

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,

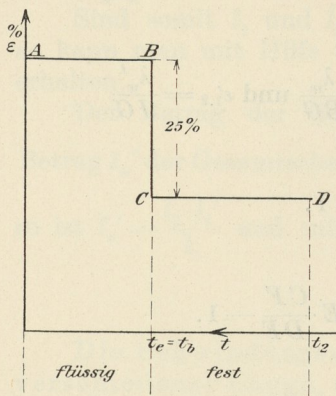


Abb. 440.

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 Hohlräume werden nur 14 mm ausgefüllt; es bleibt also ein zweiter luftleerer Hohlraum H_2 von der Höhe $85 - 14 = 71$ mm übrig.

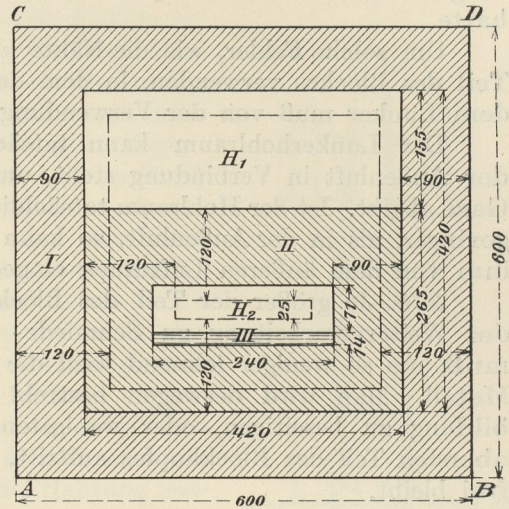


Abb. 441.

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.

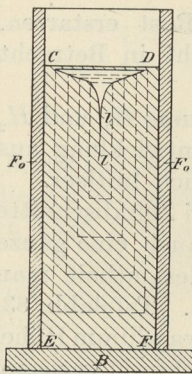


Abb. 442.

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 *F_o* 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 Vermittelung des Zwischenstücks 6, des Stempels 3 und des Bodens 2 von unten her auf das in der Kokille erstarrende 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

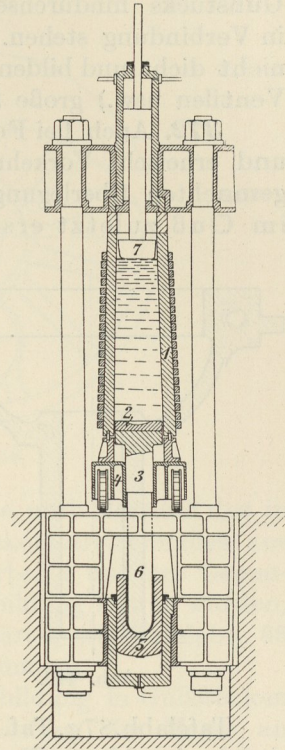


Abb. 443.
Harmetpresse.

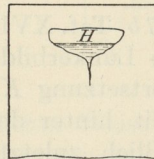


Abb. 444.

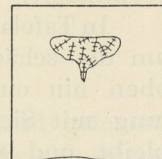


Abb. 445.

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

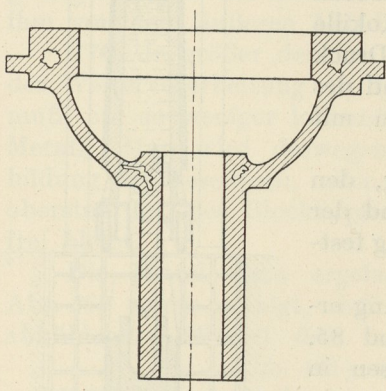


Abb. 446.

finden, 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.

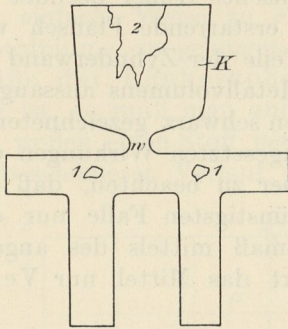


Abb. 447.

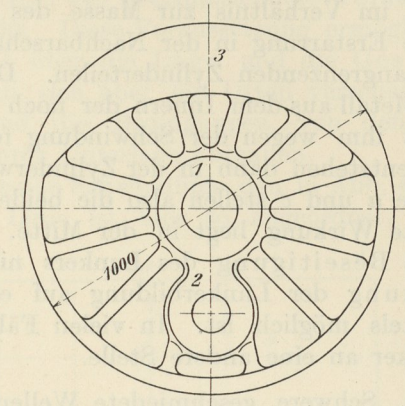


Abb. 448.

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-

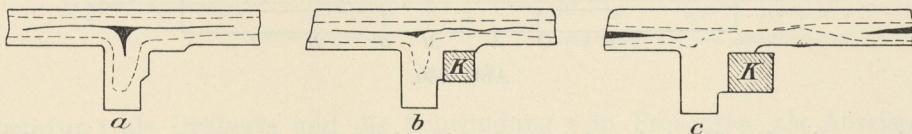


Abb. 449.

