren Masse so groß ist, daß sie in der Abkühlung mit Sicherheit hinter der sämtlicher übrigen Teile des Gußstückes zurückbleibt und schließlich zuletzt erstarrt. Der Lunker wird sich dann in dieser Fortsetzung bilden, wie es die Tafelabbildung zeigt, während das eigentliche Gußstück lunkerfrei bleibt. Man bezeichnet eine solche Fortsetzung des Gußstücks als verlorenen Kopf. Er wird nach Erkalten des Gusses abgeschnitten.

Ein verllorener Kopf vermag nur dann seine Wirkung auszuüben, wenn in dem Verbindungskanal zwischen Gußstück und Kopf das Gußmaterial nicht früher erstarrt, als das Gußstück selbst. Würde man beispielsweise den Kopf in der in Abb. 447 skizzierten Weise anbringen, so würde der Zuflußkanal *w* durch er-

starrtes Metall bereits zu einer Zeit verstopft sein, wo die mit 1 bezeichneten Stellen des Gusses noch flüssig sind. Die Folge davon wäre, daß das noch flüssige Material im Kopf durch w nicht zu den Stellen 1 hinabfließen und so die Lunker bei 1 ausfüllen kann, und daß sich sowohl bei 1 im Guß, wie auch bei 2 im Kopf voneinander getrennte Lunker bilden. Der Kopf K ist dann ganz nutzlos gewesen.

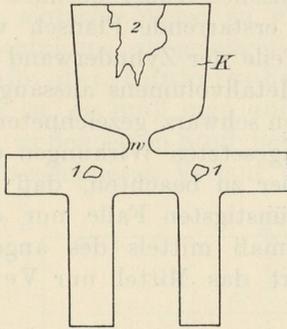


Abb. 447.

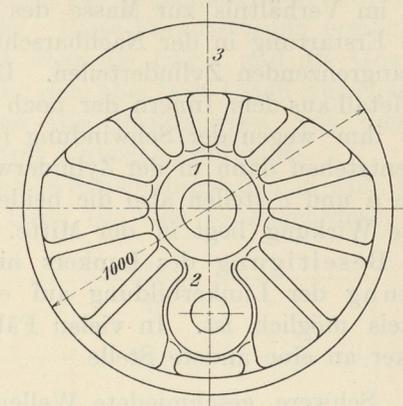


Abb. 448.

Als Beispiel für die Verwendung verloreener Köpfe diene noch der Guß des in Abb. 448 und in Tafelabb. 88, Taf. XVIII, dargestellten Lokomotivtreibrades aus Stahlguß. An der Nabe 1, an dem Angriffspunkt der Kurbel 2 und am Gegengewicht 3 liegen starke Massenanhäufungen, die zu Lunkerbildung führen würden, wenn nicht an diesen Stellen verlorene Köpfe aufgesetzt wären, wie Tafelabb. 88 erkennen läßt. Die Köpfe 1 und 2 sind miteinander verbunden.

Für den Konstrukteur ist die Kenntnis von der Lunkerbildung in Gußstücken von höchster Bedeutung. Vielfach glaubt er durch Anhäufung der Masse an stark beanspruchten Stellen eines Gußstückes die Widerstandsfähigkeit desselben zu vergrößern und kann trotzdem wegen der Lunkerbildung gerade das Gegenteil erreichen, namentlich dann, wenn die verstärkten Stellen so liegen, daß ihnen mit verlorenen Köpfen nicht beizukommen ist.

Zuweilen bedient man sich auch noch eines anderen Hilfsmittels, um Lunkerbildungen und schwammigen Stellen in Gußstücken entgegenzuarbeiten. Die Abb. 449a bis c zeigen ein und dasselbe Gußstück (Teil eines Zylinders mit an-

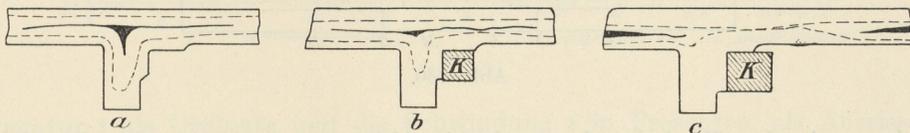


Abb. 449.

gegossenem Flansch). Wird das Stück in gewöhnlicher Weise in Sand geformt, so geht die Abkühlung so vor sich, wie in Abb. 449a angedeutet. Die einzelnen Linien zeigen das Vordringen der Erstarrung von der Oberfläche her an; sie sind Linien gleicher Temperatur (Isothermen). Der Lunker, bzw. die schwammige Stelle wird sich an der schwarz gezeichneten Stelle einfinden. Wird aber bei K ein eiserner Ring (Kokille oder Schreckplatte) in die Sandform eingelegt, so wird die Abkühlung in der nächsten Umgebung von K schneller vor sich gehen. Die von außen nach innen vordringende erstarrte Kruste wird in der Umgebung von K wesentlich dicker, wie aus dem Vergleich zwischen Abb. 449a und b hervor-

geht. Die Erstarrung wird schließlich sowohl im Zylinder wie im Flansch zu gleicher Zeit beendet sein. Dadurch wird wenigstens verhindert, daß die dünneren Teile der Zylinderwandung das flüssige Metall aus dem Flansch herausaugen können. Die Lunkerbildung wird auf das geringste Maß beschränkt, aber nicht ganz aufgehoben. Das Mittel ist deshalb besonders bei grauem Gußeisen wirksam, welches an und für sich weniger lunkert. Ist aber die Masse der Schreckplatte *K* im Verhältnis zur Masse des Flansches zu groß, wie in Abb. 449c, so kann die Erstarrung in der Nachbarschaft des Flansches früher beendet sein, als in den angrenzenden Zylinderteilen. Der früher erstarrende Flansch wird das flüssige Metall aus dem Innern der noch flüssigen Teile der Zylinderwand zum Ersatz des ihm wegen der Schwindung fehlenden Metallvolumens aussaugen. Die Lunker entstehen dann in der Zylinderwand an den schwarz gezeichneten Stellen. Die Fälle *a* und *c* stellen also die beiden entgegengesetzten Wirkungen dar. Die günstigste Wirkung liegt in der Mitte. Es ist aber zu beachten, daß eine tatsächliche Beseitigung des Lunkers nicht, im günstigsten Falle nur eine Beschränkung der Lunkerbildung auf ein Mindestmaß mittels des angegebenen Hilfsmittels möglich ist. In vielen Fällen bewirkt das Mittel nur Verlegung der Lunker an eine andere Stelle.

373. Schwere geschmiedete Wellen aus Flußstahl werden vielfach ausgebohrt, um die Sicherheit zu haben, daß von der Lunkerbildung und von der Seigerung herrührende Fehlstellen in dem geschmiedeten Gebrauchsstück nicht mehr vorhanden sind. Die Ausbohrung gestattet außerdem noch eine Kontrolle, ob noch bemerkenswerte Fehlstellen trotz des Ausbohrens des Kerns zurückgeblieben sind, da man bei geeigneter Beleuchtung auf der Wandung der Bohrung die Fehlstellen erkennen kann. Gleichzeitig wird durch die Bohrung das Gewicht der Welle verringert, was namentlich für Schiffswellen von Bedeutung ist.

Man muß sich über den Vorgang beim Schmieden der Werkstücke klar sein, wenn man beurteilen will, ob durch die Ausbohrung auch tatsächlich die Materialteile mit den größten Fehlstellen (von Lunkerung und Seigerung herrührend) beseitigt sind. So kann z. B. bei aus dem Vollen geschmiedeten Kurbelwellen die

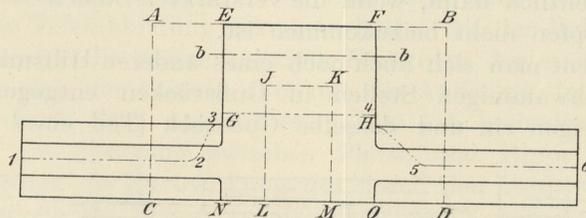


Abb. 450.

Ausbohrung in den Kurbelzapfen nach *bb*, Abb. 450, den genannten Zweck nicht erfüllen. Die Mittelachse des Blockes, längs der die Lunker und Seigerungen zu erwarten sind, falls solche überhaupt im Material vorkommen, nimmt in der geschmiedeten Kurbel die Lage 1 2 3 4 5 6 ein. Die Kurbel wird aus dem Blockteil *ABCD*, der auf rechteckigen Querschnitt vorgeschmiedet ist, dadurch hergestellt, daß längs *EG* und *FH* das Material bei Schmiedewärme eingehauen wird, so daß Trennung nach den Linien *EG* und *FH* entsteht. Die Teile *AENC* und *FBDO* werden dann gestreckt und achtkantig ausgeschmiedet, wie in der Abb. 450 durch die ausgezogenen Linien angedeutet ist. Die übrige Bearbeitung erfolgt dann mittels schneidender Werkzeuge, die den Teil *JKML* herausnehmen, die Wellenenden und den Kurbelzapfen rund drehen usw.

