



# TU Clausthal

Institut für Metallurgie

– Werkstoffumformung –

## Praktikumsskript

U3: Tiefziehen und mechanische Kennwerte

Stand: 17.12.2015

**ARBEITSVERSION**

Versuchsdatum: \_\_\_\_\_

Versuchszeit: \_\_\_\_\_

Betreuer: Dr.-Ing. Stephanie Duwe

Stephanie.Duwe@tu-clausthal.de

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	i
Abbildungsverzeichnis .....	iii
1 Einleitung.....	1
2 Tiefziehen .....	3
2.1 Werkstoffe zum Tiefziehen .....	3
2.2 Ziehverhältnis.....	4
2.3 Tiefzieh-Prüfverfahren (Ericksenprüfung) .....	5
2.4 Tiefziehen rotationssymmetrischer Körper im Erstzug .....	6
2.5 Bestimmung der Ziehkraft $F_{ges}$ .....	7
2.5.1 Ideelle Umformkraft.....	7
2.5.2 Ermittlung der Reibkräfte zwischen Ziehring und Blechhalter ( $F_{RN}$ ).....	8
2.5.3 Ermittlung der Reibkraft an der Ziehringrundung.....	9
2.5.4 Biegung um die Ziehringrundung.....	9
2.5.5 Berechnung der Ziehkraft mit Hilfe des Umformwirkungsgrades .....	10
2.6 Werkzeuggestaltung .....	11
2.6.1 Ziehstempel .....	11
2.6.2 Ziehring .....	11
2.6.3 Ziehspalt.....	11
2.7 Tiefziehen ohne Niederhalter .....	12
2.8 Tiefziehen mit Weiterzug.....	13
2.9 Tiefziehen rechteckiger Teile.....	14
2.10 Versagensarten beim Tiefziehen .....	16
2.11 Zipfelbildung .....	18
2.12 Berechnung des Zuschnittsdurchmessers runder Ziehteile.....	19
2.13 Einfluss der Ziehgeschwindigkeit und der Schmierung sowie der Rauigkeit des Tiefziehwerkstoffes auf das Tiefziehen.....	20

## Inhaltsverzeichnis

3	Mechanische Kennwerte .....	21
3.1	Formänderungsvermögen.....	21
3.2	Formänderungsfestigkeit $k_f$ .....	21
3.3	Verfahren zur Bestimmung von $k_f$ .....	23
3.4	Der Zugversuch .....	23
3.4.1	Bestimmung von $k_f$ aus einem Zugversuch (Näherung) .....	23
3.4.2	Zugversuch an vorgeformten Blechstreifen.....	24
3.5	Zylinderstauchversuch zwischen ebenen Bahnen .....	25
3.6	Kegelstauchversuch.....	26
3.7	Flachstauchversuch.....	26
3.8	Torsionsversuch .....	27
3.9	Bestimmung von Werkstoffkennwerten .....	28
	Literaturverzeichnis .....	31

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Beispiele für Tiefziehbauteile .....	1
Abbildung 1-2: Einteilung der Tiefziehverfahren je nach Art der Krafteinbringung (nach DIN 8584) .....	2
Abbildung 2-1: Für Ziehverhältnis $\beta$ benötigte Maße .....	4
Abbildung 2-2: Schematische Darstellung der Erichsenprüfung.....	5
Abbildung 2-3: Spannungsverteilung beim Tiefziehen.....	6
Abbildung 2-4: Spannungsverteilung am Volumenelement.....	8
Abbildung 2-5: Reibkräfte an der Ziehringrundung .....	9
Abbildung 2-6: Auftretende Spannungen in der Ziehtteilecke.....	15
Abbildung 2-7: Einflussgrößen auf das Tiefziehergebnis .....	16
Abbildung 2-8: Faltenbildung beim Tiefziehen.....	17
Abbildung 2-9: Schematische Darstellung der Zipfelbildung.....	18
Abbildung 2-10: Querschnitt eines Napfes .....	19
Abbildung 3-1: Fließkurven bei a) Kalt- und b) Warmumformung.....	22

## 1 Einleitung

Die für die Blechumformung sehr wichtige Untergruppe des Tiefziehens ist definiert als Zugdruckumformen eines Bleches in einen Hohlkörper (Tiefziehen im Erstzug), oder eines Hohlkörpers in einen Hohlkörper kleineren Umfangs (Tiefziehen im Weiterzug) ohne gewollte Veränderung der Blechdicke.

Die Bandbreite der herstellbaren Formen und Abmessungen reicht von Bauteilen mit geringsten Querschnitten und großer Ziehtiefe (hülsenförmige Bauteile) hin zu großflächigen Teilen mit unterschiedlicher Ziehtiefe (Karosserieteile, Badewannen, etc.). Als Beispiele seien genannt:

Fahrzeugbau:	Rahmen-, Fahrgestell-, Karosserieteile
Allgemeine Maschinenteile:	Böden, Behälter, Gehäuse, Verkleidungen
Haushaltsgeräte:	Verkleidungen, Waschmaschinen, Küchengerätschaft, Spülwannen



Abbildung 1-1: Beispiele für Tiefziehbauteile

Je nach Art der Krafteinbringung werden nach DIN 8584 die in Abbildung 1-2 dargestellten Untergruppen unterschieden.

