

FORSCHUNGSBERICHTE DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN

Nr. 2257

Herausgegeben im Auftrage des Ministerpräsidenten Heinz Kühn  
vom Minister für Wissenschaft und Forschung Johannes Rau

Prof. Dr. -Ing. Max Vater  
Dipl. -Ing. Walter Elfgén

Institut für Bildsame Formgebung der  
Rhein. -Westf. Techn. Hochschule Aachen

Untersuchung des Preßvorganges  
in einem Aufnehmer



Westdeutscher Verlag Opladen 1972

ISBN-13: 978-3-531-02257-4      e-ISBN-13: 978-3-322-88349-0  
DOI: 10.1007/978-3-322-88349-0

© 1972 by Westdeutscher Verlag, Opladen  
Gesamtherstellung: Westdeutscher Verlag

## Inhalt

1	Einleitung und Problemstellung . . . . .	5
2	Erkenntnisstand . . . . .	6
2.1	Der Warm-Stauchvorgang zwischen planparallelen Platten und im Gesenk . . . . .	7
2.1.1	Kraft- und Arbeitsbedarf . . . . .	7
2.1.2	Der Ausfüllungsvorgang beim Anstauchen im Gesenk . . . . .	12
2.2	Die Verwendung von Schmiermitteln beim Warm- Umformen unter hoher Flächenpressung . . . . .	14
2.2.1	Allgemeine Grundlagen der Reibung und Schmierung .	14
2.2.2	Schmiermittel bei der Warm-Formgebung	16
2.2.3	Auswirkung von Schmiermitteln auf Reibverhalten, Kraft- und Arbeitsbedarf beim Warm-Umformen . . .	19
2.3	Wärmeübergang und Werkzeugtemperaturen beim Warm-Umformen von Metallen . . . . .	21
2.3.1	Wärmeübertragung Metall-Metall . . . . .	21
2.3.2	Temperaturen in Warmarbeitswerkzeugen . . . . .	25
3	Eigene Versuche . . . . .	26
3.1	Der Anstauchvorgang in einem geschlossenen Auf- nehmer . . . . .	27
3.1.1	Vorversuche und Versuchsplanung . . . . .	27
3.1.2	Versuchsapparaturen . . . . .	29
3.1.3	Beschreibung und Auswertung eines Anstauchver- suches . . . . .	29
3.1.4	Versuchsergebnisse und Diskussion . . . . .	31
3.1.4.1	Grundsatzuntersuchung . . . . .	31
3.1.4.2	Der Anstauchvorgang in Abhängigkeit von Schmier- mittel, Preßgeschwindigkeit, Probengröße und Werkzeug . . . . .	35
3.1.4.3	Stoffflußuntersuchungen . . . . .	40
3.1.5	Vergleich der Umformkräfte beim steigenden Lochen beim Strangpressen und beim Anstauchen im Auf- nehmer . . . . .	41
3.2	Temperaturverteilung in gekühlten und ungekühlten Lochdornen . . . . .	42
3.2.1	Temperaturmessungen beim Aufheizen von gekühlten Lochdornen in einer Ofenatmosphäre . . . . .	43
3.2.1.1	Versuchseinrichtungen und Versuchsplanung . . . . .	43
3.2.1.2	Meßergebnisse . . . . .	45
3.2.2	Temperaturmessungen beim Wärmeübergang Metall- Metall . . . . .	47
3.2.2.1	Versuchseinrichtungen und Versuchsplanung . . . . .	47
3.2.2.2	Meßergebnisse . . . . .	49
3.2.3	Ermittlung der "Wärmeübergangszahl" für die Wärme- übertragung Lochdorn-Block beim Lochen . . . . .	52
3.2.3.1	Versuchseinrichtung . . . . .	52
3.2.3.2	Bestimmung der "Wärmeübergangszahl"	52
4	Zusammenfassung und Schlußfolgerungen für die Praxis . . . . .	54

5	Literaturverzeichnis . . . . .	59
6	Zusammenstellung der wichtigsten verwendeten Zeichen . . . . .	62
Anhang		
a)	Tabellen . . . . .	66
b)	Abbildungen . . . . .	75

## 1 Einleitung und Problemstellung

Um 1885 wurden zum ersten Male Lochstücke im Schrägwalzverfahren nach Mannesmann hergestellt. Kurze Zeit später gelang Ehrhardt die Erzeugung von Luppen aus Blöcken mit quadratischem Querschnitt durch seitliches Lochen auf einer Presse. Dieses Verfahren wurde durch den Bau stärkerer Pressen dahingehend verbessert, daß man das seitliche Lochen weitgehend durch steigendes Lochen von Rundblöcken ersetzte, wodurch die Länge der Luppen vergrößert werden konnte.

Beim Lochen von Blöcken auf einer Presse bedarf es zu ihrem Einführen in den Aufnehmer einer Differenz zwischen Blockaußen- und Aufnehmer-Innendurchmesser. Diese muß vor dem Lochen beseitigt werden, da der Lochdorn anderenfalls verlaufen und damit die Wandstärke der Luppe ungleichmäßig werden kann.

Dem eigentlichen Lochvorgang geht also ein Anstauchvorgang voraus, der dem Verformen in einem Gesenk ohne Gratbahn gleicht. Über die für diesen Anstauchvorgang benötigte Kraft und über die bei einer bestimmten Kraft zu erreichende Formfüllung ist nur wenig bekannt. Es erscheint daher notwendig, die Vorgänge beim Anstauchen in einem Aufnehmer systematisch zu untersuchen, um den Kraftbedarf und die Formfüllung beim Pressen zu ermitteln und zu optimieren.

Im Rahmen dieser Arbeit werden erstmalig für Stahlbolzen die Anstauchkräfte beim Lochvorgang gemessen. Dabei wird der Kraftbedarfsverlauf bis zum vollständigen Anlegen des Blockes an die Aufnehmer-Innenwand unter Berücksichtigung verschiedener Parameter erfaßt. Die Untersuchungsergebnisse sollen die Möglichkeit geben, Loch- und Rohrstrang-Pressen hinsichtlich des Kraftbedarfes zu dimensionieren bzw. in der Fertigung Pressen optimal einzusetzen.

Bei der Herstellung von Luppen durch Lochen werden Innenwerkzeuge verwendet. Diese Warmarbeitswerkzeuge werden beansprucht durch Eigen-, Last- und Wärmespannungen. Setzt man ein eigenspannungsfreies Werkzeug voraus, so sind neben den wenig beeinflussbaren Lastspannungen die Wärmespannungen für seine Haltbarkeit von entscheidender Bedeutung.

Beim Lochen auf einer Presse kommt der Lochdorn mit dem heißen Werkstück in Berührung und erwärmt sich. Mit Rücksicht auf die Festigkeits- und Verschleißigenschaften des Dornes ist eine Temperaturerhöhung nur in beschränktem Maße erlaubt; der Dorn wird daher in den meisten Fällen gekühlt. Unter den vorliegenden Arbeitsbedingungen nimmt die Außenschicht des Dornes eine höhere Temperatur an als die weiter zum Kern liegenden Schichten; es entstehen Wärmespannungen. Außerdem werden durch den stetigen Wechsel zwischen Berührung Werkstück-Werkzeug während des Lochens und der Verweilzeit zwischen zwei Lochungen die Dorntemperatur und ihre Verteilung schwanken.