Ist die Zone der Fehlstellen längs der Linie 123456 kräftig ausgeprägt, und fallen die einspringenden Kanten G, J, K, H gerade in diese Zone, so liegt der Fall besonders ungünstig, weil dann durch die Fehlstellen die Kerbzähigkeit des Materials gerade an den Stellen vermindert wird, wo sich die Kerbwirkung an den einspringenden Kanten geltend macht (E. Heyn, L_6 9). Vgl. Abs. 339 bis 348.

374. In Abs. 369 wurde die durch Abb. 440 gekennzeichnete Voraussetzung über den Verlauf der Schwindlinie gemacht. Diese Voraussetzung ermöglichte es, auf eine einfache Weise zu einem Urteil über die Lage und die Gestalt der Lunkerhohlräume zu gelangen. Will man sich aber ein Urteil verschaffen über die Größe der Lunkerhohlräume und die Bedingungen, von denen diese abhängig ist, so muß man auf allgemeinerer Unterlage aufbauen.

Wir wollen einen Stoff betrachten, dessen Schwindlinie den in Abb. 451b mit $ABCD$ bezeichneten Verlauf hat. Die Linie ist hier so angeordnet, daß die

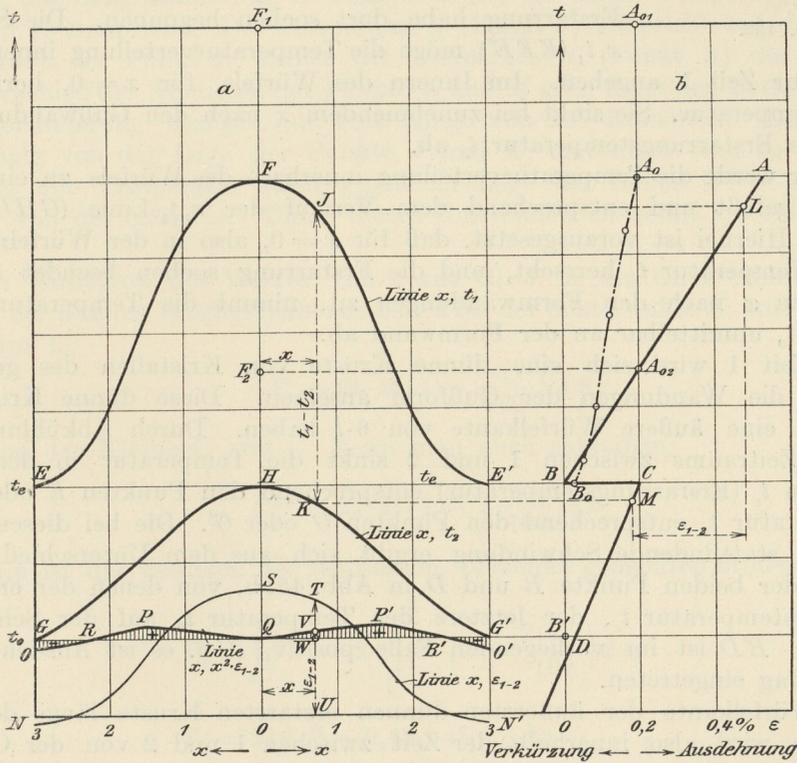


Abb. 451.

Temperatur t als Ordinate und die Schwindung ϵ in Prozenten als Abszisse verwendet ist. Der Zweig AB der Schwindlinie entspricht der Schwindung des flüssigen, der Zweig CD der des festen Stoffes. Die Strecke BC entspricht einer Ausdehnung des Stoffes beim Übergang aus dem flüssigen in den festen Zustand. Dieser Fall ist zunächst gewählt, weil es nicht von vornherein einleuchtet, warum auch bei Stoffen, die unter Volumvermehrung erstarren, Lunkern eintreten kann.

Die Abb. 451a gibt ein Bild von der angenommenen Verteilung der Temperatur innerhalb des gegossenen Stoffes, der sich in einer Gußform befindet, welche ihn zwingt, einen würfelförmigen Raum von $6 \cdot l$ Seitenlänge einzunehmen. Die Wärmeentziehung erfolgt von den Wänden der Gußform aus, so daß einige Zeit nach dem Guß die Temperatur des flüssigen Stoffes längs der Formwand niedriger

sein wird als im Innern des Würfels. Die Punkte gleicher Temperatur im gegossenen Stoff liegen, wenn gleichmäßige Abkühlungsgeschwindigkeit senkrecht zu den Wandungen der Gußform vorausgesetzt wird, sämtlich auf Oberflächen von Würfeln (Isothermen), deren Flächen den Wänden der Gußform parallel sind und von der Würfelmitte den Abstand x haben, vgl. Abb. 452. Die in diesen Iso-

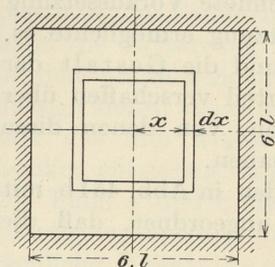


Abb. 452.

thermen herrschenden Temperaturen sind in Abb. 451a als Ordinaten zu den Werten von x als Abszissen eingetragen. Die Abszisse Null entspricht der Würfelmitte, die Abszisse 3 der Oberfläche der Gußform.

Zu einer Zeit 1 werde die Zufuhr flüssigen Stoffes zur Gußform abgeschnitten; der Hohlraum der Gußform sei dann gerade mit dem flüssigen Stoff vollständig ausgefüllt. Die Temperatur längs der Formwandung sei gerade gleich der Erstarrungstemperatur t_e des gegossenen Stoffes; die Erstarrung habe dort soeben begonnen. Die Schaulinie $x, t_1 (EFE')$ möge die Temperaturverteilung innerhalb des

Würfels zur Zeit 1 angeben. Im Innern des Würfels, für $x=0$, herrscht die höchste Temperatur. Sie sinkt bei zunehmendem x nach den Gußwandungen hin bis auf die Erstarrungstemperatur t_e ab.

Ferner werde die Temperaturverteilung innerhalb des Würfels zu einer Zeit 2 ins Auge gefaßt und entsprechend dem Verlauf der x, t_2 -Linie (GHG') angenommen. Hierbei ist vorausgesetzt, daß für $x=0$, also in der Würfelmitte, gerade die Temperatur t_e herrscht, und die Erstarrung soeben beendet sei. Mit wachsendem x nach den Formwandungen zu, nimmt die Temperatur bis auf den Wert t_0 unmittelbar an der Formwand ab.

Zur Zeit 1 wird sich eine dünne Kruste von Kristallen des gegossenen Stoffes an die Wandungen der Gußform ansetzen. Diese dünne Kruste wird zur Zeit 1 eine äußere Würfelkante von $6 \cdot l$ haben. Durch Abkühlung innerhalb des Zeitraums zwischen 1 und 2 sinkt die Temperatur in der dünnen Kruste von t_e (Erstarrungstemperatur) entsprechend den Punkten E oder E' auf die Temperatur t_0 entsprechend den Punkten G oder G' . Die bei diesem Temperaturabfall stattfindende Schwindung ergibt sich aus dem Unterschied $B'D$ der Abszissen der beiden Punkte B und D in Abb. 451b, von denen der erstere der Erstarrungstemperatur t_e , der letztere der Temperatur t_0 auf der Schwindlinie entspricht. $B'D$ ist im vorliegenden Falle positiv, d. h. es ist Ausdehnung um diesen Betrag eingetreten.

Die Würfelkante der äußersten dünnen erstarrten Kruste längs der Formwandungen wird also innerhalb der Zeit zwischen 1 und 2 von der Größe $6 \cdot l$ verlängert auf den Betrag $6l \left(1 + \frac{B'D}{100}\right)$. Das Volumen V_a des von der Kruste eingeschlossenen Raumes ist dann $6^3 \cdot l^3 \left(1 + \frac{B'D}{100}\right)^3$ oder angenähert

$$V_a = 6^3 \cdot l^3 \left(1 + 3 \frac{B'D}{100}\right) \dots \dots \dots (1)$$

Es ist nun zu untersuchen, ob der von dieser Kruste eingeschlossene Raum V_a auch tatsächlich von der Masse des erstarrten Stoffes zur Zeit 2 ausgefüllt werden kann oder nicht. Bezeichnet man das lückenlos gedachte Volumen des erstarrten Stoffes zur Zeit 2 mit V_b , so wird für $V_a > V_b$ Lunkerung eintreten. Für $V_a \leq V_b$ ist dagegen Bildung von Lunkerhöhlräumen unmöglich.

Das Volumen V_b kann man auf folgende Weise berechnen, wobei vorausgesetzt ist, daß die einzelnen Teile des erstarrenden Stoffes sich innerhalb des Zeit-

raumes 1 bis 2 gegenseitig in ihrer Schwindung nicht stören, sondern daß jedes Teilchen den Raum einnimmt, der ihm bei freier ungestörter Schwindung zukommt.