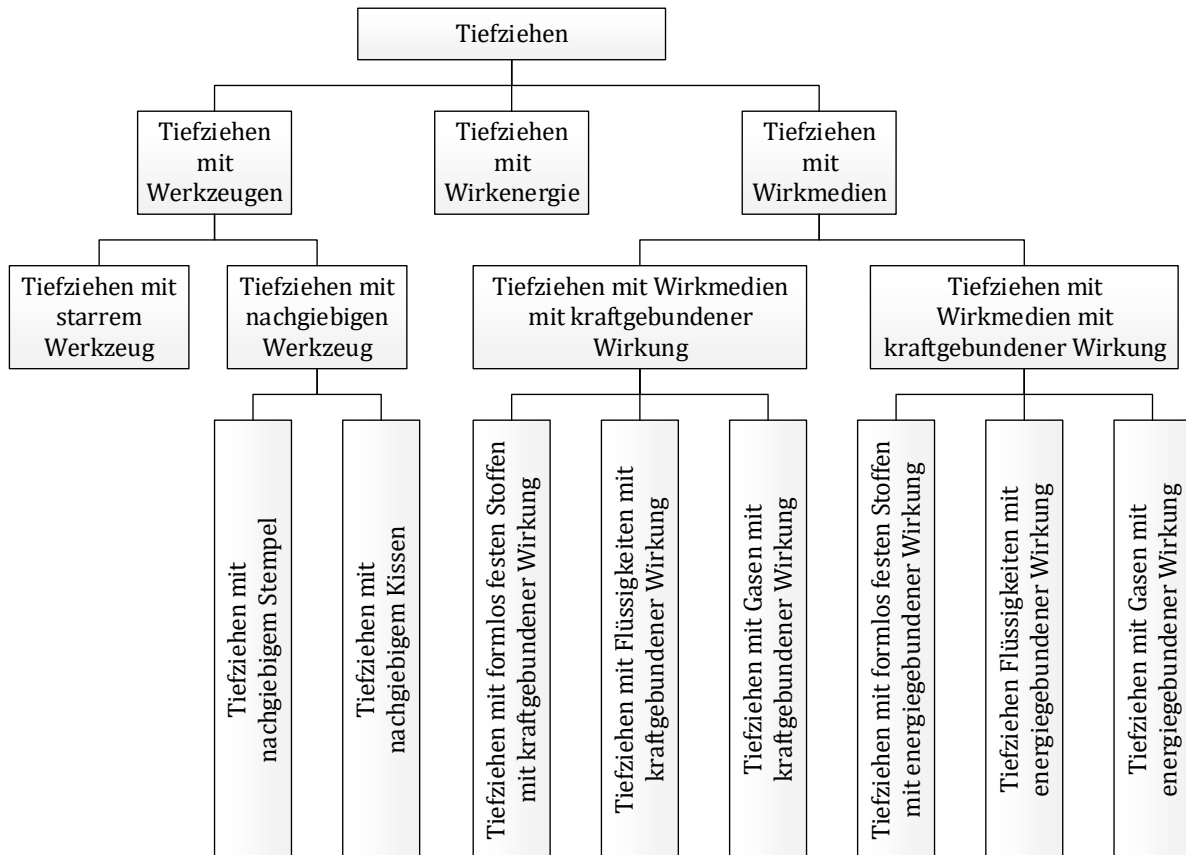


Abbildung 1-2: Einteilung der Tiefziehverfahren je nach Art der Krafteinbringung (nach DIN 8584)

## 2 Tiefziehen

### 2.1 Werkstoffe zum Tiefziehen

Die zum Tiefziehen geeigneten Blechwerkstoffe müssen im Zug-Zug-, sowie im Zug-Druck-Bereich möglichst gute Umformeigenschaften aufweisen. Für die Beurteilung der Tiefzieheigenschaften ergeben sich zwei Kriterien:

1. Der  $R$ -Wert
2. Das Grenzziehverhältnis  $\beta_{\max}$  (siehe Kapitel 3).

Der  $R$ -Wert wird aus dem Flachzugversuch gewonnen. Nach Gleichung 2-1 ergibt er sich zu:

$$R = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{s}{s_0}} = \frac{\varphi_b}{\varphi_s} \quad (2-1)$$

$R$  gibt somit das Verhältnis der Umformgrade von Breiten- zu Blechdickenrichtung beim Flachzugversuch an. Der  $R$ -Wert wird in drei Winkeln ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ) bestimmt. Gemäß Gleichung 2-2 wird aus den Ergebnissen der Mittelwert der „senkrechten Anisotropie“  $R_m$  bestimmt.

$$R_m = \frac{1}{4} \cdot (R_0 + 2 \cdot R_{45} + R_{90}) \quad (2-2)$$

Beim Tiefziehen bleibt die Blechdicke per Definition konstant. Um dies zu gewährleisten sollte  $R_m$  möglichst groß sein. Ein großer  $R$ -Wert bedeutet zugleich, dass eine geringere Ziehkraft benötigt wird und die übertragbare Ziehkraft höher ist. Bei  $R_m > 1,25$  wird von guter Tiefzieheignung gesprochen.

Da allgemein der  $R$ -Wert vom Winkel zur Walzrichtung abhängt, wird in Gleichung 2-3 eine ebene Anisotropie (oder Flächenisotropie) definiert.

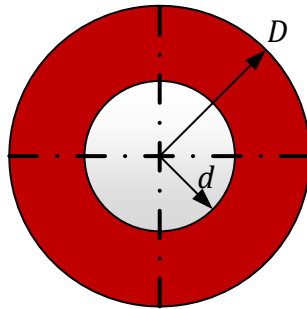
$$\Delta R = 2 \cdot (R_m - R_{45}) \quad (2-3)$$

$\Delta R$  bestimmt hierbei die Zipfelbildung beim Tiefziehen kreiszylindrischer Näpfe. Man unterscheidet zwei Fälle:

1.  $\Delta R > 0$  : Zipfel in  $0^\circ$  und  $90^\circ$  Richtung
2.  $\Delta R < 0$  : Zipfel in den zwei Diagonalenrichtungen.

## 2.2 Ziehverhältnis

Zur Kennzeichnung des Ausmaßes einer Umformung, welche das Ziehteil erfährt, wird in der Praxis das Ziehverhältnis  $\beta_{\text{ges}}$  verwendet. Dieser ergibt sich gemäß Gleichung 2-4 als Verhältnis des Ronden- zum Innendurchmesser des fertigen Napfes, welche in Abbildung 2-1 gezeigt sind. Weiterhin gibt  $n$  die Gesamtzahl der Züge an.



$$\beta_{\text{ges}} = \frac{D}{d_n} \quad (2-4)$$

Abbildung 2-1: Für Ziehverhältnis  $\beta$  benötigte Maße

Wird das Ziehverhältnis zu groß gewählt, reißt das Werkstück entweder im Bereich der Stempelkantenrundung oder im Übergang von Rundung zu Zarge ab. Das Ziehverhältnis, bei dem ein Napf gerade noch ohne Auftreten eines Bodenreißers gezogen werden kann, wird als  $\beta_{\text{max}}$  bezeichnet und hängt von folgenden Parametern ab:

1. Reibbedingungen an Stempel und Ziehring:  
 $\beta_{\text{max}}$  steigt, je weniger Reibung an Ziehring und Niederhalter auftritt und je höher der Reibwert  $\mu$  am Stempel ist.
2. Bezogene Blechdicke  $\frac{s}{d}$ :  
 Das Grenzziehverhältnis sinkt, wenn die bezogene Blechdicke abnimmt.
3. Werkstoff:  
 Das Reibungsverhalten wird nicht nur durch die Schmierung, sondern auch von der Werkstoffpaarung (Werkstück/Werkzeug) und der Oberflächenbeschaffenheit der Reibpartner beeinflusst.
4. R-Wert:  
 Je größer der R-Wert, desto größer ist das Grenzziehverhältnis
5. n-Faktor:  
**Zu Beginn des Tiefziehens erfolgt ein kombiniertes Tief- und Streckziehen. Für das Streckziehen ist ein hoher n-Faktor notwendig. WAS IST EIN N-FAKTOR?**
6. Ziehgeschwindigkeit:  
 Bei kreiszylindrischen Teilen hat die Tiefziehgeschwindigkeit nur geringen Einfluss auf das Grenzziehverhältnis. Beispielsweise nimmt bei Karosserieteilen  $\beta_{\text{max}}$  mit zunehmender Ziehgeschwindigkeit ab. Da bei hydraulischen Pressen die Kraftaufbauzeit länger ist als bei mechanischen Pressen, lässt sich mit diesen ein größeres  $\beta_{\text{max}}$  erreichen.