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

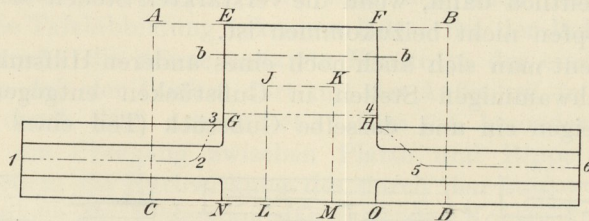


Abb. 450.

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

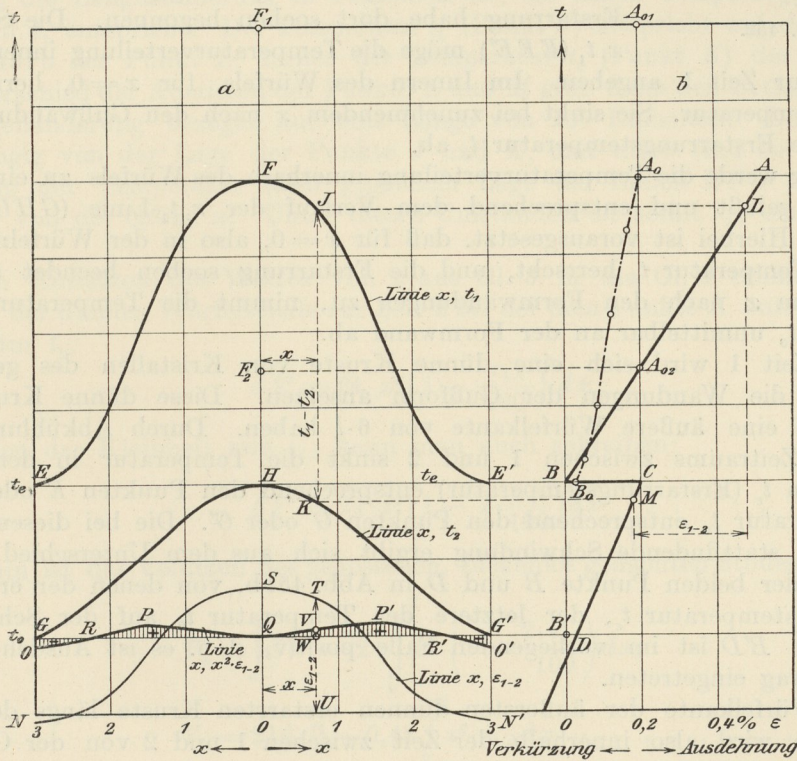


Abb. 451.

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-

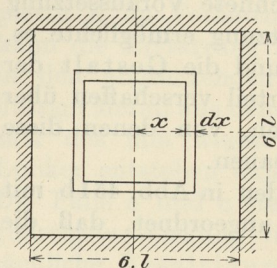


Abb. 452.

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

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

wobei $\varepsilon_{1,2}$ 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 $\varepsilon_{1,2}$, d. h. die Längenänderung bezogen auf eine Länge von 100 Einheiten. Der Wert $\varepsilon_{1,2}$ 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 $\varepsilon_{1,2}$ 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 :

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

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

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

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

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

Der Lunkerhohlraum wird dann

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

Um sich ein Bild von der Größe V_l zu machen, wird man zunächst die Werte $\varepsilon_{1,2}$ als Funktion von x aufzeichnen, indem man für einige x die zugehörigen Werte von $\varepsilon_{1,2}$ 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 $x^2 \cdot \varepsilon_{1,2}$ und erhält unter Verwendung dieser Werte als Ordinaten zu den Abszissen x die $x, x^2 \cdot \varepsilon_{1,2}$ -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.

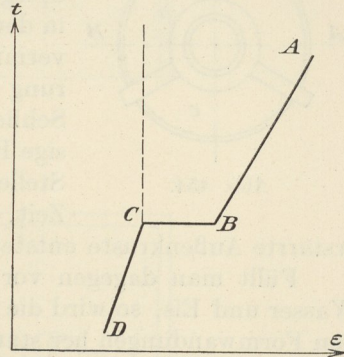


Abb. 453.

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

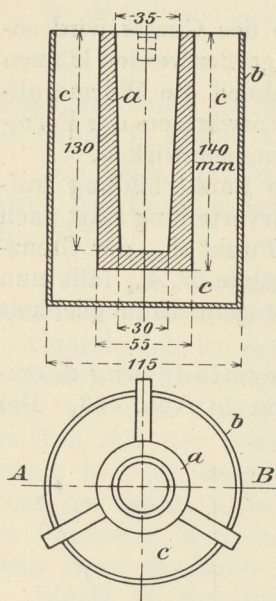


Abb. 454.

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

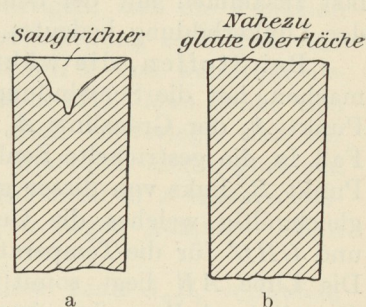


Abb. 455.

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.