Es werde zunächst eine Würfelschale von der unendlich kleinen Dicke dx betrachtet (Abb. 452), deren Flächen von der Würfelmitte den Abstand x haben. Das Volumen dV dieser dünnen Würfelschale zur Zeit 1, also bei der Temperatur t_1 (Punkt J in Abb. 451), ist dann

$$dV = 24 \cdot x^2 \cdot dx \dots \dots \dots (2)$$

Bei der Abkühlung von t_1 auf t_2 (entsprechend der Strecke $t_1 - t_2 = JK$) ändert sich die Größe x um in

$$x \left(1 - \frac{\epsilon_{1,2}}{100} \right) \dots \dots \dots (3)$$

wobei $\epsilon_{1,2}$ die Längenänderung in Prozenten ist, die einem Temperaturabfall von t_1 auf t_2 entspricht. Der Temperatur t_1 (Punkt J) entspricht auf der ϵ, t -Linie in Abb. 451b der Punkt L , ferner der Temperatur t_2 (Punkt K) der Punkt M . Der Unterschied der Abszissen der Punkte L und M gibt dann den Betrag $\epsilon_{1,2}$, d. h. die Längenänderung bezogen auf eine Länge von 100 Einheiten. Der Wert $\epsilon_{1,2}$ ist abhängig von der Lage der Punkte J und K , und diese sind bei gegebener Verteilung der Temperatur (also gegebener Lage der Linien EFE' und GHG') abhängig von der Größe x . Unter diesen Umständen ist somit $\epsilon_{1,2}$ eine Funktion von x .

Nach Einsetzen des Wertes von x aus Gl. 3 in die Gl. 2 erhält man das Volumen der dünnen Würfelschale zur Zeit 2 bei der dem Punkte K entsprechenden Temperatur t_2 :

$$dV' = 24 \cdot x^2 \left(1 - \frac{\epsilon_{1,2}}{100} \right)^2 dx.$$

Wegen der Kleinheit von $\epsilon_{1,2}$ kann man auch schreiben:

$$dV' = 24 \cdot x^2 \left(1 - 2 \cdot \frac{\epsilon_{1,2}}{100} \right) dx \dots \dots \dots (4)$$

Mithin ist das Volumen des gegossenen, lückenlos gedachten Stoffes zur Zeit 2:

$$V_b = \int dV' = 24 \int_0^{3l} x^2 \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot \epsilon_{1,2}}{100} \right) dx, \\ V_b = 216 \cdot l^3 - 0,48 \int_0^{3l} x^2 \cdot \epsilon_{1,2} dx \dots \dots \dots (5)$$

Der Lunkerhohlraum wird dann

$$V_l = V_a - V_b = 216 l^3 + 6,48 \cdot l^3 \cdot B'D - 216 l^3 + 0,48 \int_0^{3l} x^2 \cdot \epsilon_{1,2} dx \\ V_l = 6,48 \cdot l^3 \cdot B'D + 0,48 \int_0^{3l} x^2 \cdot \epsilon_{1,2} dx \dots \dots \dots (6)$$

Um sich ein Bild von der Größe V_l zu machen, wird man zunächst die Werte $\epsilon_{1,2}$ als Funktion von x aufzeichnen, indem man für einige x die zugehörigen Werte von $\epsilon_{1,2}$ aus der Schwindlinie $ABCD$ abgreift und als Ordinaten zu den zugehörigen Abszissen x verwendet. Die erhaltenen Punkte verbindet man durch eine Kurve NSN' in Abb. 451a. Verkürzungen sind hierbei von der Abszissenachse nach oben, Verlängerungen nach unten abgetragen. Alsdann bildet man für verschiedene Werte von x die Produkte $x^2 \cdot \epsilon_{1,2}$ und erhält unter Verwendung dieser Werte als Ordinaten zu den Abszissen x die $x, x^2 \cdot \epsilon_{1,2}$ -Linie

$OPQP'O'$. Die von dieser Linie und der Wagerechten GG' eingeschlossene Fläche (positiv, wenn oberhalb GG' , negativ, wenn darunter) gibt dann den Wert

$$2 \int_0^{3l} x^2 \cdot \varepsilon_{1,2} dx.$$

In dem besonderen Falle der Abb. 451 ist diese Fläche

$$RPQ + R'P'Q - GOR - G'O'R'$$

größer als Null; da $B'D$ im besonderen Fall auch positiv ist, so ist nach Gl. 6 die Größe V_l größer als Null.

Das heißt, daß unter den angenommenen Verhältnissen die Bildung eines Lunkers möglich ist, obwohl der Stoff sich bei der Erstarrung ausdehnt.

375. Um übersehen zu können, in welchen Fällen Lunkerbildung eintreten kann und in welchen nicht, muß man sich vergegenwärtigen, daß die Funktion $\varepsilon_{1,2}$ veränderlich ist mit der Gestalt der die Temperaturverteilung zu Beginn und zu Ende der Erstarrung angehenden Linien EFE' und GHG' und weiterhin abhängt von dem Verlauf der Schwindungslinie $ABCD$ (Abb. 451). Man denke sich den Teil AB der Schwindungslinie für den flüssigen Stoff so verlegt, daß für jedes x bei der angenommenen Temperaturverteilung innerhalb der gegossenen Masse der Betrag $\varepsilon_{1,2} = 0$ wird, daß also die einem und demselben x entsprechenden Punkte, z. B. L und M , senkrecht übereinander zu liegen kommen. Man erhält dann die Linie A_0B_0 in Abb. 451b.

Würde die Schwindung des flüssigen Stoffes nach dieser Linie A_0B_0 verlaufen, während im übrigen die Schwindung nach B_0C während der Erstarrung und nach CD unterhalb der Erstarrung vor sich geht, so würden in Gl. 6 sämtliche $\varepsilon_{1,2}$ gleich Null werden. Auch $B'D$ würde Null werden, weil ja $B'D$ weiter nichts ist als der Wert $\varepsilon_{1,2}$ für $x = 3 \cdot l$. Damit würde V_l ebenfalls den Wert Null annehmen. Das bedeutet, daß Lunkerbildung in dem besonderen Falle unmöglich ist.

Liegt AB vorwiegend rechts von A_0B_0 , so werden die Ordinaten der Linie $x, \varepsilon_{1,2}$ (Linie NSN') in Abb. 451a vorwiegend positiv (oberhalb der Abszissenachse liegend); damit werden aber auch die schraffierten Flächenteile zwischen der Linie $OPQP'O'$ und GG' vorwiegend positiv (oberhalb GG' gelegen), und damit ist die Möglichkeit zu Lunkerbildung gegeben, die um so stärker wird, je mehr AB von A_0B_0 aus nach rechts liegt.

Liegt umgekehrt AB vorwiegend links von A_0B_0 oder fällt es mit A_0B_0 zusammen, so wird V_l negativ oder gleich Null, was bedeutet, daß Lunker nicht entstehen können.

Es ist sonach erwiesen, daß auch bei Stoffen, die sich während der Erstarrung ausdehnen, Lunkerbildung möglich ist, wenn die obengenannten Bedingungen erfüllt sind.

Denkt man sich den Punkt F der Temperaturverteilungslinie EFE' höher, z. B. nach F_1 gerückt, also die Ungleichmäßigkeit in der Temperaturverteilung zu Beginn der Erstarrung stärker ausgeprägt als bei dem Verlauf EFE' , so wird der Punkt A_0 der Grenzlinie A_0B_0 ebenfalls weiter nach oben rücken, und zwar nach $A_{0,1}$. Die Lage von B_0 bleibt unverändert, weil ja die Punkte EE' und GG' in ihrer alten Lage verbleiben. Dadurch dreht sich die Grenzlinie $A_{0,1}B_0$ um den Punkt B_0 nach links. Das heißt, bei einem bestimmten Stoff, dessen Schwindungslinie durch $ABCD$ in Abb. 451b gegeben ist, wird der Abstand der beiden Linien AB und $A_{0,1}B_0$ größer. Es besteht sonach die Möglichkeit zur Bildung größerer Lunker.

Die Lunkerbildung wird mithin begünstigt, wenn zu Beginn der Erstarrung der Unterschied zwischen der Temperatur in der Mitte und an den Wandungen der Gußform sehr groß ist. Dieser Unterschied wird um so ausgeprägter, je rascher dem gegossenen Stoff die Wärme von den Wandungen der Gußform entzogen wird, und je größer gleichzeitig die Masse des Gusses ist.

Bei einem und demselben Stoffe und bei gleicher Masse des Gusses wird so nach bei gleicher Gießhitze das Volumen der Lunkerhohlräume größer werden können bei Guß in Kokille (Metallform), als bei Guß in weniger schnell die Wärme ableitenden Stoffen, wie z. B. Formsand, Masse usw. Durch Vorwärmen der Formwandungen kann man in diesem Falle der Lunkerbildung entgegenwirken.

Bei dem in Abb. 451 gezeichneten Falle würde z. B. die Lunkerbildung aufhören, wenn zu Beginn der Erstarrung die Linie der Temperaturverteilung statt nach EFE' nach EF_2E' verlief. Dem Punkte F_2 entspricht der Punkt $A_{0,2}$ der Grenzlinie $B_0A_{0,2}$, der senkrecht über C liegen muß. Die Grenzlinie $B_0A_{0,2}$ fällt nun fast zusammen mit der Schwindungslinie AB , was nach obigem Unmöglichkeit der Lunkerbildung bedeutet.