### 2.3 Tiefzieh-Prüfverfahren (Ericksenprüfung)

Eines der häufigsten Verfahren zur Blechprüfung ist die sogenannte Ericksenprüfung (siehe: DIN 50101 und 50102). Eine direkte Abhängigkeit zum Verfestigungsexponenten  $n$  ist dabei feststellbar. Dieses Verfahren wird hauptsächlich für Blechdicken von 0,2 – 6,0 mm angewandt. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt eine skizzierte Darstellung.

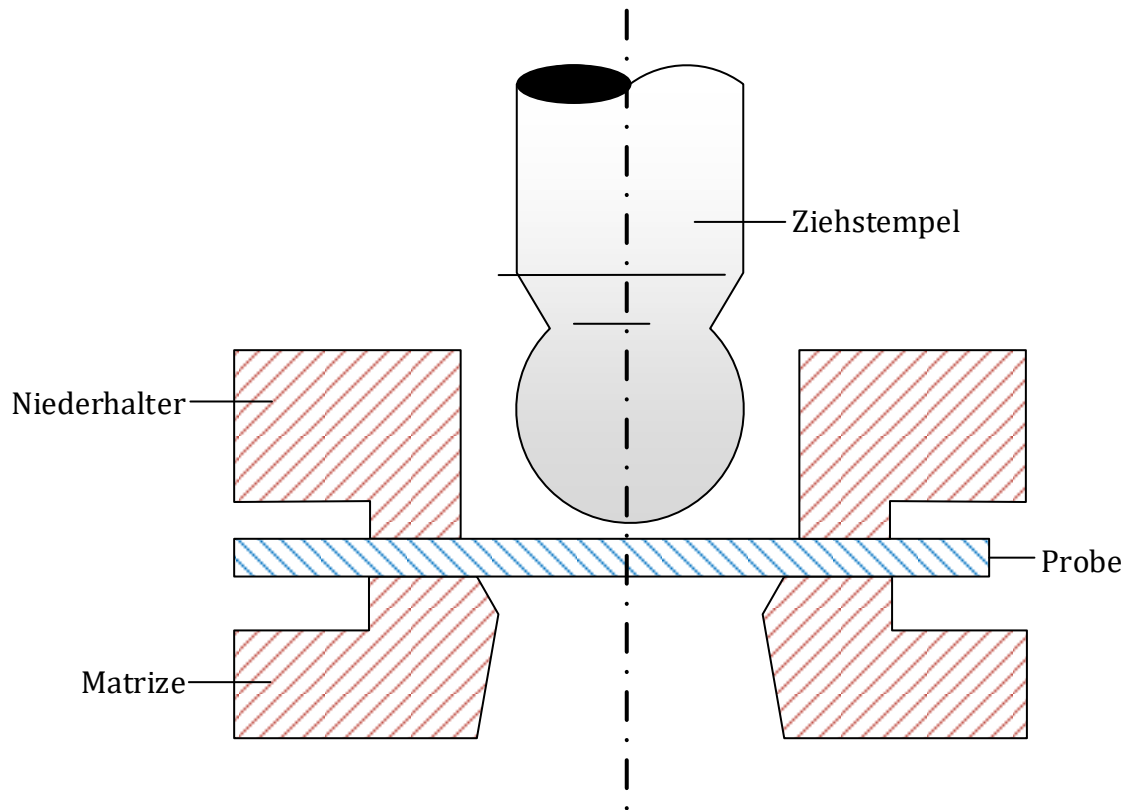


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung der Ericksenprüfung

Bei diesem Prüfverfahren wird der Stempel bis zur Rissbildung in das Blech gedrückt. Die Eindringtiefe des Stempels wird gemessen, diese bestimmt den Ericksenindex IE, welcher in DIN 50101 standardisiert ist.

Weitere Prüfverfahren sind:

- Keilzugprüfverfahren nach Sachs
- Näpfchen-Tiefziehprüfung nach Swift (Ermittlung der Neigung zur Zipfelbildung)
- Näpfchen-Tiefziehprüfung nach Fukui

## 2.4 Tiefziehen rotationssymmetrischer Körper im Erstzug

Aus einer Blechscheibe (Ronde) wird durch gemeinsame Anwendung von Druck- und Zugspannung ein dreidimensionaler Körper gezogen. Die Umformung im Flansch erfolgt dabei unter radialer Zug-, tangentialer Druckspannung und der Normalspannung ( $\sigma_r, \sigma_t, \sigma_n$ ). Dies ist in Abbildung 2-3 skizziert.

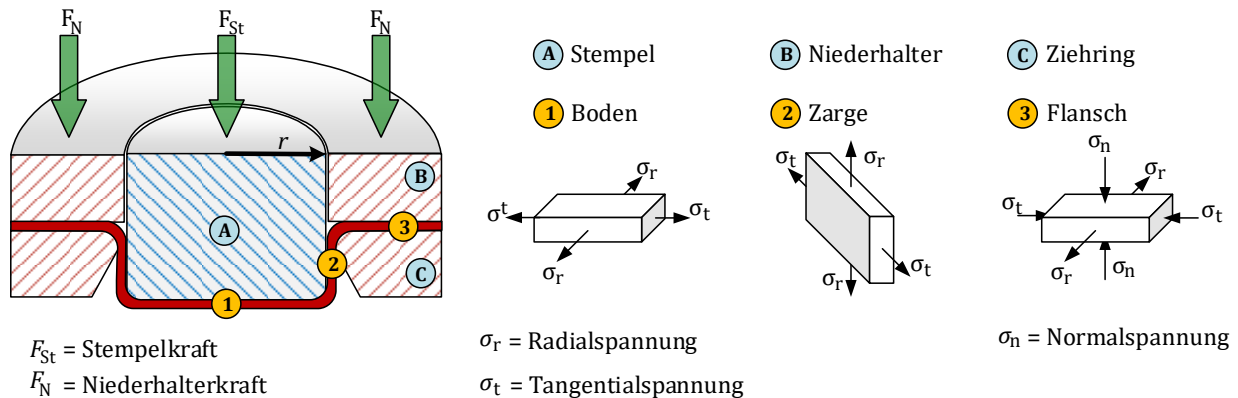


Abbildung 2-3: Spannungsverteilung beim Tiefziehen

Der Vorgang des Tiefziehens teilt sich in zwei Teilverfahren auf: Zu Beginn des Umformvorgangs wird der Ziehteilboden durch Streckziehen gebildet. Nach Ausbildung des Ziehteilbodens schließt sich das eigentliche Tiefziehen an.