Die Beanspruchung eines Lochdornes durch Temperaturwechsel und Wärmespannungen ist maßgebend für seine Lebensdauer. Es ist daher wichtig, die Temperatur und ihre Verteilung in Lochdornen zu ermitteln und so zu beeinflussen, daß über den Dornquerschnitt eine möglichst gleichmäßige, niedrige Temperatur erreicht wird.

In der Praxis versucht man, durch geeignete Wahl der Arbeitsbedingungen - z. B. Kühlung, Anwenden einer wärmedämmenden Trennschicht zwischen Werkstück und Werkzeug - die Wärmespannungen im Werkzeug durch Verändern seiner Temperaturbelastung zu vermindern. Der Einfluß der Arbeitsbedingungen auf die Höhe der Dorn-temperatur und ihre Verteilung wurde dabei bisher nur abgeschätzt. Er soll in der vorliegenden Arbeit durch Messungen belegt werden, wobei mit und ohne Dornkühlung gearbeitet wird. Ebenfalls soll der Einfluß einer Schmiermittel-Zwischenschicht auf die vom Werkstück zum Werkzeug übergehende Wärmemenge untersucht werden.

Um später z. B. mit Hilfe eines von Dietrich [ 1 ] entwickelten Differenzenverfahrens die Temperaturverteilung in Lochdornen rechnerisch ermitteln zu können, werden "Wärmeübergangszahlen" beim Arbeiten ohne Kühlmittel bestimmt.

## 2 Erkenntnisstand

Über das Lochen von Stählen gibt es mehrere Veröffentlichungen [ 2; 3; 4 ]. Man versteht aber unter Lochen dabei nur das Einpressen eines Lochdornes in einen Block, der sich in einem Aufnehmer befindet. Dieses Problem wird sowohl beim Lochen auf einer Lochpresse [ 2; 3 ] als auch beim Strangpressen von Rohren [ 4 ] beschrieben.

Über den Vorgang, der dem Lochen vorangeht (das Anstauchen des Blockes an die Aufnehmer-Innenwand), verwendet man im allgemeinen lediglich nichtssagende Redewendungen [ 4 ]. Um dennoch einen Einblick in die Problematik des Warm-Anstauchens im Aufnehmer zu gewinnen, wird die entsprechende Literatur den Randgebieten dieses Vorganges entnommen: dem Stauchen, dem Strangpressen und dem Gesenkschmieden. Bei diesen Verfahren treten ähnliche Probleme wie beim Anstauchvorgang im Aufnehmer auf, so daß ein Vergleich zwischen den einzelnen Umformvorgängen möglich scheint.

Der dem Anstauchen nachfolgende Arbeitsschritt zum Herstellen von Luppen in einem Aufnehmer ist das Lochen der Blöcke. Dabei erwärmen sich die Warmarbeitswerkzeuge. Für ihre Lebensdauer - und damit für die Wirtschaftlichkeit eines Umformverfahrens - ist jedoch das Einhalten von bestimmten Werkzeugtemperaturen von entscheidender Bedeutung. Man hat sich aus diesem Grunde bemüht, den Wärmeübergang vom Werkstück zum Werkzeug durch Bestimmen der im Werkzeug herrschenden Temperatur zu ermitteln. Um die Meßergebnisse von der Form und Größe der Umformapparaturen unabhängig zu machen, bestimmt man den Wärmeübergang kennzeichnende Größen, die Wärmeübergangszahlen.

Man definiert die Wärmeübergangszahl  $\alpha$  als die Wärmemenge, die der Oberflächeneinheit des abkühlenden Körpers in der Zeiteinheit je Grad Temperaturunterschied gegen das Kühlmedium durch dieses entzogen wird:

$$\alpha = dQ \cdot \frac{1}{F \cdot dt (\vartheta_1 - \vartheta_2)}.$$

Die Wärmeübergangszahl  $\alpha$  wurde ursprünglich zur Kennzeichnung des Wärmeüberganges zwischen einer Flüssigkeit (bzw. einem Gas) und einem Festkörper verwendet, wobei man so rechnet, daß man den Wärmestrom je Flächeneinheit der Temperaturdifferenz zwischen der mittleren Temperatur  $\vartheta_{fm}$  einer Flüssigkeit (eines Gases) und der Temperatur einer Wandoberfläche  $\vartheta_{WaO}$  proportional setzt:

$$\frac{dQ}{dt} \sim (\vartheta_{fm} - \vartheta_{WaO});$$

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha \cdot F (\vartheta_{fm} - \vartheta_{WaO}).$$

Setzt man voraus, daß die Wärmekapazität einer zwischen zwei sich berührenden Festkörpern befindlichen Zwischenschicht vernachlässigbar klein ist, so kann man [1; 5] die Definition der Wärmeübergangszahl auch auf den Wärmeaustausch zweier Festkörper anwenden. Die Wärmeübergangszahl stellt hierbei als Proportionalitätsfaktor eine Rechengröße dar, die je nach Festlegung der Bestimmungsgrößen schwanken kann:

$$\frac{dQ}{dt} = \alpha \cdot F (\vartheta_1 - \vartheta_2).$$

Auf die Wärmeübergangszahl und den damit verbundenen Wärmeübergang zwischen zwei Festkörpern soll im folgenden (Kapitel 2.3.1) noch näher eingegangen werden.

## 2.1 Der Warm-Stauchvorgang zwischen planparallelen Platten und im Gesenk

### 2.1.1 Kraft- und Arbeitsbedarf

Mit Hilfe der Plastizitätstheorie versucht man, Voraussagen über die Spannungen im Innern der Werkstücke und über den Bereich der Umformzonen zu machen. Man trifft dazu u. a. folgende Annahmen:

1. Die Werkstoffe sind ideal-plastisch, d. h., die Formänderungsfestigkeit  $k_f$  bleibt während der Umformung konstant;
2. der Verformungsvorgang läuft stationär bzw. quasistationär ab;
3. die Verformung ist parallelepipedisch.

Diese Voraussetzungen treffen für das Anstauchen in einem einseitig geschlossenen Aufnahme bzw. in einem Gesenk nicht zu. Dennoch können gewisse Teilprobleme beim Pressen in Gesenken theoretisch bearbeitet werden.

Jeder Vorgang, bei dem ein Werkstück in eine vorgegebene Form gepreßt wird, gliedert sich grundsätzlich in zwei Verformungsschritte: einmal in einen Stauchvorgang ohne äußeren seitlichen Druck (freies Stauchen zu Beginn des Vorganges), zum anderen in einen Stauchvorgang mit äußerem seitlichen Druck (geführte Umformung) bis zur Ausfüllung des Gesenkes.

Das freie Stauchen zwischen planparallelen Platten wurde - unter Zugrundelegung der Schubspannungshypothese  $\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$  bzw.  $k_f = \sigma_1 - \sigma_3$  - in mehreren Veröffentlichungen behandelt [3; 6; 7], wobei Näheres über den Spannungsverlauf an den Preßflächen sowie über die zu erwartenden Stauchkräfte erläutert wird.