Bei Stoffen, die während der Erstarrung Volumverminderung durchmachen, hat die Schwindungslinie ungefähr den Verlauf wie in Abb. 453. Der Punkt A_0 der Grenzlinie A_0B_0 muß dann auf jeden Fall in die gestrichelte Senkrechte über C und der Punkt B_0 links von dieser gestrichelten Linie fallen, gleichgültig welches die Gestalt der Linien EFE' und GHG' für die Temperaturverteilung im Guß ist. Die Linie AB liegt somit immer rechts von der Grenzlinie A_0B_0 , und es ist folglich immer die Möglichkeit zur Lunkerbildung vorhanden. Nur wenn die Linie EFE' in Abb. 451a mit der Wagerechten EE' zusammenfällt, wenn also im Augenblick des Beginns der Erstarrung die Temperatur des gegossenen Stoffes durchweg gleich ist, kann Lunkerbildung nicht vorkommen, weil sich dann die ersten Kristalle nicht notwendigerweise an der Formwand, sondern irgendwo an einem oder an mehreren Kristallkeimen innerhalb der Gußmasse ansetzen und von da aus weiter wachsen. Es bildet sich dann keine äußere erstarrte Kruste, und der Stoff nimmt sein natürliches Volumen ein.

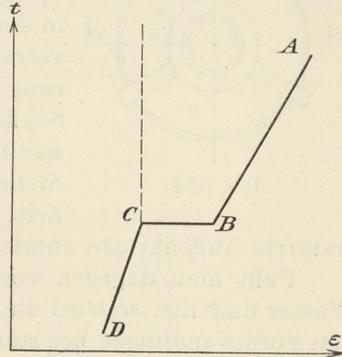


Abb. 453.

Allgemein können wir also sagen:

Bei Stoffen, die sich während der Erstarrung zusammenziehen, tritt im allgemeinen Lunkerbildung ein, wenn während der Erstarrung kein flüssiges Metall (z. B. aus verlorenen Köpfen) nachgesaugt werden kann. Je größer zu Beginn der Erstarrung der Unterschied der Temperatur zwischen Gußmitte und dem gegossenen Stoff an den Formwandungen ist, um so größer ist die Lunkerbildung. Nur wenn zu Beginn der Erstarrung die Temperatur in der Gußmasse nahezu gleich ist, bleibt die Lunkerbildung aus.

Dafür, welcher wesentlichen Einfluß der Unterschied zwischen der Temperatur des gegossenen Stoffes im Innern und an den Formwänden zu Beginn der Erstarrung auf die Lunkerbildung ausübt, möge folgendes Beispiel angeführt werden.

Die Gußform hatte die in Abb. 454 abgebildete Gestalt; a ist eine schmiedeeiserne Form, b ein Gefäß aus Eisenblech. Der Hohlraum c kann mit einer Flüssigkeit gefüllt werden. Das flüssige Metall, in diesem Falle Lagerweißmetall mit 83,5% Zinn, 11% Antimon, 5,5% Kupfer, wird in die Gußform a gegossen.

Im Hohlraum c befindet sich Öl von 300 C° . Die Legierung erstarrt zwischen 366 und 238 C° ; bei 366 C° scheiden sich aus der Legierung geringe Mengen von kupferreichen Kristallnadeln aus; bei $263,5\text{ C}^\circ$ beginnt die Ausscheidung von antimonreichen Würfeln, und bei 238 C° erstarrt die Hauptmenge der Legierung. Die Temperatur zwischen der eingegossenen flüssigen Legierung und der vorgewärmten

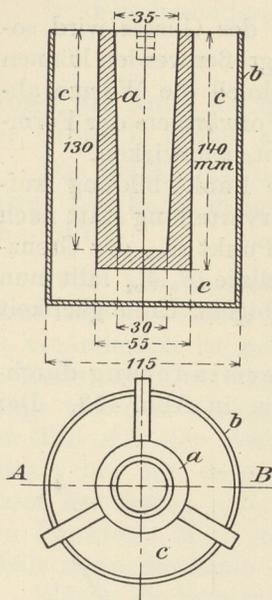


Abb. 454.

Gußform gleicht sich aus; hierbei scheiden sich zwar bei 366 C° die kupferreichen Nadeln ab; ihre Menge ist aber zu gering, als daß sie eine erstarrte Außenkruste bilden könnten; sie schwimmen vielmehr gleichmäßig verteilt in der flüssigen Legierung herum. Inzwischen hat sich die Temperatur der Gußform und die der Legierung ausgeglichen. Beide kühlen sehr langsam ab, da die Wärmeabgabe nach außen durch das die Wärme schlecht leitende Öl hindurch geschehen muß. Bei $263,5\text{ C}^\circ$ scheiden sich deshalb die würfelförmigen antimonreichen Mischkristalle nicht an der Formwand, sondern innerhalb der Legierung an beliebigen Stellen ab und steigen in dem flüssigen Legierungsrest nach oben. Der Spiegel der Flüssigkeit sinkt in dem Maße, als die Volumverminderung durch Erstarrung der Kristalle eintritt. Schließlich erstarrt der flüssige Rest bei 238 C° an allen Stellen nahezu zu gleicher Zeit, so daß wiederum keine

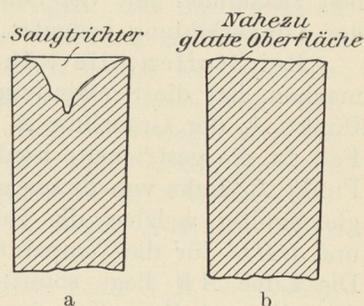


Abb. 455.

erstarrte Außenkruste entstehen kann. Der Guß ist lunkerfrei, wie Abb. 455 b zeigt.

Füllt man dagegen vor dem Guß den Hohlraum c mit einem Gemisch von Wasser und Eis, so wird die in die Gußform a (Abb. 454) eingegossene Legierung von den Formwandungen her stark gekühlt. Es bildet sich an den Formwänden sofort eine erstarrte Kruste, und es muß nun, ähnlich wie in Abb. 441, Lunkerbildung eintreten. Da aber hier die Wärmezuhziehung von der mit der Luft in Berührung stehenden Oberfläche der Legierung her viel langsamer ist, als von den Gußwandungen her, so rückt nach früherem der Lunker nach oben und bildet am Kopf des Blockchens einen Saugtrichter, wie in Abb. 455 a. Ähnliche Beobachtungen kann man auch an Legierungen von Blei, Antimon und Zinn anstellen (E. Heyn und O. Bauer, *L₆ 10*).

C. Ermittlung der Schwindungslinien und des Schwindmaßes.

376. Wie aus dem obigen hervorgeht, bietet die Kenntnis des Verlaufs der Schwindungslinie t, ϵ eines metallischen Stoffes wesentlichen Anhalt zur Beurteilung seines Verhaltens gegenüber dem Lunkern. Man hat deswegen mehrfach versucht, den Verlauf dieser Linien festzustellen. Besonders wichtig für die Frage des Lunkerns ist die möglichst fehlerfreie Feststellung des Teils der Kurve vor, während und unmittelbar nach der Erstarrung¹⁾. Zum mindesten muß die Schwindlinie mit Sicherheit erkennen lassen, ob während der Erstarrung Volumvermehrung

¹⁾ Das Gesamtschwindmaß, also die Gesamtschwindung von Beginn der Erstarrung bis zu gewöhnlicher Temperatur ist kein Maßstab für die Lunkerung.

oder -verminderung eintritt. Eine Schaulinie, auf die in dieser Beziehung kein Verlaß ist, kann zu Trugschlüssen führen. Es ist deswegen erforderlich, die bisher verwendeten Vorrichtungen zur Aufnahme der Schwindungslinien nach dieser Richtung hin kritisch zu beleuchten.

Aufsicht auf den Unterkasten.

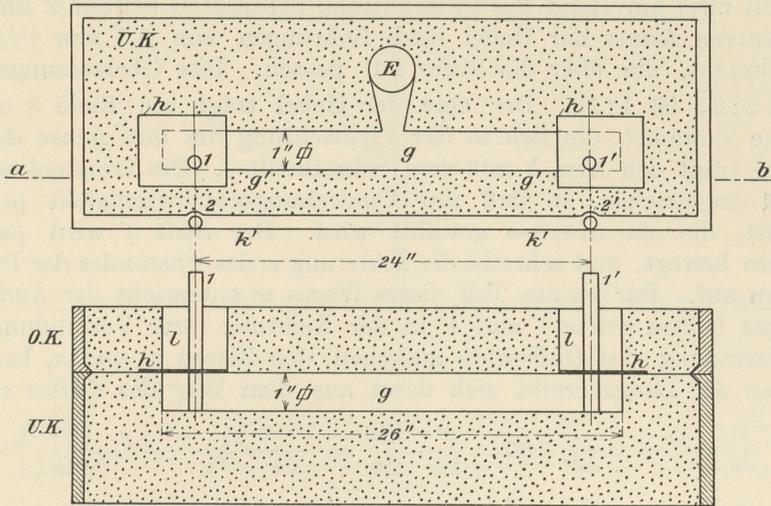


Abb. 456. Schnitt *ab*.

Ansicht auf den Oberkasten.