Unter der Wirkung tangentialer Druckspannung versucht der Rondenrand auszuknicken (Faltenbildung 1. Ordnung). Dies wird durch den Einsatz eines Niederhalters verhindert. Je nach Anordnung und Bauweise geht die Relativbewegung vom Stempel oder vom Ziehring aus.

Das Tiefziehen mit Niederhalten erfolgt derart, dass eine Ronde mit dem Durchmesser  $d_0$  zwischen Ziehring und Niederhalter eingelegt wird. Die Ronde wird am äußeren Rand durch den Ziehring gehalten und vom Stempel in die Öffnung des Ziehrrings gedrückt. Die für die Umformung benötigte Kraft wird vom Stempel über den Boden und den bereits umgeformten Teil des Werkstücks in die Formgebungszone (Flansch zwischen Ziehring und Niederhalter) übertragen. Der Werkstoff fließt somit über die Ziehkante aus dem Rand heraus nach. Die Kraft des Niederhalters sollte nur so groß sein, dass eine Faltenbildung vermieden wird und der Blechflansch gleichzeitig nicht vollständig fixiert wird, was ein Nachfließen des Werkstoffes verhindern und Rissbildung zur Folge hätte.

Die Anwendung eines Niederhalters ist erforderlich, wenn GLEICHUNG 2-5 erfüllt ist. Hierbei gibt  $s_0$  die Ausgangsdicke des Blechs an.

$$25 < \frac{d_0}{s_0} < 40 \quad (2-5)$$

Zur Berechnung des Niederhalterdrucks ergibt sich laut Siebel Gleichung 2-6.

$$p_n = (0,002 \dots 0,0025) \cdot \left[ (\beta - 1)^3 + 0,5 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{d_0}{s_0} \right] \cdot R_m \quad (2-6)$$

## 2.5 Bestimmung der Ziehkraft $F_{ges}$

Die Ziehkraft setzt sich aus vier Anteilen zusammen:  $F_{ges} = F_{id} + F_{RR} + F_{RN} + F_B$

$F_{id}$  = Kraft für idealen Umformvorgang

$F_{RR}$  = Reibkraft an der Ziehringrundung

$F_{RN}$  = Reibkraft zwischen Ziehring und Blechhalter

$F_B$  = Rückbiegekraft

### 2.5.1 Ideelle Umformkraft

Die Berechnung der idealen Umformkraft ergibt sich aus der Gleichgewichtsbetrachtung der Kräfte an einem Volumenelement im Flansch, siehe hierzu Gleichung 2-7.

$$(\sigma_r + d\sigma_r) \cdot (r + dr) \cdot d\alpha \cdot s_0 - \sigma_r \cdot r \cdot d\alpha \cdot s_0 + 2 \cdot |\sigma_t| \cdot s_0 \cdot dr \cdot \sin\left(\frac{d\alpha}{2}\right) = 0 \quad (2-7)$$

Werden kleine Winkel angenommen, vereinfacht sich  $\sin\left(\frac{d\alpha}{2}\right)$  annähernd zu  $\left(\frac{d\alpha}{2}\right)$ . Weiterhin seien Produkte von Differentialen annähernd zu vernachlässigen. Insgesamt vereinfacht sich Gleichung 2-7 somit zu Gleichung 2-8.

$$d\sigma_r = -\frac{dr}{r} \cdot (\sigma_r + \sigma_t) \quad (2-8)$$

Der Zusammenhang von  $\sigma_r$  und  $\sigma_t$  wird anhand der Trescaschen Fließbedingung (siehe hierzu Skript: Grundlagen der Umformtechnik) gefunden, siehe Gleichung 2-9.

$$\sigma_I - \sigma_{II} = k_f \quad (2-9)$$

Wird nun  $\sigma_I = \sigma_r$  und  $\sigma_{II} = -\sigma_t$  gesetzt, ergibt sich Gleichung 2-10.

$$\sigma_r + \sigma_t = k_f \quad (2-10)$$

Da die Fließbedingung beim Tiefziehen nach Tresca im Durchschnitt um ca. 15 % zu geringe Werte ergibt, wird ein Korrekturfaktor in die Gleichung einbezogen.

$$\sigma_r + \sigma_t = 1,15 \cdot k_f \quad (2-11)$$

Aus 2-8 und 2-9 folgt Gleichung 2-12. Dieser folgt durch Integration und Einsetzen der Grenzen Gleichung 2-13.

$$d\sigma_r = -\frac{d_r}{r} \cdot (1,15 \cdot k_f) \quad (2-12)$$

$$\sigma_r = 1,15 \cdot \bar{k}_f \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (2-13)$$

Hierbei gibt  $\bar{k}_f$  nach Gleichung 2-14 die mittlere Fließspannung im Flansch an.

$$\bar{k}_f = \frac{1}{2} \cdot (k_{f,1} + k_{f,2}) \quad (2-14)$$

Die ideale Umformkraft ergibt sich somit nach Gleichung 2-15. Hierbei gilt  $d_m = d_0 + s_0$ .

$$F_{id} = \pi \cdot d_m \cdot s_0 \cdot 1,1 \cdot \bar{k}_f \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right) \quad (2-15)$$

## 2.5.2 Ermittlung der Reibkräfte zwischen Ziehring und Blechhalter ( $F_{RN}$ )

Bei Betrachtung des Volumenelements ergibt sich bezüglich der Reibschubspannung das in *Abbildung 2-4* dargestellte Spannungsbild.