So kam Siebel [3] zu folgender Beschreibung des Spannungsverlaufes beim freien Stauchen zwischen planparallelen Platten:

$$k_w = k_f + p_{fl}; \quad p_{fl}: \text{Fließwiderstand};$$

$$p_{fl} = \int_0^x 2/u \cdot k_f \cdot \frac{dx}{h}. \quad x: \text{Abstand von einer freien Seitenfläche der Probe};$$

$$h: \text{Höhe der Probe.}$$

Daraus ergibt sich für den Spannungsverlauf über den Probenquerschnitt nach Siebel:

$$p_{fl} = 2/u \cdot k_f \cdot \frac{x}{h}; \quad \text{und: } k_w = k_f \left(1 + 2/u \cdot \frac{x}{h}\right); \quad (1)$$

während Geleji [6] zu dem Ergebnis kommt:

$$p_{fl} = k_f \left(e^{\frac{2/u \cdot x}{h}} - 1\right); \quad \text{und: } k_w = k_f \cdot e^{\frac{2/u}{h} \cdot x}. \quad (2)$$

Beide Formeln gelten nur für den Fall, daß der Werkstoff an den Preßflächen gleitet, d. h., nach der Schubspannungshypothese muß der Reibbeiwert  $\mu < 0,5$  sein.

Ein anderes Verfahren [7] geht bei der Bestimmung des Spannungsverlaufes beim freien Stauchen zwischen planparallelen Platten von der von Siebel [3] aufgestellten Formel aus:

$$k_w = k_f \left(1 + 2/u \cdot \frac{x}{h}\right),$$

ersetzt aber die in der Klammer stehenden Größen durch eine Funktion von  $\mu$  und  $\frac{x}{h}$ :

$$k_w = k_f \cdot f\left(\mu; \frac{x}{h}\right), \quad \text{wobei gilt:}$$

$$f\left(\mu; \frac{x}{h}\right) = 1 + a \frac{x}{h} + b \left(\frac{x}{h}\right)^2 + c \left(\frac{x}{h}\right)^4.$$

Die Beiwerte  $a, b, c$  wurden in Kalt-Stauchversuchen mit zylindrischen Proben aus Pantal 19 in Abhängigkeit von deren  $d/h$ -Verhältnis bestimmt [7], wobei sich für Probenverhältnisse  $d/h > 2$  die Beziehung ergab:

$$k_w = k_f \left(1 + 0,92 \cdot \frac{x}{h}\right). \quad (3)$$

Damit beträgt der maximale Formänderungswiderstand nach den Formeln (1), (2), (3) für einen Zylinder mit der Höhe  $h_0 = 40$  mm und dem Durchmesser  $d_0 = 100$  mm bei einem angenommenen Reibbeiwert



von  $\mu = 0,2$ :

$$\text{nach [ 3 ] : } k_{w\max} = k_f \left( 1 + 2 \cdot 0,2 \cdot \frac{50}{40} \right) = 1,5 k_f;$$

$$\text{nach [ 6 ] : } k_{w\max} = k_f \cdot e^{\frac{2 \cdot 0,2 \cdot 50}{40}} = 1,65 k_f;$$

$$\text{nach [ 7 ] : } k_{w\max} = k_f \left( 1 + 0,92 \cdot \frac{50}{40} \right) = 2,15 k_f.$$

Anhand der Unterschiede in den erwähnten Formeln und des Rechenbeispiels ist zu ersehen, daß eine genaue Bestimmung des Formänderungswiderstandes und seines Verlaufs über die Probe selbst bei dem einfachen Vorgang des freien Stauchens zwischen planparallelen Platten schwierig ist.

Beim Warm-Stauchen hat außerdem die Probengröße [ 8 ] einen Einfluß auf den Formänderungswiderstand, und die Bestimmung des Reibbeiwertes  $\mu$  sowie der Formänderungsfestigkeit  $k_f$  ist besonders kompliziert wegen der Abkühlung der Proben.

Führt man die Warm-Umformung des Werkstoffes in einem Gesenk durch, so verhalten sich die Kräfte nach Anliegen der Proben an der Gesenkwand wesentlich anders als beim freien Stauchen [ 9 ]. Diesen Preßvorgang haben hinsichtlich des Arbeitsbedarfs und des Ausfüllens der Hohlform zum ersten Male Pomp, Münker und Lueg [ 10 ] beim Schmieden in einfachen Gesenken beschrieben. Die Versuche wurden mit zylindrischen Proben ( $h_0 = 51 \text{ mm}$ ;  $d_0 = 34 \text{ mm}$ ) unter Hammer und Presse durchgeführt, bei Variation von u. a. Wandneigung des Gesenkes und Abrundung zwischen Gesenkbohrung und Gesenkfläche. Es wird auf die schwierige Erfassung der Umformung hingewiesen, da der Gesenkschmiedevorgang sowohl eine Funktion des Gesenkwerkzeuges (Werkstoff, Form, Oberfläche, Temperatur) als auch des Schmiedestückes (Werkstoff, Form, Oberfläche, Temperatur) und der Umformmaschine (Verformungsgeschwindigkeit) ist.

Trotz dieser großen Anzahl von Einflußgrößen auf den Gesenkschmiedevorgang fehlt es nicht an Bemühungen, den Kraftbedarf beim Pressen im Gesenk zu erfassen. Nach Lange [ 11 ] sind zur Bestimmung des Formänderungswiderstandes bzw. der Kraft allgemein folgende Angaben notwendig:

$$k_w = k_f + p_{fl} + p_f; \quad p_{fl} : \text{Fließwiderstand;} \\ p_f : \text{Summand zur Berücksichtigung} \\ \text{der Formeinflüsse;} \\ P = F_d \cdot k_w; \quad F_d : \text{Projektion von Schmiedestück} \\ \text{und Gratfläche.}$$

Bruchanow und Rebelski [ 12 ] bestimmen den Formänderungswiderstand nach Gubkin zu:

$$k_w = \omega \cdot z \cdot \tau \cdot \sigma_F \quad \omega : \text{Funktion der Verformungsgeschwindigkeit;} \\ z : \text{Funktion der ungleichmäßigen Temperaturverteilung und der unterschiedlichen Umformung im Werkstück (Ungleichmäßigkeitsfaktor);}$$

- $\tau$  : Faktor zur Berücksichtigung von Reibungskräften, Form und Materialspannungen;
- $\sigma_F$ : Fließgrenze (beim Gesenkschmieden zu Ende des Vorganges).

Die Korrekturglieder können nach den von den Verfassern angegebenen Beziehungen [12] ermittelt werden.

Bei der Kraftbestimmung wird sowohl von Lange als auch von Bruchanow und Rebelski gegenüber dem freien Stauchvorgang ein zusätzliches Korrekturglied berücksichtigt, nämlich ein Ungleichmäßigkeitsfaktor ( $p_f$  bzw.  $z$ ), der die ungleichmäßige Verformung beim Gesenkschmieden berücksichtigt. Da die jeweils ermittelten Formänderungswiderstände je nach den Umformbedingungen einen grossen Toleranzbereich aufweisen, kann man aufgrund dieser Rechnungen lediglich Anhaltswerte für den Kraftbedarf beim Gesenkschmieden erwarten.

Geleji [13] ermittelt den Kraftbedarf beim Pressen im Gesenk mit Gratbahn, indem er zunächst durch eine sich nach außen konisch öffnende Form der Gratbahn die Gratbahnreaktion ausschaltet und die Preßkraft im Augenblick des Werkstoffeintrittes in die Gratbahn analog dem Umformvorgang beim Strangpressen ermittelt.

Später wird die bei der Gratbahnreaktion benötigte Kraft bei einem Grat mit parallelen Begrenzungsflächen berechnet und zur Ausgangsformel addiert.

Eine Zusammenfassung und kritische Bewertung der wichtigsten Formeln und Abbildungen zur Berechnung des Kraft- und Arbeitsbedarfs beim Schmieden im Gesenk mit Gratspalt geben Neuberger u. a. [14], Lange [15] und später Hohn [16]. Ihren Ausführungen ist zu entnehmen, daß keines der untersuchten Berechnungsverfahren allgemeingültig ist.