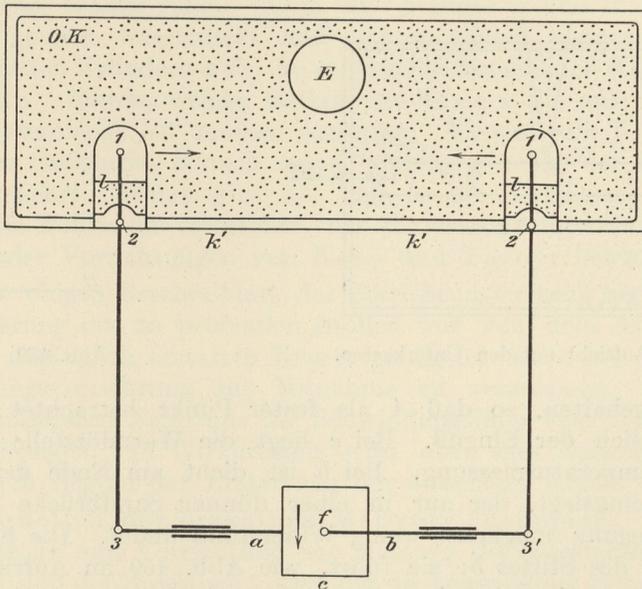


Abb. 457.

a) Die Vorrichtung von Keep ($L_6 11$, $L_4 105$) ist namentlich zur Ermittlung der Schwindungslinien von Gußeisen bestimmt (vgl. Abb. 456 und 457). Im Unterkasten *UK* befindet sich die Sandform *g* für einen Stab von 25,4 mm quadratischer Seitenkante bei 720 mm Länge. An den beiden Enden wird die Form abgedeckt durch zwei Stücke verzinnertes Eisenblech *h*, die je ein rundes

Loch von 6,3 mm ($\frac{1}{4}$ ") besitzen. Durch jedes dieser Löcher wird gut passend ein Stift 11' aus Eisen gesteckt, und zwar möglichst nahe der vorderen Fläche $g'g'$ der Form, damit die Stifte bereits durch die erste dünne Erstarrungskruste bei ihrer Schwindung mitgenommen werden. Die Entfernung der Mitten der beiden Stifte beträgt 610 mm. Die Form wird dann durch einen Oberkasten OK zugedeckt, der Aussparungen ll besitzt. Zwei doppelarmige Hebel 123 und 1'2'3' haben ihren Drehpunkt in zwei am Rand des Unterkastens befestigten Stiften 2 und 2'. Am Ende des kurzen Armes der Hebel sind Bohrungen von 6,3 mm ($\frac{1}{4}$ ") Durchmesser angebracht, die über die Stifte 11' passen. Das Übersetzungsverhältnis der Hebel 12:23 ist 1:10. Der eine der Hebel trägt am Ende 3 mittels des Armes a eine Trommel, die sich in der Pfeilrichtung um ihre Achse dreht. Der andere Hebel trägt den Arm b mit dem Schreibstift f . Die Trommel wird durch ein Uhrwerk angetrieben, so daß ihre Umdrehungsgeschwindigkeit proportional der Zeit z ist, die als Abszisse gewählt wird. Der Stift f wird parallel zur Trommelachse bewegt, und schreibt die Änderung w des Abstandes der Punkte 3 3' als Ordinaten auf. Der zehnte Teil dieses Weges w entspricht der Änderung des Abstandes der beiden Stifte 1 und 1' in der Richtung ihrer Verbindungslinie.

Die Schwindung des Gußstabes zwischen den Zeiten z_1 und z_2 bezogen auf 100 Einheiten der Länge ergibt sich dann aus dem Weg des Stiftes w (in Zoll)

$$\varepsilon_{1.2} \cdot 100 = \frac{w}{10} \cdot \frac{100}{24} = \frac{10 \cdot w}{24} \text{ ‰}.$$

Die erhaltenen Kurven sind nicht t, ε -, sondern z, w -Linien.

b) Turners Vorrichtung (Thomas Turner, $L_6 12$; Murray, $L_4 50$). Eingeformt wird ein T-förmiger Stab wie in Abb. 458. Ein Stahlbolzen A ist im

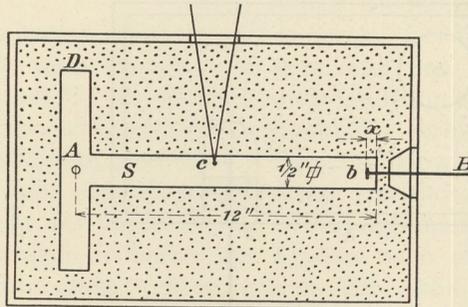


Abb. 458. Aufsicht auf den Unterkasten.

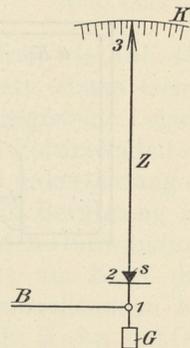


Abb. 459. Aufriß.

Formkasten festgehalten, so daß A als fester Punkt betrachtet werden kann. Bei D befindet sich der Einguß. Bei c liegt die Warmlötstelle eines Thermoelementes zur Temperaturmessung. Bei b ist dicht am Ende der Stabform ein verzinnter Stift eingelegt, der nur in einer dünnen Sandbrücke gehalten wird, damit seine Bewegung möglichst wenig Widerstand findet. Die Stange B bildet die Verlängerung des Stiftes b ; sie führt, wie Abb. 459 im Aufriß erläutert, zu einem doppelarmigen Zeigerhebel 123, an dem sie bei 1 angreift, und der bei 2 auf einer Schneide s gelagert ist. Die Übersetzung 12:23 ist 1:40. Das Ende 3 des Zeigers gleitet über der Skala K . Ein kleines Gegengewicht G bringt den Zeiger in die Nulllage, wenn bei 1 keine Kraft angreift.

Der Stift b muß sehr nahe an der Endfläche der Stabform liegen, die Strecke x muß also sehr klein sein, weil sonst die Meßlänge von 12" abweicht und unsicher wird.

c) Wüsts Vorrichtung (Wüst, *L₆ 13*). Das Schema der Anordnung ist in Abb. 460 enthalten. In die Gußform *S* des Stabes werden Eisenstäbe *a* und *a'*, die an ihren Enden korkzieherartig aufgewickelt sind, eingelegt, so daß die Enden *C* und *D* um 500 mm voneinander abstehen. Die ganze Länge des Stabes *AB* beträgt 550 mm. Die korkzieherartigen Enden *C* und *D* sollen möglichst baldiges Festhaften der erstarrten Kruste und infolgedessen Mitnahme der Anzeige-

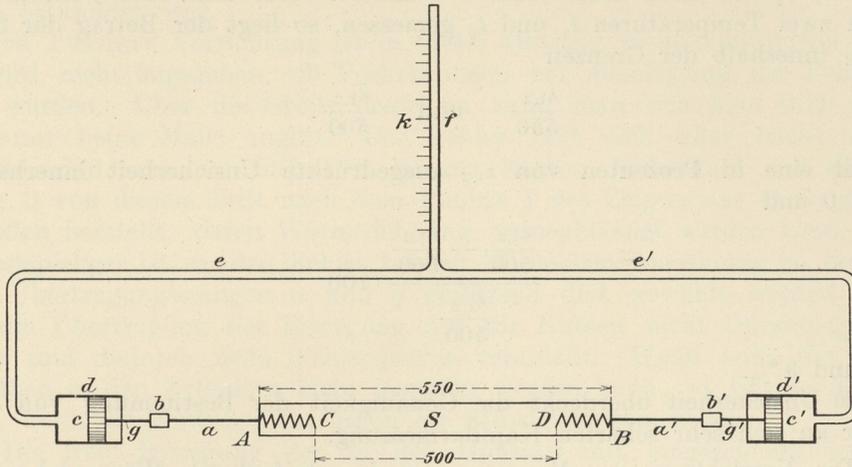


Abb. 460.

mechanismen bewirken. Bei *b* und *b'* verbinden Hartgummimuffen die Eisenstangen *a* und *a'* mit den Stangen *g* und *g'*, damit die Kolben *c* und das hinter diesen befindliche Wasser nicht durch die Stangen *a* und *a'* erwärmt werden. Die Kolben *c* spielen wasserdicht und mit möglichst kleiner Reibung in den mit Wasser gefüllten Zylindern *dd'*. An diese schließen sich die Kapillarrohre *ee'* an, die zur Kapillare *f* führen, welche mittels der Skala *k* die aus den Zylindern *dd'* verdrängte Wassermenge zu messen gestattet. Werden die Kolben infolge der Schwindung des Gußstabes *S* nach innen bewegt, so sinkt der Flüssigkeitsspiegel in *f*, und umgekehrt. Wüst gibt an, daß er die Kapillarmessvorrichtung anwendete, um die Fehler zu vermeiden, die der etwaige tote Gang in den Hebelübertragungen der Vorrichtungen von Keep und Turner bewirken soll.

d) Aus der obigen Beschreibung der Vorrichtungen geht hervor, daß sie alle die Längenänderung des zu prüfenden Stoffes nur von dem Augenblick ab anzeigen, wo die anfänglich erstarrte Kruste genügend stark ist, um die eingegossene Übertragungsvorrichtung zur Mitnahme zu veranlassen. Sie können also sämtlich im günstigsten Falle nur die Schwindungslinie vom Augenblick der Erstarrung ab anzeigen. In Wirklichkeit wird aber ihre Aufzeichnung erst eine gewisse Zeit nach Beginn der Erstarrung der äußersten Kruste einsetzen.

e) Fehlerquellen der einzelnen Meßvorrichtungen.