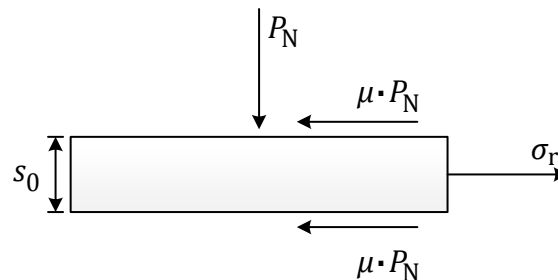


Abbildung 2-4: Spannungsverteilung am Volumenelement

Die Spannung  $\sigma_r$  ergibt sich aus den Gleichungen 2-16 und 2-17. Hierbei bezeichnet  $R$  den Außenradius und  $P_N$  den Niederhalterdruck. Aus dem Kräftegleichgewicht am Volumenelement aus *Abbildung 2-4* folgt:

$$\sigma_r \cdot s_0 = 2\mu \cdot P_N \cdot (R - r) \quad \text{bzw.} \quad (2-16)$$

$$\sigma_r = 2\mu \cdot \frac{P_N}{s_0} \cdot (R - r) \quad (2-17)$$

Hieraus folgt die Reibkraft  $F_{RN}$ .

$$F_{RN} = \pi \cdot d_m \cdot \mu \cdot P_N \cdot (R - r) \quad (2-18)$$

### 2.5.3 Ermittlung der Reibkraft an der Ziehringrundung

Die an der Ziehringrundung auftretenden Reibkräfte sind in *Abbildung 2-5* aufgezeigt.

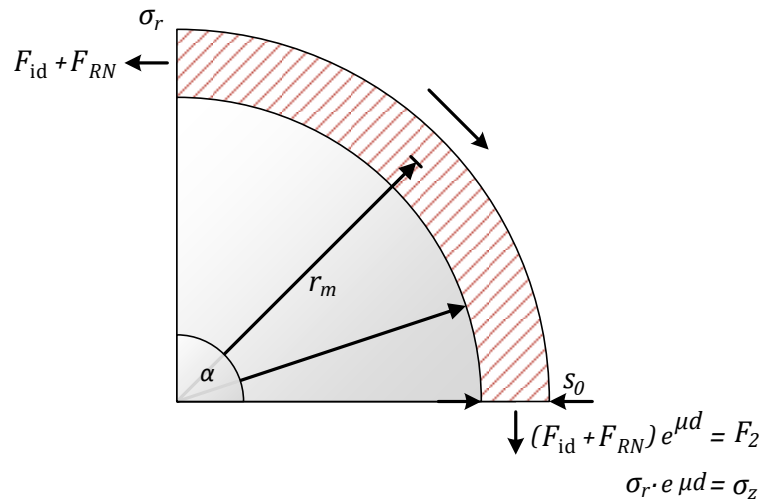


Abbildung 2-5: Reibkräfte an der Ziehringrundung

Durch die Reibung an der Ziehringrundung werden die Kräfte  $F_{id}$  und  $F_{RN}$  gemäß der Eytelwein'schen Gleichung (2-19) erhöht.

$$F_2 = (F_{id} + F_{RN}) \cdot e^{\mu x} \quad (2-19)$$

$F_2$  ist die Ziehkraft in der Zarge ohne den Biegeanteil um die Ziehringrundung. Auf die Spannung reduziert und für  $\alpha = 90^\circ$  ergibt sich: **GLEICHUNGEN UND BESCHRIFTUNGEN ÜBERPRÜFEN**

$$\sigma_z = \sigma_r e^{\frac{\mu \pi}{2}} \quad (2-20)$$

### 2.5.4 Biegung um die Ziehringrundung

Das Blech wird im Bereich der Ziehringrundung zweifach gebogen. Die mittlere Faser wird am Einlauf auf den Radius  $r_m$  gebogen. Am Auslauf aus der Ziehringrundung erfolgt das Rückbiegen. Die Biegearbeit  $W$  ist das Produkt aus Biegemoment  $M_b$  und Biegewinkel  $\alpha$ .

$$W = M_b \cdot \alpha = F_1 \cdot r_m \cdot \alpha \Rightarrow F_1 = \frac{M_b}{r_m} \quad (2-21)$$

Mit der Annahme, dass an den Außenfasern des „Biegeteils“ gerade die Fließspannung  $k_f$  wirkt, gilt Gleichung 2-22.

$$M = \frac{1}{4} k_f \cdot b \cdot k_f^2 \quad (2-22)$$

Hieraus ergibt sich die gesamte Ziehkraftformel nach Gleichung 2-23.

$$F_{z\_max} = \pi \cdot d_m \cdot s_0 \cdot \left( e^{\mu \frac{\pi}{2}} \left( 1,1 \cdot k_{fm1} \cdot \ln \left( \frac{d_p}{d_m} \right) + \frac{2 \cdot \mu \cdot F_N}{\pi \cdot d \cdot s_0} \right) + k_{fm2} \cdot \frac{s_0}{2 \cdot r_R} \right) \quad (2-23)$$

Mit  $p = \frac{F_N}{A_N} = \frac{F_N}{\pi \cdot d \cdot (R-r)}$  wobei  $d=R\pm r$  dem mittleren Flanshdurchmesser entspricht und  $d_p = 0,77d_0$ .  $d_p$  bezeichnet den Außendurchmesser des Flansches beim Erreichen des Ziehkraftmaximums.

### 2.5.5 Berechnung der Ziehkraft mit Hilfe des Umformwirkungsgrades

Die Verluste bei der Umformung und alle sonstigen dabei auftretenden Widerstände, wie etwa die Reibung, können überschlägig durch den Umformwirkungsgradgrad  $\eta_F$  erfasst werden. Siehe hierzu Gleichung 2-24.

$$\eta_F = \frac{F_{id}}{F_{ges}} = 0,5 \text{ für dünnwandige Näpfe} = 0,7 \text{ für dickwandige Näpfe} \quad (2-24)$$

Nach Siebel ergibt sich für die maximale Ziehkraft folgender Zusammenhang:

$$F_{z\_max} = \pi \cdot d_m \cdot s_0 \cdot \left( 1,1 \cdot \frac{k_{fm1}}{\eta_F} \cdot \left( \ln \frac{d_0}{d_1} - 0,25 \right) \right) \quad (2-25)$$

Für  $k_{fm1}$  gilt näherungsweise:  $k_{fm1} = 1,3 \cdot \sigma_B$

## 2.6 Werkzeuggestaltung

### 2.6.1 Ziehstempel

Der Ziehstempel bestimmt die innere Form des gezogenen Teils. Seine zylindrischen Seiten gehen mit einer Abrundung in die Stirnseite über. Der Radius  $r$  darf nicht zu klein sein, weil der Stempel sonst leicht wie ein Schneidstempel wirkt und den Boden von der Wandung trennt (Siehe Abbildung 2-3). Bei zu großem Radius besteht hingegen bei dünnen Blechen und am Ende des Ziehvorgangs die Gefahr einer Faltenbildung 2. Ordnung. Ist ein großer Radius am Stempel unumgänglich, muss der Niederhalterdruck erhöht werden.