Johne [17] befaßt sich mit der Füllung von Gesenken beim Formpressen ohne Grat. Nach Messen der für eine bestimmte Formfüllung erforderlichen Kraft berechnet er erstmalig für die untersuchten Schmiedestücke (Abb. 1) die Preßkraft während der Kantenfüllung der Gesenkschmiedeteile.

Die Grundlage seiner Berechnung bildet dabei die durch Versuche genau zu ermittelnde Kenntnis der Umformzone während der Kantenfüllung der Proben im Gesenk. Diese Umformzone wird für einen bestimmten Zustand der Kantenfüllung in Abschnitte unterteilt. Für die Rechnung wird eine mittlere Formänderung und Formänderungsgeschwindigkeit sowie eine konstante Probentemperatur angenommen. Nach Errechnen der Spannungsverteilung der Umformzone in radialer Richtung wird über das Trescasche Fließkriterium  $\sigma_1 - \sigma_3 = k_f$  die Spannung in Achsrichtung als Funktion des Probenradius ermittelt. Mit dieser errechneten Axialspannungsverteilung wird schließlich die auf den Gravurboden wirkende Kraft schrittweise berechnet:

$$P_{\text{Boden}} = \int_0^{\left(\frac{d}{2} - \mathfrak{B}\right)} p(r) \cdot 2 \pi \cdot r \, dr$$

$p(r)$ : Spannung als Funktion des Probenradius;  
 $\mathfrak{B}$ : Abmessung der unausgefüllten Kante senkrecht zur Preßrichtung.

Um zur Stempelkraft  $P_{St}$  zu gelangen, ist der Kraft  $P_{Boden}$  ein Scheranteil hinzuzufügen:

$$P_{St} = P_{Boden} + \frac{k_{fm}}{2} \cdot \pi \cdot d (h - \bar{a})$$

$\bar{a}$ : Abmessung der unausgefüllten Kante in Preßrichtung.

Johne [17] gibt als durchschnittliche Abweichung zwischen Rechnung und Versuch 10 % an; es dürfte jedoch schwierig sein, die zur Rechnung benötigten Kenntnisse über die Umformzone für einen beliebigen Preßfall zu erlangen.

Großen Einfluß auf den Kraftbedarf beim Pressen in einem Gesenk haben beim Warm-Umformen die Probengeometrie und die Abkühlung der Proben während des Arbeitsvorganges.

Ernst [18] untersuchte u. a. den Einfluß des Probenvolumens und des  $h_0/d_0$ -Verhältnisses beim Schmieden von verschiedenen Metallen in einfachen rotationssymmetrischen Gesenken. Er stellte auf einer 750-Mp-Reibspindelpresse fest, daß das Steigvermögen des Werkstoffes in die Gravur mit zunehmendem Volumen und  $h_0/d_0$ -Verhältnis ansteigt. Als optimales Verhältnis  $h_0/d_0$  wird  $\approx 1$  angegeben.

Radke [19] führte Steigversuche in einem Fallhammer in Abhängigkeit von  $h_0/d_0$  der Proben bei konstantem  $d_0 = 75$  mm durch. In einem Gesenk mit Gratspalt schmiedete er einen Stahl (etwa Ck 10) und erhielt das günstigste Steigvermögen bei  $h_0/d_0 \approx 0,9$ . Dieser Wert stimmt gut mit dem von Ernst ermittelten überein.

Setzt man ein optimales  $h_0/d_0$ -Verhältnis von 0,9 bis 1,0 voraus, so ist der Kraft- und Arbeitsbedarf noch vom Probenvolumen und damit von der Abkühlung des Werkstückes abhängig. Beck [20] sowie später Stöter [7] haben Anhaltswerte gegeben, um die Abkühlung von Schmiedestücken zu erfassen.

Becks [20] Untersuchungen wurden durchgeführt:

1. ohne Schmiermittel,
2. bei zunderarmer Erwärmung,
3. ohne Gesenkvorwärmung,
4. mit möglichst sauberen Stauchbahnen.

Als Probenwerkstoff wählte er einen Ck 15, als Gesenkwerkstoff 55 NiCrMoV 6 (Werkstoff-Nr. 1.2713).

Aufgrund seiner Versuchsbedingungen kann man erwarten, daß die in der Praxis vorkommenden Probentemperaturen höher als die nach Beck [20] berechneten sind, da in der Fertigung die Gesenke geschmiert werden und die Proben meist verzündert sind, was eine wärmedämmende Wirkung zur Folge hat.

Beck teilt ein Arbeitsspiel in drei Phasen ein:

1. Liegezeit 1: Der Block liegt ohne Krafteinwirkung durch das Verformungsaggregat auf dem Gesenk auf;
2. Druckberührzeit: Der Block wird unter Druck gepreßt;
3. Liegezeit 2: Aufliegezeit nach Beendigung des Umformvorganges.

Ein Schmiedestück verliert bei einem Verformungsvorgang Wärme durch Wärmeleitung, Strahlung und Konvektion. Während der Druckberührzeit (in dieser Zeit findet die größte Abkühlung statt) wird die Wärme fast ausschließlich durch Wärmeleitung von der Probe abgeleitet; die Verluste durch Strahlung und Konvektion sind vernachlässigbar [ 20 ] .

Beck stellte weiter fest, daß die den Wärmeübergang charakterisierende Wärmeübergangszahl von der Rauheit der Berührfläche abhängt und während der Druckberührzeit gegenüber der Liegezeit 1 bei Ck 15 etwa um den Faktor 20 auf ca. 5200 kcal/m<sup>2</sup> h °C ansteigt. Diese Veränderung der Wärmeübergangszahl dürfte darauf beruhen, daß sich die wirkliche Berührfläche zwischen zwei aufeinandergepreßten Oberflächen (Werkstück, Werkzeug) mit steigendem Druck vergrößert.

Stöter [ 7 ] unterteilt die Abkühlung von Proben im Gesenk in mehrere Teilstufen und bestimmt jeweils die sich während des Verformens ändernde Fläche für den Wärmeübergang. Die Fläche, durch welche die Wärme abgeleitet wird, nimmt zuerst langsam, und - wenn der freie Stauchvorgang in eine geführte Umformung übergeht - schneller zu. Sie erreicht zu Ende des Verformungsvorganges, wenn der Probenmantel sich nahezu vollständig an die Gravurwand angelegt hat, ihren Maximalwert.

Durch die Unterteilung der Gesamtabkühlung und durch jeweiliges Einsetzen der errechneten Werte in die von Beck [ 20 ] ermittelten Formeln ist eine genauere Bestimmung der Probenabkühlung möglich. Die zur Verformung der Probe benötigte Umformenergie wird in der Probe zum größten Teil in Wärme umgesetzt. Sie erhöht die jeweilige Probentemperatur und kann nach Siebel [ 3 ] berücksichtigt werden durch die Gleichung:

$$\Delta\vartheta = \frac{\varphi \cdot k_f}{W \cdot c \cdot \gamma}$$

W: mechanisches Wärmeäquivalent,  
c: spezifische Wärme,  
γ: spezifisches Gewicht.

Bei kleinen Formänderungen und dem beim Warm-Umformen niedrigen k<sub>f</sub> ist dieser Einfluß meist vernachlässigbar.