α) Die erste an eine Vorrichtung zur Messung der Schwindung ε zu stellende Anforderung ist, daß die Messlänge l , über der die Schwindung gemessen werden soll, möglichst eindeutig festgelegt ist. (Die Schwindung ergibt sich ja aus der Beziehung $\varepsilon = \frac{\lambda}{l}$, wobei λ die Verkürzung ist, die ein Stab von der Länge l erfährt).

Dieser Anforderung entspricht die Vorrichtung von Keep am besten; wenigstens kann man bei genügender Geschicklichkeit in ihrer Handhabung die Meßlänge l genügend sicher festlegen. Weniger sicher ist dies bereits bei der Vorrichtung von Turner, weil hier der Abstand x (Abb. 458) des Kopfes des Stiftes *b* vom

Ende der Gußform eine kleine Unsicherheit bezüglich der Meßlänge gibt. Man kann sie dadurch vermindern, daß man x möglichst klein wählt.

Die Wüstsche Anordnung wird der obigen Anforderung gar nicht gerecht. Man kann weder den Abstand $CD = 500$ mm, noch die Strecke $AB = 550$ mm als Meßlänge betrachten (Abb. 460). Die Meßlänge l entspricht irgendeinem Zwischenwert zwischen beiden, der zu Beginn der Abkühlung sich mehr dem Werte 550, später mehr dem Werte 500 nähert. Hat man eine Verkürzung $\lambda_{1,2}$ zwischen zwei Temperaturen t_1 und t_2 gemessen, so liegt der Betrag der Schwindung $\epsilon_{1,2}$ innerhalb der Grenzen

$$\frac{\lambda_{1,2}}{550} \quad \text{und} \quad \frac{\lambda_{1,2}}{500}.$$

Dies gibt eine in Prozenten von $\epsilon_{1,2}$ ausgedrückte Unsicherheit innerhalb der Grenzen 0 und

$$\frac{\frac{\lambda_{1,2}}{500} - \frac{\lambda_{1,2}}{550}}{\frac{\lambda_{1,2}}{500}} \cdot 100$$

oder 0 und 9%.

Diese Unsicherheit überdeckt die Genauigkeit der Bestimmung von $\lambda_{1,2}$ mit Hilfe der an sich sehr scharfen Kapillarmessung.

β) Die Vorrichtung zur Messung von $\lambda_{1,2}$ darf durch Wärmedehnung der Zwischenverbindungen nicht oder nur möglichst wenig beeinflusst werden. In dieser Hinsicht ist die Keepsche Vorrichtung am vollkommensten. Es soll angenommen werden, daß der Hebel 12 (Abb. 457) durch Wärmestrahlung und Leitung auf durchschnittlich t C° erhitzt würde, während der Hebel 23 keine Erwärmung erfährt. Dies ist der ungünstigste Fall. Das Übersetzungsverhältnis der Hebel wird durch die ungleiche Erwärmung von ursprünglich 1:10 auf $(1 + \alpha t) : 10$ geändert, wenn α die mittlere Wärmedehnungszahl des Metalls der Hebel ist. Setzt man z. B. $t = 300$ C° und α für Eisen 0,000011, so ergibt sich das Übersetzungsverhältnis 1,0033:10. Dadurch erscheint der Weg w des Stiftes auf der Trommel kleiner, woraus man auf eine kleinere Schwindung schließt. Der Fehler, der entsteht, ergibt sich aus der Beziehung

$$\frac{w}{10} : \left(\frac{w \cdot 1,0033}{10} - \frac{w}{10} \right) = 100 : \Delta$$

$$\Delta = 0,33 \%$$

Der Fehler beträgt also in dem angenommenen ungünstigen Falle nur 0,33% des gefundenen Wertes ϵ der Schwindung. Man würde z. B. bei Gußeisen statt 1% Schwindung eine solche von 0,997% erhalten. Dieser geringe Fehler spielt keine Rolle.

Die Vorrichtung von Wüst ist mit Hinsicht auf die Anforderung β am unvollkommensten. Nimmt man beispielsweise eine durchschnittliche Erwärmung der Stangen a und a' (Abb. 460) um 300 C° an, wie sie bei der Prüfung hochschmelzender Metalle (Kupfer) leicht denkbar ist, und setzt man die Länge der Stangen a und a' zusammen gleich 300 mm (abgegriffen aus den Skizzen in der Quelle), so würde die Dehnung dieser Stangen dem Auseinanderrücken der Kolben cc' um den Betrag $300 \cdot 300 \cdot 0,000011 = 0,99$ mm entsprechen. Dieser Weg der Kolben, der mit der Längenveränderung des Probestabes nichts zu tun hat, würde fehlerhafterweise als Dehnung des Stabes S in die Erscheinung treten, und zwar um einen Betrag von $\frac{0,99 \cdot 100}{500} = 0,2$ mm auf 100 mm Länge. Das ist ein

Betrag, der die Ergebnisse gänzlich unbrauchbar machen müßte. So beträgt z. B. die von Wüst für Kupfer gefundene angebliche Ausdehnung des Metalls bei der Erstarrung 0,05 mm auf 100 mm. Der Fehler der Beobachtung kann sonach größer als der Wert der zu messenden Größe werden. Daß kräftige Erwärmung der Stangen a und a' stattfindet, geht aus den Angaben Wüsts hervor, wonach zwischen den Stangen a und g die Hartgummimuffe b eingeschaltet werden mußte, weil Erwärmung der Kolben c und damit des Wassers in d zu befürchten war.

Auch Turners Vorrichtung ist in dieser Hinsicht nicht einwandfrei; wenigstens wird nicht angegeben, ob Vorkehrungen zur Beseitigung des Fehlers getroffen wurden. Über die Größe desselben kann man sich kein Bild machen, da Turner keine Maße angibt. Der Fehler läßt sich aber leicht dadurch beseitigen, daß man den Stift b z. B. aus 36 proz. Nickelstahl und die Übertragung B von diesem Stift nach dem Punkte 1 des Zeigers aus Quarzglas, also aus Stoffen herstellt, deren Wärmedehnung vernachlässigt werden kann.

Kostspieliger ist es, den Fehler bei der Wüstschen Anordnung zu beseitigen, da die Übertragungsstangen a und g genügend dick gewählt werden müssen, damit die Übertragung der Bewegung auf die Kolben nicht Durchbiegung der Stangen und dadurch neue Fehlerquellen veranlaßt. Wenn auch die Reibung der Kolben in den Zylindern klein gemacht werden kann, so ist sie doch vorhanden, wenn die Kolben dicht gegen die Flüssigkeit sein sollen.

γ) Die freie Bewegung der in den Gußstab mit eingeschmolzenen Stifte (11' bei Keep, b bei Turner und aa' bei Wüst) darf durch Widerstand nur möglichst wenig gehindert werden. Hier entsteht die Frage, inwieweit bei der Keepschen Vorrichtung die beiden Weißblecheinlagen h , in denen die Stifte 1 und 1' stecken, durch den Sand an der Bewegung gehindert werden, und wie groß die dadurch entstehenden Fehlerquellen werden können.

Ferner können Fehler dadurch bedingt werden, daß der Gußstab bei seiner Ausdehnung in der Längsrichtung Widerstand durch das Formmaterial findet und dadurch plastisch gestaucht oder durchgebogen werden kann. Die Widerstände genannter Art sind in den beiden Vorrichtungen von Keep und Wüst wohl am größten. Bei der Vorrichtung von Turner stellt sich der freien Ausdehnung des Stabes nur die dünne Sandbrücke bei b entgegen, deren Widerstand kaum wesentliche Fehler erwarten läßt.

377. Zur Erläuterung des Verlaufs der Schwindung metallischer Stoffe von der Temperatur des Beginns der Erstarrung abwärts möchte ich in Abb. 461 nur einige wenige Beispiele anführen, die von Turner (L_6 12) stammen und sich auf die Schwindung von Roheisen beziehen. Da diese Eisenarten nur wenig voneinander verschiedene Erstarrungstemperaturen haben, so werden etwaige Fehler wegen der Wärmedehnung der Übertragungsvorrichtungen vom Gußstab zum Zeiger (376 e, β) in allen Fällen nahezu gleich sein, so daß die erhaltenen Schwindungslinien untereinander vergleichbar bleiben. Angegeben sind die z, ε -Linien, mit den Zeiten in Sekunden als Abszissen und der beobachteten Schwindung bzw. Ausdehnung $\varepsilon \cdot 100$ in Prozenten als Ordinaten. Linie 0 entspricht einer Schwindungslinie von Kupfer, 1 bis 4 den Schwindungslinien von Roheisensorten, deren chemische Zusammensetzung der Abbildung beigeschrieben ist.

Das Kupfer und das ganz reine weiße Roheisen erstarren ohne Ausdehnung; die grauen Eisensorten 2 bis 4 dagegen vermehren bei der Erstarrung ihr Volumen, und zwar am schwächsten Eisen 2 und am stärksten Eisen 4. Übrigens zeigt auch das gewöhnliche weiße Roheisen abweichend von dem sehr reinen weißen Eisen 1 bei der Erstarrung Ausdehnung, wenn sie auch geringer ist, als die der grauen Eisensorten (vgl. Hague und Turner, L_6 14; Coe, L_6 15).