### 2.6.2 Ziehring

Der **Rundungsradius**  $r_R$  der Ziehkante am Ziehring ist von den Abmessungen des Werkstückes und seiner Dicke  $s_0$  abhängig. Um eine möglichst geringe Ziehkraft aufzubringen und ein hohes Grenzziehverhältnis zu erreichen, ist eine große Ziehringrundung wünschenswert. Zu große Radien führen aber zu einer Verminderung der vom Niederhalter bedeckten Zuschnittsfläche und erhöhen somit die Gefahr der Faltenbildung im Bereich der Ringrundung gegen Ende des Zuges. Demgegenüber ist die Gefahr der Faltenbildung bei kleinen Ziehringradien klein. Sie erfordern jedoch eine größere Ziehkraft und vermindern somit das Grenzziehverhältnis.

Als allgemeine Empfehlung können für den Ziehringradius folgende Werte angenommen werden:

- a) Bei dünnwandigen Teilen und kleinem Ziehverhältnis:  $r_R = (5 \dots 7) s_0$
- b) Beim Tiefziehen dickwandiger Teile:  $r_R = (8 \dots 10) s_0$

### 2.6.3 Ziehspalt

Der **Ziehspalt**  $u_z$  beeinflusst die **Wanddicke** des gezogenen Teils. Mit zunehmender Ziehtiefe kommt es zu einer wachsenden Stauchung des Flanschwerkstoffes, wodurch eine Werkstoffanhäufung an der Ziehkante entsteht. Bei einem Ziehspalt von der Breite der Blechdicke kann der aufgestaute Werkstoff nicht durch den Ziehspalt fließen und wird abgestreckt, was zu einer Erhöhung der Stempelkraft führt und somit auch die Gefahr eines Bodenreißers verstärkt. Man versucht ein Abstreck-Gleitziehen zu vermeiden, indem man den Ziehspalt etwas größer als die Blechdicke ausführt. In diesem Fall ergibt die Stauchung eine zunehmende Wanddicke, die im oberen Teil des Ziehteiles erheblich über der **Ausgangsblechdicke**  $s_0$  liegt.

Für reines Tiefziehen ohne Abstreck-Gleitziehen gelten für den Ziehspalt folgende Beziehungen:

$u_z = s_0 + 0,07 \cdot \sqrt{10 \cdot s_0}$	für Stahlblech
$u_z = s_0 + 0,02 \cdot \sqrt{10 \cdot s_0}$	für Aluminiumblech
$u_z = s_0 + 0,04 \cdot \sqrt{10 \cdot s_0}$	für sonstige NE-Metalle
$u_z = s_0 + 0,20 \cdot \sqrt{10 \cdot s_0}$	für hochwarmfeste Legierungen

## 2.7 Tiefziehen ohne Niederhalter

Bei Verhältnissen  $\frac{s_0}{d_0} < 25$  kann beim Tiefziehen auf einen Niederhalter verzichtet werden. Das Biege widerstandsmoment ist aufgrund des geringen Rondendurchmessers oder der größeren Blechdicke  $s_0$  groß genug, um eine Faltenbildung zu vermeiden. Der Vorteil des niederhalterlosen Tiefziehens besteht darin, dass mit einfacheren Werkzeugen und einfach wirkenden Pressen gearbeitet werden kann.

Beim niederhalterlosen Tiefziehen entfällt die Reibung zwischen dem Niederhalter und Werkstück. Dies führt zu einer Verringerung der Ziehkraft bzw. ermöglicht höhere Ziehverhältnisse  $\beta$ .

Die Gesamtziehkraft  $F_z$  setzt sich somit aus der ideellen Umformkraft  $F_{id}$ , aus einer Biegekraft  $F_B$  und einer Reibkraft  $F_R$ , die durch Reibung des Werkstoffes an dem Zieh ring entsteht, zusammen.

$$F_z = F_{id} + F_B + F_R$$

Die Stempelkraft  $F_z$  erreicht das Maximum, wenn die Aufbiegung des Blechrandes so weit fortgeschritten ist, dass der Hebelarm zwischen Stempelkante und Auflagepunkt des Bleches am Zieh ring minimal wird.

Für die Werkzeuggestaltung des Zieh ringes ist zu gewährleisten, dass die Blechrunde zu jedem Zeitpunkt fest an der Zieh ringrundung anliegt, um auf diese Weise der Ausbildung von Falten entgegenzuwirken. Der Zieh ring sollte so konstruiert sein, dass der Hebelarm zwischen Auflagepunkt der Ronde am Zieh ringrundung und der Stempelkantenrundung möglichst groß ist, um auf diese Weise die erforderliche Ziehkraft klein zu halten. Die einfachste Möglichkeit ist die Verwendung eines Zieh rings mit einem großen Rundungsradius. Diese Zieh ringform ist zwar leicht herzustellen, birgt aber die Gefahr des Randabhebens, was die Faltenbildung 1. Ordnung begünstigt. Mit dieser Einlauform lassen sich daher nur geringe Ziehverhältnisse erreichen (z.B. Schuhcremedosen). Für das niederhalterlose Tiefziehen sind besonders kegelige und traktrixförmige Zieh ringeinläufe geeignet.



## 2.8 Tiefziehen mit Weiterzug

Das Tiefziehen im Weiterzug wird in der Weise durchgeführt, dass der im Erstzug vorgeformte Napf durch einen kegeligen Ziehring gezogen wird. Die Gefahr der Faltenbildung ist beim Weiterzug geringer als beim Erstzug, da hierbei die Ziehverhältnisse wesentlich kleiner sind. Ein Arbeiten ohne Niederhalter ist dann möglich, wenn gilt:

$$s_0 \geq 0,011 \cdot d_n \cdot \beta_n \quad (2-26)$$

mit  $\beta_n$  = Ziehverhältnis beim  $n$ -ten Zug und  $d_n$  = Stempeldurchmesser beim  $n$ -ten Zug.

Beim Weiterziehen hat der Niederhalter weniger die Aufgabe Druck auszuüben, als vielmehr eine Ausfüll- und Abstützwirkung zu übernehmen. Deshalb genügen hier schon geringe Niederhalterdrücke von  $P_N = 0,6 \dots 1,2 \text{ N/mm}^2$ .

Der Verlauf der Spannungen  $\sigma_r$  und  $\sigma_t$  über der Umformzone ist qualitativ gleich dem Spannungsverlauf beim Erstzug. Durch die konische Ausbildung des Ziehringes wirkt im Gegensatz zum Erstzug auch ohne Niederhalter eine Normalspannung auf das Blech, die das Werkstück gegen den Ziehring presst und somit der Faltenbildung entgegenwirkt.