Nach Beck [ 20 ] und Stöter [ 7 ] kann auch die Abkühlung von Proben beim Anstauchen in einem einseitig geschlossenen Aufnehmer näherungsweise berechnet werden, da dieser Vorgang jenem des Gesenkschmiedens ähnelt. Es beträgt danach z. B. die Abkühlung beim Anstauchen von zylindrischen Proben (d<sub>0</sub> = 58 bzw. 60 mm; h<sub>0</sub>/d<sub>0</sub> = 0,5; 2,0; ϑ<sub>pro</sub> = 1150 °C) in einem Aufnehmer (d<sub>A</sub> = 63,2 mm) zwischen 100 und 180 °C bis zum Ende des Umformens unter Druck (ϑ<sub>m</sub> = 0,045 + 0,14 s<sup>-1</sup>).

### 2.1.2 Der Ausfüllungsvorgang beim Anstauchen im Gesenk

Um ein Formgebungsverfahren zu beschreiben, kann man u. a. den Stofffluß während der Umformung verfolgen. Dies geschieht entweder durch unmittelbare oder mittelbare Verfahren. Die erstgenannten geben aufgrund einer eigenen (Korngrenzen, Einschlüsse, Faser Verlauf) oder künstlich erzeugten Struktur (Schichten, Netzlinien, Leuchtraster) direkten Aufschluß über den Formänderungsstand; letztere bedienen sich sekundärer Erscheinungen (Härteverteilung, Strukturveränderung). Untersucht werden entweder der

Originalwerkstoff oder Modellwerkstoffe, die unter Versuchsbedingungen ein dem Originalwerkstoff ähnliches Verformungsverhalten zeigen. Als Modellwerkstoffe für Stahl eignen sich nach Brill [21] z. B. Blei oder Natrium.

Ochrimenko und Carapkin [22] untersuchen den Vorgang des Anstauens im Aufnehmer (beim Gesenkschmieden als Breiten bezeichnet) anhand von Proben aus den Modellwerkstoffen Blei und Aluminium. Die Bolzen werden in einen Aufnehmer ( $d_A = 30$  mm) eingesetzt, der zunächst mit einer Verschlussplatte und dann mit einer Matrize (Düsenöffnung: 6,3 bis 18 mm  $\emptyset$ ) verschlossen ist, und schrittweise gestaucht. Für beide Fälle wird die Vergrößerung der Kontaktfläche Probe-Aufnehmerinnenwand in Abhängigkeit von der Abmessungen der Proben ermittelt (Probendurchmesser: 25 mm;  $h_0/d_0 = 1,2; 2,4; 3,0$ ).

Aus den Untersuchungen ( $h_0/d_0 = 1,2$ ) geht hervor, daß sich beim Verschließen des Aufnehmers mit einer Blindmatrize die beiden Probenstirnflächen bis zum Anlegen der Probe an die Aufnehmerinnenwand gleich verhalten, d. h., der Probenmantel legt sich in halber Probenhöhe linienförmig an die Aufnehmerwand an. Von diesem Augenblick an beginnen die Reibkräfte zwischen Probe und Aufnehmer zu wirken, die der Richtung der Höhenabnahme entgegengerichtet sind: Die Kraft auf die Oberseite der Probe wird größer als die auf die Unterseite wirkende; dadurch wird der Aufnehmer im Bereich der Preßscheibe eher ausgefüllt.

Mit dem  $h_0/d_0$ -Verhältnis der Proben verändert sich die Art des Anlegens der Proben an die Aufnehmer-Innenwand. So stellten Ochrimenko und Carapkin [22] fest, daß sich die Probe bei  $h_0/d_0 = 2,4$  nicht zuerst linienförmig, sondern flächenförmig in halber Probenhöhe anlegt. Bei  $h_0/d_0 = 3$  baucht sich die Probe in Form eines Doppelfasses aus und legt sich ober- und unterhalb der Probenmitte an.

Verwendet man statt der Blindmatrize eine Matrize mit Düsenöffnung, so verschiebt sich die Zone der ersten Berührung Probe-Aufnehmerinnenwand zur Matrize hin.

Johne [17; 23] untersuchte beim Formpressen in Gesenken ohne Gratbahn u. a. das Breiten von scheibenförmigen Bleiprobe. Die zu diesem Zweck geteilten und im Längsschnitt gerasterten Bolzen wurden schrittweise gestaucht und ausgewertet. In Abb. 2 sind die Umformzonen während der Kantenfüllung beim Breiten dargestellt.

Bereits zu Beginn der Kantenfüllung sind zwei gegenüberliegende Haftzonen an Preßstempel und Gravurboden vorhanden; außerdem bildet sich an der senkrechten Gravurwand eine umlaufende Haftzone aus, die mit fortschreitender Ausschmiedung größer wird. Die der Stempelbewegung entgegengerichtete Reibung an der senkrechten Gravurwand bewirkt, daß das Gesenk sich im Bereich der oberen Probenstirnfläche eher als in jenem der unteren füllt und die obere Umformzone flacher wird. Nach vollständig gefüllter oberer Kante beginnt sich die verbleibende untere Umformzone bis zur völligen Ausfüllung der Gravur abzuflachen.

In Abb. 3 ist der von Johne [17] als charakteristisch beim Formpressen ohne Grat bezeichnete Verlauf der Stempelkraft über dem Stempelweg aufgetragen. Er unterscheidet zwei Bereiche: den des freien Stauchens und den der Kantenfüllung. Der Bereich der Kantenfüllung beginnt, wenn der Werkstoff sich beim Breiten an die

senkrechte Gravurwand anlegt. Die Stempelkraft steigt dann bis zur völligen Kantenfüllung auf etwa den fünffachen Betrag der zu Beginn des Anlegens benötigten Stauchkraft an.

Der Formänderungswiderstand und die Auffederung des Gesenkes sind in Abhängigkeit von den Kantenabmessungen  $\bar{a}$  (s. a. Abb. 2) und der Höhe des Stirngrates zwischen Gravurwand und Preßstempel in Abb. 4 für zwei Schmiermittel dargestellt. Der Formänderungswiderstand steigt mit fortschreitender Kantenfüllung ( $\bar{a}$  wird kleiner) stark an und liegt bei der unteren Kante  $\bar{a}_1$  bedeutend höher als bei der oberen. Der Einfluß der Schmiermittel ist hier nur gering und wegen der Streuung der Meßpunkte schwer abzuschätzen, was nach Johne [17] darauf zurückzuführen ist, daß der Werkstoff (Abb. 2) über weite Bereiche an der Gravurwand haftet.

## 2.2 Die Verwendung von Schmiermitteln beim Warm-Umformen unter hoher Flächenpressung

Wie aus der Literatur [z.B. 24; 25; 26; 27] zu ersehen ist, beeinflußt - neben den die Proben kennzeichnenden Werten wie Probengröße, Probenform und Preßtemperatur - die Schmiermittel die Größe des Kraftbedarfes beim Stauchen zwischen planparallelen Platten und im Gesenk. Beim Warm-Umformen sind in bezug auf die Schmiermittel mehrere Gesichtspunkte zu beachten, welche die Auswahl der Schmiermittel insbesondere mit steigender Verformungstemperatur begrenzen. Die Schmiermittel sollen nach Möglichkeit bei den jeweiligen Arbeitstemperaturen folgende Eigenschaften aufweisen:

1. Sie sollen sich bei hohem Druck und hoher Temperatur nicht zersetzen (gleichbleibende Reibung);
2. Schmiermittel müssen eine möglichst große Wärmedämmung zwischen Werkzeug und Werkstück bewirken (Schutz der Werkzeuge);
3. die Viskosität soll über einen weiten Temperaturbereich konstant sein, und die Schmiermittel sollen sich gleichmäßig verteilen (gleichmäßige Verformung);
4. die Schmiermittel sollen nach Möglichkeit eine Oxydation des Werkstückes verhindern;
5. die Schmiermittelauftragung soll leicht zu handhaben und die nach der Verformung am Umformgut haftenden Schmiermittelreste einfach zu entfernen sein.