Die Eisensorten zeigten bei den einzelnen Schwindungslinien beigeschriebenen Temperaturen Wärmetönungen, die teilweise der Erstarrung, teilweise Umwandlungen entsprechen.

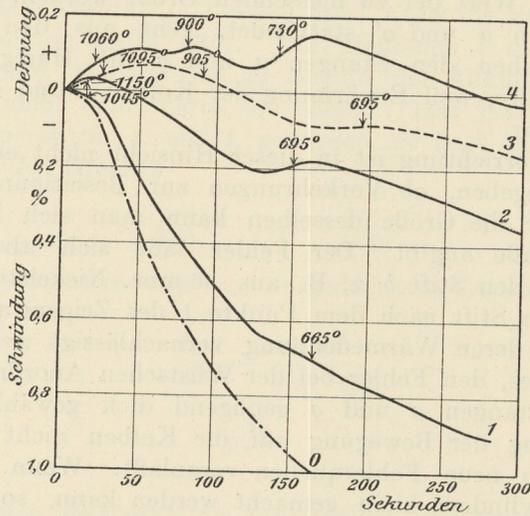


Abb. 461. Schwindungslinien (nach Thomas Turner).

	Gesamtkohlenstoff	Graphit	Si	Mn	P	S
0: Kupfer.	—	—	—	—	—	—
1: Sehr reines weißes Roheisen:	2,73	0	0,01	Spur	0,01	Spur
2: Graues Hämatit-Roheisen:	3,39	2,53	3,47	0,55	0,04	0,03
3: Grauguß (aus einem Gußstück):	3,42	2,73	1,41	0,43	0,96	0,07
4: Graues Roheisen:	2,75	2,60	3,98	0,50	1,25	0,03

Gußstäbe $12,7 \times 12,7 \text{ mm} \times 305 \text{ mm}$. Sandguß. Die den Schaulinien beigeschriebenen Temperaturen geben die ungefähre Lage der Haltepunkte in der Abkühlungskurve z, t an.

378. Bei der Überlegung in Abs. 374 und in der Abb. 451b war eine ideale Schwindungslinie $ABCD$ zugrunde gelegt. Sie gibt diejenige Längenänderung an, die 100 Längeneinheiten bei der Änderung der Temperatur erfahren, vorausgesetzt, daß gegenseitige Behinderung der einzelnen Schichten des erstarrenden Stoffes in ihrer Längenänderung nicht eintritt. Diese Voraussetzung wird aber praktisch schwer oder gar nicht zu erfüllen sein. Jedenfalls geben die in Abs. 376 beschriebenen Vorrichtungen keine solchen idealen Schwindungslinien. Bei der Erstarrung und Abkühlung werden sich die einzelnen nacheinander erstarrenden und abkühlenden Teile des Gusses gegenseitig stets in ihrer Schwindung beeinflussen, und zwar unter bleibender Formänderung, solange die Temperatur noch im Bereich der vorwiegend plastischen Formänderungen liegt (331 bis 338), unter Entstehung elastischer Formänderungen und damit auch von Spannungen, wenn die Temperatur unterhalb dieses Bereiches gesunken ist. Selbst im günstigsten Falle, wenn alle in Abs. 376 angegebenen Fehlerquellen bei der Messung ausgeschaltet werden könnten, würden die erhaltenen Schwindungslinien immer nur die Resultierende aus einer Reihe nacheinanderfolgender Längenänderungen innerhalb des Gusses angeben. Sie wird je nach Gießhitze, Masse und Form des Stabes, Beschaffenheit des Formmaterials usw. verschieden ausfallen. Dies gilt nicht etwa nur für solche Stoffe, die wie das Gußeisen (graues Roheisen) je nach Schnelligkeit der Abkühlung verschiedene chemische Zusammensetzung erhalten (je nachdem scheidet sich mehr oder weniger Graphit aus), sondern auch von allen übrigen Stoffen, die solche Änderung der chemischen Zusammensetzung nicht erleiden.

Man muß deswegen bei Schlußfolgerungen, die man aus dem Verlaufe der Schwindungslinien auf etwaige Umwandlungen oder sonstige Vorgänge innerhalb des erkaltenden Stoffes zieht, sehr vorsichtig sein und sich immer vergewissern, inwieweit sie durch die soeben besprochenen Umstände beeinflusst werden können.

In Abb. 461 sind von Turner diejenigen Temperaturen, bei denen sich aus dem Verlauf des Temperaturabfalls des Thermoelementes bei c (Abb. 458) Wärmetönungen ergeben, den Schwindungslinien beigeschrieben. Auch hier ist Vorsicht in der Schlußfolgerung geboten. Die Temperaturangaben des Thermoelementes bei c und die Zeit, zu welcher sie beobachtet wurden, brauchen nicht notwendigerweise mit dem Verlauf der Schwindungslinie übereinzustimmen. Je nachdem ob die Warmlötstelle des Thermoelementes c mehr nach der Mittellinie des Stabes zu oder weiter von dieser weg nach der Formwandung hin liegt, wird der betreffende, mit der Wärmetönung verbundene Vorgang zu einer späteren oder früheren Zeit beobachtet. Die Schwindungslinie gibt aber nicht notwendigerweise die zu derselben Zeit gehörige Längenänderung an.

379. Für den Gießer ist die Kenntnis des Gesamtschwindmaßes des zu vergießenden Stoffes von Bedeutung. Es ist dies die Längenänderung ε , die 100 Längeneinheiten bei der Abkühlung von dem Beginn der Erstarrung t_0 bis zu gewöhnlicher Temperatur erfahren. Der Gießer muß die Längenabmessungen des Modelles um dieses Gesamtschwindmaß größer machen, um im fertigen Guß die geforderten Abmessungen zu erhalten. Er gibt dem Modell eine „Zugabe“ für die Schwindung.

Zur Ermittlung dieses Gesamtschwindmaßes sind nun so verwickelte Einrichtungen, wie sie in Abs. 376 beschrieben wurden, nicht erforderlich. Man kommt einfacher auf folgende Weise zum Ziel.

a) Man befestigt in der Form zwei Stifte in bekanntem Abstand und gießt sie in den zu gießenden Stab ein. Die Befestigung der Stifte muß so sein, daß sie die Schwindung des Gußstückes nicht verhindern. Nach der Erkaltung des gegossenen Stabes wird dann der Abstand der Stifte zurückgemessen.

b) Man gießt nach Keep den in Abb. 462 punktiert gezeichneten Stab gegen die beiden Flächen A und B eines metallenen Joches; im übrigen wird die Gußform in Sand hergestellt. Die beiden Jochflächen A und B sollen möglichst glatte Endflächen des Gußstabes bewirken. Nach dem Erkalten wird der Stab in die in Abb. 462 punktierte Lage in das Joch zurückgebracht, so daß er z. B. dicht an A anliegt. Man mißt nun den Abstand der anderen Endfläche des Stabes von der Fläche B mittels eines Keilmaßstabes.

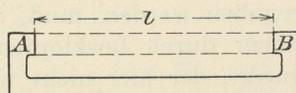


Abb. 462.

c) Man gießt den Stab ähnlich, wie unter b, in Sand, aber mit den Endflächen gegen Metallflächen, deren Abstand vorher genau festgelegt ist. Die Länge des erkalteten Stabes wird sodann mit einer Lehre gemessen, die ähnlich aussieht wie das Joch in Abb. 462, aber an der einen Seite eine Mikrometerschraube zur Messung der Stablänge besitzt. (Vgl. Treuheit, *L*, 16.)

Das Gesamtschwindmaß ist nun nicht nur von der Art des vergossenen Stoffes abhängig, sondern auch von der Masse des Gusses. Dies ergibt sich aus der Betrachtung in Abs. 374. Bei Beginn der Erstarrung des Metalls längs der Formwandung wird die Temperatur im Innern des Gusses um so höher über der Erstarrungstemperatur liegen, je größer die Masse des Gusses ist und je schneller die Formwände dem Metall die Wärme entziehen. Damit wächst das Maß der Lunkerung. Je größer aber der Lunkerhohlraum in der Mitte des Gusses, um so geringer erscheint das Schwindmaß, das doch nur der Längenänderung des Gusses in seiner äußeren Kruste entspricht. Bei langgestreckten Gußstücken, wie z. B.

dem Stab in Abb. 463, wird bei Vorhandensein des gezeichneten Lunkers (oder einer porösen Stelle) die Schwindung in der Richtung qq durch den Lunker stark vermindert, während sie auf die Schwindung in der Längsrichtung wenig oder gar keinen Einfluß ausübt.

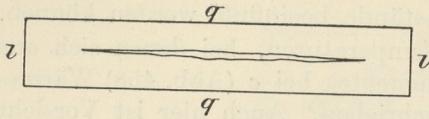


Abb. 463.

Aus diesem Grunde gibt man bei schweren Gußstücken oft nur Zugabe für die Schwindung in der Längsrichtung, nicht aber für die in der Querrichtung.