Beim Erstzug wird der Werkstoff, nach dem Rand des Ziehteils hin zunehmend, verfestigt und die Blechdicke vergrößert. Beim Weiterzug ohne vorausgegangene Zwischenglühung nimmt deshalb die Ziehkraft mit dem Stempelweg zu, da die Wanddicke  $s$  und die Fließspannung  $k_{fm}$  stetig zunehmen, während alle übrigen Parameter konstant bleiben. Erst dann, wenn sich der obere Rand des Ziehteiles bereits im Bereich der kegeligen Schulter befindet, fällt die Ziehkraft wieder ab.

Erfolgt keine Zwischenglühung, so verlangt die zunehmende Verfestigung des Wandbereiches eine laufend steigende Ziehkraft, ohne dass die im Bodenkantenbereich maximal übertragbare Kraft steigt. Das Grenzziehverhältnis ist daher bei jedem Weiterzug kleiner zu wählen, um die Gefahr des Bodenreißens zu vermeiden. Das Gesamtziehverhältnis aus mehreren Zügen erhält man durch Multiplikation der Einzelziehverhältnisse.

## 2.9 Tiefziehen rechteckiger Teile

Während beim Tiefziehen runder Teile die Umformung gleichmäßig am Umfang des Zuschnitts erfolgt, ergeben sich beim Ziehen nicht kreisförmiger Werkstücke die höchsten Beanspruchungen und Formänderungen in den Ecken, während die Seitenteile weniger stark beansprucht werden. Die Größe und Verteilung der auftretenden Formänderungen hängt vom Verhältnis der Kantenlänge zum Eckenradius und außerdem von der Zargenhöhe ab.

Die Seitenwände tiefzuziehender quadratischer oder rechteckiger Teile werden nicht nur umgebogen, sondern unterliegen ebenso wie kreisförmige Zuschnitte auch radialen Zug- und tangentialen Druckspannungen.

Aus der Zuschnittsfläche  $A_0$  und der Stempelfläche  $A_{St}$  werden die Durchmesser  $d_0$  und  $d_{St}$  flächengleicher Kreise nach 2-27 berechnet:

$$d_0 = 2 \sqrt{\frac{A_0}{\pi}} \cdot l \quad \text{mit } d_{St} = 2 \cdot A_{St} \quad (2-27)$$

Das Ziehverhältnis berechnet sich gemäß 2-28 wie bei kreiszylindrischen Teilen zu:

$$\beta = \frac{d_0}{d_{St}} \quad (2-28)$$

Bei der Fertigung von quadratischen Ziehteilen wählt man zunächst zylindrische Zwischenzüge und stellt erst in der letzten Ziehstufe die quadratische Endform her.

Im Gegensatz zu den rotationssymmetrischen Werkstücken tritt bei rechteckförmigen Teilen keine gleichmäßige Spannung am Umfang auf. Idealisiert findet man an den Seiten einen Vorgang reiner Biegung. Im Eckenbereich entstehen tangentiale Druckspannungen, Werkstoff wird hier verdrängt. In der Realität existieren keine abgegrenzten Spannungsabfälle, so dass Übergangszonen vorhanden sind.

Die auftretenden Spannungen sind in Abbildung 2-6 gezeigt.

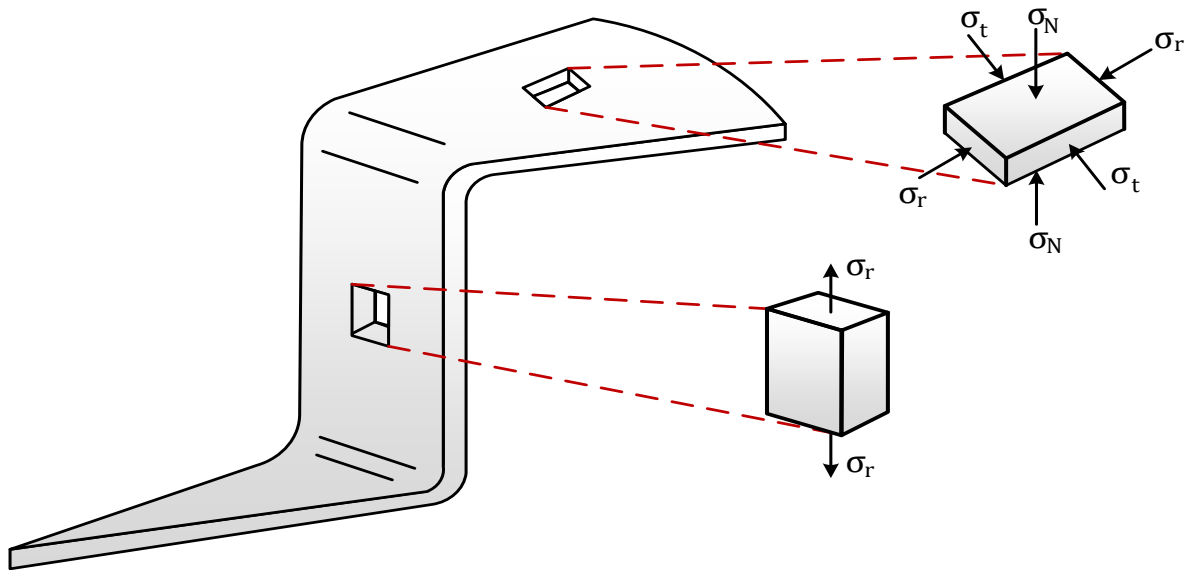


Abbildung 2-6: Auftretende Spannungen in der Ziehteillecke

Im Gegensatz zu rotationssymmetrischen Werkstücken tritt bei rechteckförmigen Teilen keine gleichmäßige Spannung am Umfang auf. Idealisiert findet man an den Seiten einen Vorgang reiner Biegung. Im Eckenbereich entstehen tangentielle Druckspannungen, der Werkstoff wird hier verdrängt. In der Realität existieren keine abgegrenzten Spannungsabfälle, sodass Übergangszonen vorhanden sind.