Es gibt in der Praxis kein Schmiermittel, das allen diesen Anforderungen entspricht. Man ist aus diesem Grunde gezwungen, Kompromisse zu schließen und die Schmiermittel nach den für die verschiedenen Formgebungsverfahren wichtigsten Eigenschaften auszuwählen.

### 2.2.1 Allgemeine Grundlagen der Reibung und Schmierung

Um den Schmiervorgang zu verdeutlichen, sollen kurz einige grundlegende Erläuterungen zum Reibmechanismus bei metallischen Werkstoffen gegeben werden.

Nach Tolkien [24] und Löhr [28] unterscheidet man bei durch Schmiermittel getrennten, aufeinandergleitenden Metallen folgende Schmier- bzw. Reibzustände:

1. Vollschmierung (hydrodynamische Reibung): Die beiden Metalle sind vollkommen durch das Schmiermittel getrennt ( $\mu \leq 0,01$ ). Die Reibverhältnisse werden - soweit das Schmiermittel als Newtonsche Flüssigkeit aufgefaßt werden kann - von dessen physikalischen Eigenschaften beeinflusst, wie z. B. der Druck- und Temperaturabhängigkeit der Viskosität.
2. Mischschmierung (Mischreibung): Die Flächenbelastung wird z. T. hydrodynamisch getragen, und z. T. berühren sich die aufeinandergleitenden Metalle ( $\mu = 0,01$  bis  $0,1$ ), oder sie sind nur durch einen Schmierfilm von molekularen Dimensionen getrennt.
3. Grenzschrnierung (Grenzreibung): Infolge der plastischen Verformung des weicheren Reibungspartners nähern sich die Metalloberflächen bis auf Molekülabstände und die Schmiermittelschicht wird örtlich unterbrochen ( $\mu = 0,1$  bis  $0,3$ ).

Ist der Reibwert  $\mu > 0,3$ , so liegt nach Tolkien [24] der Zustand der trockenen Reibung vor.

Bowden und Tabor [29] machen für ganz bestimmte Modellfälle Angaben über die Reibung zwischen Metallen. Anhand ihrer Erläuterungen kann man erkennen, daß die wahren Zusammenhänge zwischen Reibung und Schmierung nur sehr schwierig zu erfassen sind.

Nach Bowden und Tabor [29] ist die tatsächliche Berührfläche bei unter Normalbelastung aufeinanderliegenden Metallen nahezu proportional der aufgebrachten Belastung, wenn die sich berührenden Rauheitsgipfel kugelförmig, konisch oder pyramidenförmig sind. Sie folgern daraus, daß sich die wirkliche Berührfläche auch bei den technischen Oberflächen ebenso verhält. Folgende Formel gibt die wahre Berührfläche an:

$$F = \frac{N}{p}; \quad \begin{array}{l} F: \text{wahre Berührfläche,} \\ N: \text{Normalkraft,} \\ p: \text{mittlere Fließspannung der Rauheits-} \\ \quad \text{vorsprünge bzw. des weicheren Mate-} \\ \quad \text{rials.} \end{array} \quad (4)$$

Wegen der geringen tatsächlichen Berührfläche zweier aufeinandergleitender Metalle ist der Druck auf diese so groß, daß es zu Verschweißungen kommen kann. Die entstehende Reibkraft teilt sich demnach in zwei Anteile auf: in einen "Furchungsanteil" (das härtere Material durchfurcht das weichere) und in einen "Scheranteil" (Trennen der beim Aufeinandergleiten verschweißten Oberflächen). Der Furchungsanteil ist nach Untersuchungen von Bowden und Tabor [29] bei harten Metallen im Vergleich zum Scheranteil vernachlässigbar; die Reibkraft ist daher angenähert:

$$R = F \cdot S; \quad \begin{array}{l} R: \text{Reibkraft,} \\ F: \text{Fläche der Verschweißungen senkrecht} \\ \quad \text{zum Kraftangriff,} \\ S: \text{Scherfestigkeit der metallischen Ver-} \\ \quad \text{bindungsbrücken.} \end{array} \quad (5)$$

Durch Kombination von Formel (4) und (5) erhält man:

$$R = \frac{S}{p} \cdot N, \quad \text{wobei der Quotient } \frac{S}{p} \text{ als Reibbeiwert } \mu \text{ definiert ist.}$$

Da das Abscheren gewöhnlich im Werkstoff mit der niedrigeren Formänderungsfestigkeit erfolgt, wird /u eine Funktion von dessen Werkstoffeigenschaften. Der Reibbeiwert ist nach Bowden [29] weitgehend temperaturunabhängig, weil  $S$  und  $p$  sich auf den gleichen Werkstoff beziehen und sich gleichsinnig verändern.

Beim Warm-Stauchen von Stahl im Gesenk liegt bei Verwenden der gebräuchlichen Schmiermittel aufgrund der großen plastischen Formänderungen des Metalls und der auftretenden hohen Drücke und Temperaturen im allgemeinen Grenzschmierung vor [24]. Es wird daher im folgenden insbesondere auf diesen Schmierzustand näher eingegangen.

Bei der Grenzschmierung ist der Reibwiderstand von den unter der Grenzschicht liegenden Zonen und von der Art des Schmiermittels abhängig. Der zwischen den beiden Oberflächen liegende Schmierfilm wird bei diesem Schmierzustand örtlich getrennt; es ergibt sich nach Bowden [29] für die Reibkraft folgende Größe:

$$R = F [ a \cdot S_M + (1 - a) \cdot S_G ];$$

$F$ : Fläche, auf der die Last abgestützt wird;

$a$ : Teil dieser Fläche, über dem der Schmierfilm unterbrochen wurde;

$S_M$ : Scherfestigkeit der Verbindungsbrücken bei rein metallischer Berührung;

$S_G$ : Scherfestigkeit der schmierenden Grenzschicht.

In dem speziellen Fall des Stauchens in einem Gesenk oberhalb der Rekristallisationstemperatur ist eine theoretische Schmierstoffbeurteilung - abgesehen von allgemeingültigen Aussagen - nicht möglich, da der Schmiervorgang von anderen Faktoren überlagert wird wie z. B. Werkstoffoberfläche, Probengeometrie, Abkühlung der Bolzen. Beim Gesenkschmieden muß hinsichtlich der Reibung und Schmierung folgendes beachtet werden:

1. Reibung und Schmierung sind von den jeweiligen Arbeitsbedingungen abhängig;
2. durch die sich während der Verformung verändernden Oberflächen (Rauheit, Zunder, Form) sind die Vorgänge nicht exakt reproduzierbar;
3. der Reibvorgang ist meßtechnisch nur schwierig am Objekt erfaßbar.

Man muß also die Eignung eines Schmiermittels anders überprüfen, d. h. Versuche am technischen Objekt selbst machen und leicht meßbare, den Vorgang kennzeichnende Größen (Preßkraft, Ausfüllungsgrad der Gravur) bestimmen.

### 2.2.2 Schmiermittel bei der Warm-Formgebung

Die zum Warm-Pressen von Stahl im Gesenk geeigneten Schmiermittel können nach ihrem Aufbau in folgende vier Gruppen unterteilt werden:

1. Schmiermittel mit schichtförmiger Struktur (z. B. Graphit),
2. Gläser (z. B. W 100 F),
3. Salze (z.B. Soda),
4. Schmiermischungen (z. B. Salz-Graphit-Öl).