Unter Umständen kann der Guß sogar größere Abmessungen annehmen, als das Modell. Ein solcher Fall tritt ein, wenn ein dickwandiger Zylinder (z. B. ein Pumpenkörper) über einen Kern gegossen wird, der verhältnismäßig widerstandsfähig ist. Durch Erwärmung dehnt sich der Kern und übt auf das schwindende Metall einen Druck nach außen aus. Die erstarrende Masse steht somit unter Zugbeanspruchung und es kann der Fall Abs. 368 b eintreten (Thomas D. West, *L₆ 17*). Ähnliches ist möglich bei Gußstücken, die an der freien Schwindung durch Rippen verhindert sind, die in die Formmasse hineinragen. Auch hier wird die Schwindung kleiner ausfallen.

Können sich verschiedene Teile des Gusses in ihrer Schwindung gegenseitig behindern, so werden sie innerhalb der Zone vorwiegend plastischer Formänderungen ihre Längenabmessungen bleibend ändern, wobei der eine Teil bleibend verkürzt, der andere bleibend verlängert wird. Die Folge davon ist dann, daß die Schwindung des gestreckten Teiles kleiner, die des verkürzten größer ausfällt. S. Abs. 368.

Wenn der Zufluß des flüssigen Stoffes nach dem Eingießen in die Gußform abgeschnitten wird, ehe die Erstarrung oberflächlich begonnen hat, so kommt für die Schwindung nicht nur der Betrag der Längenänderung zwischen Erstarrungsbeginn und gewöhnlicher Temperatur in Betracht, sondern auch die Schwindung des flüssigen Materials. Dadurch kann das Gesamtschwindmaß größer erscheinen.

Daß auch das Formmaterial unter Umständen dem Schwinden Widerstand entgegensetzt, und das Gesamtschwindmaß auch hierdurch beeinflusst werden kann, ist einleuchtend.

Die Zugabe, die zu den Abmessungen des Modells wegen der Schwindung gegeben werden muß, richtet sich auch nach dem Grade der Erweiterung der Form durch Losklopfen des Modells. Das ist ein rein technologischer Gesichtspunkt, der hier nicht weiter erörtert werden soll.

Bei Grauguß (grauem Roheisen) wird die Schwindung noch wesentlich beeinflusst durch die Menge des ausgeschiedenen Graphits. Im allgemeinen wird das Gesamtschwindmaß unter sonst gleichen Umständen um so geringer, je größer die Menge des Graphits in dem erstarrten Guß ist. Dies zeigt Abb. 464. Als Abszissen sind die Graphitgehalte, als Ordinaten die entsprechenden Schwindmaße in Prozenten eingezeichnet (Neufang, *L₆ 18*). Die 15 verschiedenen Gußeisensorten entsprechenden Punkte liegen innerhalb des schraffierten Flächenstreifens, der mit abnehmendem Graphitgehalt ansteigt. Da die Zusammensetzung der verschiedenen untersuchten Gußeisensorten innerhalb weiter Grenzen schwankt, wie die der Abbildung beige-schriebenen Analysenzahlen angeben, und da das Schwindmaß außer vom Graphitgehalt auch noch durch die Gegenwart der anderen Stoffe im Eisen beeinflusst wird, so ist es nicht zu verwundern, daß die Punkte der Abbildung nicht alle auf einer Kurve, sondern innerhalb eines verhältnismäßig breiten Flächenstreifens liegen.

Alle Umstände, die bei der Erkaltung des Gusses auf Vermehrung der Graphitbildung hinwirken, werden nach obigem das Gesamtschwindmaß mittelbar ver-

Tabelle XXXV.
Gesamtschwindmaß verschiedener Stoffe.

Metallischer Stoff	Lineares Schwindmaß ϵ in %	Quelle
Grauguß: bei leichten Güssen	1,0—1,1	} Treuheit ($L_6 16$)
bei schweren Güssen	0,7—0,8	
bei großen Zylinder- und Kastengüssen	0,8 längs 0,4 quer	
Stahlformguß	0,8—2,0	}
„ für große Walzen	1,2—1,4	
Schmiedbarer Guß	1,5	} Wüst ($L_6 13$) ²⁾ Ledebur($L_1 25$) ³⁾
Blei: (mit 1,27% Zinn)	[0,8] ¹⁾ 1,1	
Zink: (2,67% Eisen)	1,4	} W. L.
„	0,7	
Zinn: (Bankazinn)	0,44	} W.
Aluminium: (99,16% Al, 0,33% Fe)	1,8 1,8	
Kupfer: (99,16% Cu, 0,35% Fe. Elektolytkupfer)	1,4 1,25	} W. L.
„	1,25	
Wismut: (99,8% Bi, 0,12% Pb)	0,29	} W.
Antimon: (97,9% Sb, 0,34% Sn, 1,3% Fe, 0,56% Cu)	(0,29—0,66) schwankend	
Blei-Zinn-Legierungen: Sn: 18%	0,56	} W.
70%	0,44	
81%	0,50	
Blei-Antimon-Legierungen: Sb: 19%	0,54	} W.
15%	0,56	
Zinn-Zink-Legierungen: Zn: 49%	0,50	} W.
14,5%	0,46	
5%	0,49	
Kupfer-Zink-Legierungen: Zn: 16%	2,17	} W. L. W.
33%	1,97	
33%	1,62	
36%	1,97	
Kupfer-Zinn-Legierungen: Sn: 5%	1,7	} W. L. L. u. W.
10%	1,4	
10%	0,8	
19%	1,5	
Kupfer-Nickel-Zink-Legierungen: Ni: 16% Zn: 22%	2,02	} W.
20% 23%	2,05	
26% 22%	2,03	
36% 18%	1,93	
Kupfer-Zinn-Zink-Blei-Leg.: Sn: 3% Zn: 8% Pb: 2%	1,76	} W. L.
17,5% 1,5% —	1,50	
9,5% 1,5% —	1,47	
9,8% 2% 1,4%	1,47	
6% 12% —	1,30	
Zinn-Zinn-Kupfer-Leg.: Sn: 14,5% Cu: 4,3% Pb: 1,7%	1,02	} W.
46% 2% 1%	0,73	
Weißmetalle: Sn: — Pb: 79% Sb: 12,5% Cu: 8,5%	0,55	} W.
20% 59% 21% —	0,49	
85,5% — 9,5% 5%	0,51	
90% — 8% 2%	0,55	
71% 9% 15% 5%	0,42	
Aluminiumbronze	1,65	L.

1) Unsicher, Stab gelunkert. 2) Abgekürzt: W. 3) Abgekürzt: L.

kleinern. Wie wir später (II B) sehen werden, sind dies namentlich langsame Abkühlung innerhalb eines bestimmten Temperaturbereichs und höherer Siliziumgehalt. Die Abkühlung ist nun bei größeren Massen auch bei gleichem Form- und Gußmaterial langsamer als bei kleinen; infolgedessen wird auch das Schwindmaß bei größeren Güssen kleiner ausfallen als bei kleineren.

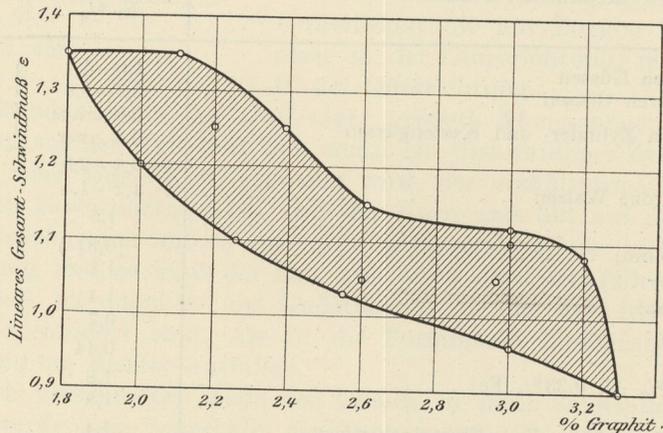


Abb. 464. Einfluß des Graphitgehaltes auf das Gesamt-Schwindmaß von Gußeisen.

Gußeisen: Stabdurchmesser 20—80 mm.
 Gesamtkohlenstoff 2,9—3,6 Proz.
 Silizium 1,0—2,3 „
 Mangan 0,5—0,9 „
 Phosphor 0,1—0,8 „
 Schwefel 0,08—0,10 „

380. Die Angaben über Gesamtschwindmaß und Zugabe für Schwindung gehen zum größeren Teil weit auseinander. In der Tabelle XXXV auf Seite 459 ist eine Übersicht über die in der Literatur enthaltenen Zahlen gegeben. Es sind hierbei vorwiegend die Wüstschen Zahlen benutzt, die mit der in Abs. 376 c beschriebenen Vorrichtung ermittelt sind. Wenn auch die Erwärmung der Übertragungsstangen bei der Aufzeichnung der Schwindkurve wesentliche Fehler bewirken kann, so fallen diese Fehler bei der Messung der Gesamtschwindung wieder heraus, da sich hierbei die Übertragungsstangen wieder abkühlen, und so ihre anfängliche Verlängerung wieder rückgängig gemacht wird. Dagegen bleibt die in Abs. 376 e c erwähnte Unsicherheit wegen der Unbestimmtheit der Meßlänge bestehen.