Bei den eigenen Versuchen wurde mit einem Schmiermittel auf Graphitbasis, mit einem Glas und mit Phosphatherm gearbeitet (s.Kap. 3.1.4.2). Aus diesem Grunde soll an dieser Stelle lediglich über die aus der Literatur bekannten Eigenschaften dieser Schmiermittel berichtet werden.

Die Schmierwirkung von Graphit kann durch seine Schichtgitterstruktur erklärt werden. Die Kräfte, welche die hexagonal angeordneten Atome dieses Schmiermittels in einer Ebene zusammenhalten, sind wegen des geringeren Atomabstandes größer als jene, welche die einzelnen Schichten zusammenhalten, so daß sich einzelne Lagen bei Schubbelastung trennen. Untersuchungen von Savage [30] beweisen jedoch, daß die Schmierwirkung des Graphits wesentlich durch adsorbierte Gase und Dämpfe beeinflusst wird.

Graphit wird in der Praxis meist als Graphitsuspension in Öl oder Wasser eingesetzt, um das Schmiermittel gleichmäßiger aufbringen zu können. Aus diesem Grunde besteht die Adsorptionsschicht des Graphits i. w. aus diesen beiden Stoffen. Bei hohen Temperaturen gibt der Graphit diese ab, und der Reibbeiwert steigt entsprechend an. Bei weiterem Temperaturanstieg geht Graphit durch Reaktion mit Sauerstoff in Kohlenoxyd über. Die entstehende Gasphase kann nach  $2 \text{ CO} = \text{CO}_2 + \text{C}$  weiter reagieren, was insbesondere bei austenitischen Stählen zur Aufkohlung und Zerstörung des Gefüges führt [31].

Durch Zusätze kann man die bei der Schmierung mit Graphit auftretende Rauchentwicklung vermindern [32] und seine Schmierwirkung und Temperaturbeständigkeit verbessern [33; 34; 35; 36].

Um eine Aufkohlung der Werkstücke zu vermeiden, setzt man vielfach Glas als Schmiermittel ein. Dieser Schmierstoff wurde durch Séjournet [37] bekannt, der zunächst gewöhnliches Fensterglas in Form von Scheiben oder Hülsen beim Strangpreßvorgang zwischen Block und Matrize legte. Das Verfahren wurde später dahingehend verändert [38], daß man die Scheiben aus mehreren Glasschichten mit unterschiedlicher Temperaturleitzahl

$$\left( \frac{\text{Wärmeleitzahl}}{\text{spez. Wärme} \cdot \text{spez. Gewicht}} \right)$$

herstellte, um zu jedem Zeitpunkt des Preßvorganges eine optimale Schmierung zu gewährleisten. Um das Aufbringen des Glases zu verbessern, entwickelten Séjournet und Lambert [39] falt- und wickelbare Bahnen des Schmierstoffes.

Glas ist als Schmierstoff dadurch gekennzeichnet, daß es ohne bestimmten Schmelzpunkt ab einer je nach Zusammensetzung bestimmten Temperatur in den zähflüssigen Zustand übergeht.

Entscheidend für die Verwendung von Glas ist neben seiner Benetzungsfähigkeit in erster Linie sein von der Zusammensetzung abhängiges Viskositätsverhalten.

Als für die Schmierung interessanter Viskositätsbereich wird in der Literatur etwa  $10^2$  bis  $10^3$  Poise angegeben [40; 41]. Nach Versuchen von Čujko u. a. [42] soll beim Warm-Lochen auf einer Presse die Zähigkeit eines Glases bei Lochtemperatur sein:

- a) für die Blockmantelumhüllung: 50 bis 250 Poise
- b) für die Aufgabe unter den Lochstempel: 600 bis 1100 Poise,

bei einer Kornfraktion des Schmiermittels von  $< 0,4$  mm.

Da mit Glas unter bestimmten Bedingungen der Zustand der hydrodynamischen Reibung verwirklicht werden kann [28; 31; 43] und Glas ein ausreichend Newtonsches Verhalten zeigt, wird seine Schmierwirkung neben der Zusammensetzung über die Viskosität durch Druck und Temperatur beeinflusst. Es ist daher einleuchtend, daß die Gläser entsprechend den verschiedenen Umformverfahren ausgewählt werden müssen [42; 44].

Nittel und andere [45] untersuchten die Verwendung von Glas in Form von Schaumglas beim Strangpressen von Stahl. Es zeigte sich jedoch, daß wegen des hohen  $\text{SiO}_2$ -Gehaltes (ca. 70 %) dieses Glases seine Viskosität bei Verformungstemperatur zu groß ist. Außerdem setzt der durch das Herstellungsverfahren bedingte, in den Schaumglaspartikeln eingelagerte Kohlenstoff seine Benetzungsfähigkeit herab.

Verwendet man jedoch Schaumglas als Schmiermittelträger für feingemahlene Glaspartikel, so ist eine gute Schmierwirkung festzustellen. Durch dieses Verfahren war eine Standzeiterhöhung der Preßmatrizen um 75 % bei Preßtemperaturen oberhalb  $1000^\circ\text{C}$  möglich.

Die Vor- und Nachteile beim Schmieren mit Gläsern sind nachfolgend zusammengefaßt:

#### Vorteile:

1. Glas verdampft oder verbrennt nicht bei Verformungstemperatur und ist über einen weiten Temperaturbereich viskos;
2. je nach Zusammensetzung kann Glas in einem Temperaturintervall von  $450$  bis  $1400^\circ\text{C}$  angewendet werden [41];
3. Glas schützt vor Verzunderung, Ent- oder Aufkohlung;
4. aufgrund seiner geringen Wärmeleitfähigkeit [28] von etwa  $\lambda = 1,8$  bis  $2,2$  kcal/m h  $^\circ\text{C}$  (bei  $\vartheta = 700$  bis  $1100^\circ\text{C}$ ) ist ein Wärmeschutz der Werkzeuge zu erwarten [40].

#### Nachteile:

1. Glas ist vor seinem zähflüssigen Zustand fest und hart; es muß somit in eine Form gebracht werden, bei der die Härte nicht zur Wirkung kommt, z. B. Faser- oder Pulverform;
2. Glas ist nach dem Erkalten mit dem Werkstück fest verbunden; eine nachträgliche Entfernung ist schwierig;
3. Glas ergibt eine schlechte Preßgutoberfläche [46].

Ein in der Literatur unter dem Namen "Phosphatherm" beschriebenes Schmiermittel [28; 31; 32; 43; 47] soll die bei der Schmierung mit Glas entstehenden Nachteile bei richtiger Dosierung und Auftragungsweise beseitigen. Phosphatherm bildet frühzeitig eine flüssige, viskose Schmelze, die bei weiterem Temperaturanstieg nicht zu dünnflüssig wird. Es läßt sich in Pulverform oder in wäßriger Lösung auftragen, und die nach der Verformung verbleibenden Rückstände sind mit Wasser oder den üblichen Beizsäuren zu entfernen.

Das Schmiermittel beruht auf eutektischen Phosphatschmelzen, die unter Zusatz von Alkalitetraborat und Schwermetallverbindungen aus dem System  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  aufgebaut sind, wobei der Anteil an Alkalitetraborat etwa 10 % betragen soll [47]. Die richtige molare Zusammensetzung spielt bei Phosphatherm eine entscheidende

de Rolle, da seine Reaktionsbereitschaft sowie sein Erweichungsverhalten von ihr beeinflußt werden.

Berücksichtigt man die notwendigen chemischen Voraussetzungen, so erhält man nichtkorrosive, viskose, klare Schmelzflüsse, die bereits weit unter dem Schmelzpunkt der einzelnen Einsatzstoffe zu erweichen beginnen [31]. Phosphatherm ist ungiftig und in Wasser löslich; es ist in Abhängigkeit von seiner Zusammensetzung über einen weiten Temperaturbereich anwendbar.

Das Schmiermittel haftet gut auf Metallflächen. Dies beruht auf einer chemischen Reaktion mit dem Metall, wobei sich unter der geschmolzenen, hydrodynamisch wirkenden Schmierstoffschicht eine Metallphosphatschicht bildet [31], die ebenfalls gute Schmier-eigenschaften aufweist.

Nach Graue u. a. [31; 47] soll sich das Schmiermittel in der praktischen Erprobung bei verschiedenen Umformverfahren (Lochen, Strangpressen, Gesenkschmieden) bewährt haben.

### 2.2.3 Auswirkung von Schmiermitteln auf Reibverhalten, Kraft- und Arbeitsbedarf beim Warm-Umformen

Jedes Formgebungsverfahren der Umformtechnik ist mit Reibung in der Berührfläche Werkstück-Werkzeug verbunden. Die Reibung erhöht Kraft- und Arbeitsbedarf des Umformvorganges und damit auch die Beanspruchung der Werkzeuge und der Umformmaschinen. Als kennzeichnende Größe hierfür wird in der Umformtechnik gewöhnlich der Reibbeiwert  $\mu$  verwendet. Seine Größe ist beeinflusbar durch Schmiermittel.

Will man bei der Warm-Formgebung den Reibbeiwert bestimmen, so muß mit der Versuchsanordnung die Wechselwirkung eines elastischen Körpers (Werkzeug) und eines plastischen Körpers (Werkstück) bei großen Formänderungen erfaßt werden können.

Ein Meßverfahren, das diesen Anforderungen bei einfachem Versuchsaufbau zu genügen scheint, ist der Ringstauchversuch. Nach Burgdorf [48] kann dabei der Reibbeiwert ohne Kenntnis der Kräfte und Spannungen aus den Änderungen der geometrischen Abmessungen der Probe - insbesondere aus der Änderung des Innendurchmessers - ermittelt werden. Auf der Grundlage dieses Verfahrens untersuchte Geiger [49; 50] die Temperaturabhängigkeit des Reibbeiwertes unter Verwendung von Schmiermittel-Zwischenschichten bis zu Schmier-spalttemperaturen von 750 °C. Die durch Versuche bestimmte, mittlere Schmier-spalttemperatur ergab sich dabei unabhängig von den verwendeten Schmiermitteln als etwa halb so groß wie die Proben-Ausgangstemperatur. War sie größer als 350 °C, so wurde das Werkzeug vorgewärmt; jedoch ist ein Einfluß der Probenabkühlung auf die Meßergebnisse wahrscheinlich nicht zu vermeiden.

Mit den idealen Reibverhältnissen des Ringstauchversuches können die bei einem Umformverfahren in der laufenden Fertigung auftretenden Reibverhältnisse nur angenähert beschrieben werden; besonders die bei geführter Umformung auftretende große Oberflächenveränderung und ungleichmäßige Spannungsverteilung in der Umformzone führen zu völlig anderen Reibbedingungen.

Pawelski [51; 52] verwendet bei seinen Untersuchungen ein Reibungsmeßgerät, das auf dem Ziehen von Proben mit rechteckigem Quer-

schnitt durch zwei Ziehbacken beruht. Das Gerät ermöglicht es, plastische Formänderungen des Werkstückes bei hohen Drücken im Kontaktbereich Werkstück-Werkzeug durchzuführen. Durch Messen von Ziehkraft, Querkraft und Ziehhol-Neigungswinkel ist es möglich, den Reibbeiwert zu bestimmen. Die zugehörige Proben temperatur (Raumtemperatur bis etwa 800 °C) ermittelt Pawelski durch ein in die Probe eingeschobenes Thermoelement.

Mit diesem Reibungsmeßgerät bestimmte Löhr [28] den Reibbeiwert für Temperaturen oberhalb 800 °C, indem er - um ein Abreißen der Ziehangel zu vermeiden - die Proben in das Gerät hineindrückte.

Eine andere Möglichkeit, Schmiermittel zu beurteilen, ist dadurch gegeben, daß man die Größen (z. B. Kraft- und Arbeitsbedarf, Gleitung) bestimmt, welche die Reibung Werkstück-Werkzeug charakterisieren.

Dies geschah zunächst, indem man Warm-Stauchversuche zwischen planparallelen Platten durchführte [53; 54]. Untersuchungen von Tolkien [24] zeigen jedoch, daß die Preßkräfte beim freien Stauchen ( $d_0/h_0 = 0,67$ ;  $d_0 = 25$  mm; Preßgeschwindigkeit: 0,1 m/s) und bei Schmierung mit einer Dispersion von kolloidalem Graphit in Wasser oder in Mineralöl in der Größenordnung der beim Stauchen zwischen ungeschmierten Preßplatten gemessenen liegen. Bei Graphit-Öl-Schmierung waren sie sogar größer.

Auf der Schwungradspindelpresse ergaben sich bei einer Auftreffgeschwindigkeit des Stößels von 0,3 m/s beim freien Stauchen von Stahlproben ( $d_0/h_0 = 0,625$ ) und bei Graphit-Wasser-Schmierung um 23 % kleinere, bei Wasserglas-Schmierung um 13 % kleinere Kräfte als beim Stauchen ohne Schmierung.

Tolkien [24] schloß aus diesen Untersuchungen, daß der Hauptanteil der Umformkraft auf Schiebungen innerhalb des Werkstoffes unterhalb der Preßfläche entfällt und der Betrag der äußeren Reibung Werkstück-Werkzeug klein ist. Daher ist es sinnvoller, die Untersuchung der Reibkraft in Abhängigkeit von der Schmierung an Umformvorgängen vorzunehmen, bei denen die äußere Reibung größer ist als beim Stauchen zwischen planparallelen Platten.

Eine Eignungsprüfung für Schmiermittel, die beim Anstauchvorgang im Gesenk verwendet werden sollen, wird also zweckmäßigerweise auch im Gesenk durchgeführt.

Bei Untersuchungen von Tolkien [24] wurden u. a. mehrere Schmiermittel beim Schmieden im Gesenk oberhalb der Rekristallisationstemperatur überprüft. Aus den Kraft-Weg-Kurven seiner Versuche geht hervor, daß erst nach Anliegen der Proben an der Gesenkwand eine verstärkte Schmierwirkung einsetzt. Während des freien Stauchens im Gesenk ist die äußere Reibung im Gegensatz zu der beim geführten Umformen auftretenden gering; die Kräfte weichen im ersten Teil der Kurve kaum von den bei der ungeschmierten Probe festgestellten ab.

Dispergiert man Graphit oder Molybdändisulfid in Wasser, so ist der bei vorgewärmten Gesenken durch Wasserverdunstung entstehende Trockenfilm einem feuchten Ölfilm bei einer Öldispersion überlegen. Beide Schmiermittel - Graphit und Molybdändisulfid - zeigen bei den hohen Drücken im Gesenk gute Schmiereigenschaften.