## 2.10 Versagensarten beim Tiefziehen

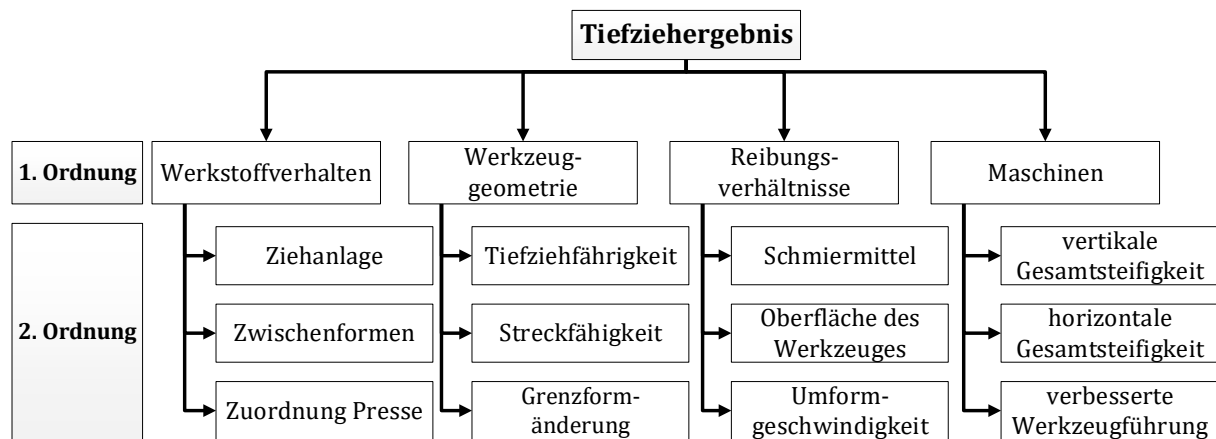


Abbildung 2-7: Einflussgrößen auf das Tiefziehergebnis

Die unterschiedlichen Einflussgrößen auf das Ergebnis sind in Abbildung 2-7 dargestellt. Die häufigste Versagensart beim Tiefziehen ist, neben der Faltenbildung (Niederhalterpressung zu gering), der Bodenreißer. Dieser tritt beim Überschreiten der Formänderungsfestigkeit des Materials auf. Die Gefahr des Bodenreißers wird durch alle Einflussgrößen, welche die erforderliche Kraft heraufsetzen und die übertragbare Kraft vermindern, erhöht. Diese sind:

- größeres Ziehverhältnis
- schlechte Schmierung
- ungünstige Oberfläche (zu glatt, keine Schmiertaschen)
- zu kleiner Ziehringradius
- zu großer Niederhalterpressung
- zu geringe Reibung zwischen Blech und Stempel

Die Gefahr für Bodenreißer wird demnach verringert, wenn die übertragbare Kraft am Ziehboden gegenüber der Umformkraft in der Formgebungszone heraufgesetzt wird. Das geschieht z.B. durch Erhöhen des  $R$ -Wertes oder durch Verminderung des Verformungswiderstandes, der abhängig ist von der Werkstofffestigkeit, den Reibungsverlusten zwischen Werkstück und -zeug, den Verlusten infolge Biegung am Ziehringradius.

Neben dem Versagen durch Bodenreißer kann es auch in Form von Längs- oder Umfangsreißern zum Versagen des Werkstoffes kommen. Diese Versagensart ist vorwiegend eine Folge zunehmender Versprödung des Werkstoffes infolge der Umformung (Grenzformänderungsvermögen). Die Brüche werden entweder durch die im Werkstoff nach dem Ziehen verbleibenden Eigenspannungen oder durch die Rückbiegung des Werkstoffes an der Ziehkante ausgelöst. Diese Versagensart tritt in der Regel nicht beim ersten Zug auf, sondern erst nach einem oder mehreren Weiterzügen.

Wird die Pressung durch den Niederhalter zu klein gewählt, kommt es auf Grund der im Flansch herrschenden tangentialen Druckspannungen zu Faltenbildungen (Abbildung 2-8).

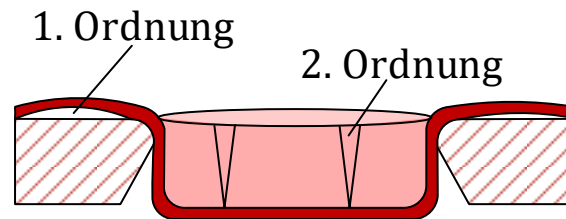


Abbildung 2-8: Faltenbildung beim Tiefziehen

Die unterschiedlichen Fehlerarten sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Fehlerarten beim Tiefziehen

<b>Fehler</b>	<b>Ursache</b>	<b>Behebung</b>
<b>Bodenreißer</b>	- Ziehkraft > Reißfestigkeit	- Kleinerer Zuschnitt - Kleiner Niederhalterkraft - Bessere Schmierung - Größerer Ring- oder Stempelradius
<b>Längsrisse</b>	- Wirkung von Eigenspannungen bei erschöpftem Formänderungsvermögen - Alterung des Werkstoffs - Werkzeug	- Zwischenglühen - Abstrecken - Anderer Werkstoff
<b>Umfangrisse</b>	- Erschöpftes Formänderungsvermögen beim Rückbiegen an der Ziehringkante	- Zwischenglühen - Kantenrundung $r_z$ vergrößern
<b>Faltenbildung im Flansch (1. Ordnung)</b>	- Zu geringe Niederhalterkraft - Unebener Niederhalter	- Niederhalterkraft erhöhen - Niederhalter verbessern
<b>Faltenbildung im Ziehteil (2. Ordnung)</b>	- Fehlende formschlüssige Unterstützung in der freien Zone	- Zuschnitt oder Niederhalterkraft vergrößern - Einfließwulste
<b>Falten im Bodenrand (Querfalten)</b>	- Stempelradius zu groß	- Stempelradius kleiner wählen
<b>Zipfelbildung</b>	- Vier Zipfel 90° zueinander: Anisotropie des Werkstoffes durch Richtung der Fasern beim Walzen - Unregelmäßige Zipfel: Ungleiche Blechdicke	- Anderer Werkstoff - Zusätzlicher Arbeitsgang - Beschneiden - Anderes Blech
<b>Fließfiguren</b>	- Nur örtliches Fließen (bei Werkstoff mit ausgeprägter Streckgrenze und geringer Belastung)	- Keine zu kleinen Verformungen - Blech durch Walken oder Walzen leicht verfestigen

## 2.11 Zipfelbildung

Bei großem  $\Delta R$  zeigen Tiefziehteile eine große Neigung zur Zipfelbildung; Es kommt aufgrund unterschiedlichen Fließverhaltens in Abhängigkeit von der Richtung zu unterschiedlichem Längen- und Dickenänderungen im Tiefziehteil. Vereinfachend kann angenommen werden, dass das Blech in den Richtungen, in denen der  $R$ -Wert groß ist, einer Änderung der Blechdicke einen starken Widerstand entgegensetzt, wo hingegen in Richtungen kleineren  $R$ -Wertes das Material aus der Dicke fließt. An den Stellen hoher  $R$ -Werte bilden sich Zipfel, an Stellen niedriger Werte bilden sich wiederum Täler aus. Dabei ist die Zipfelhöhe  $h_z$  eine Funktion von  $\Delta R$ . Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 2-9 gezeigt.

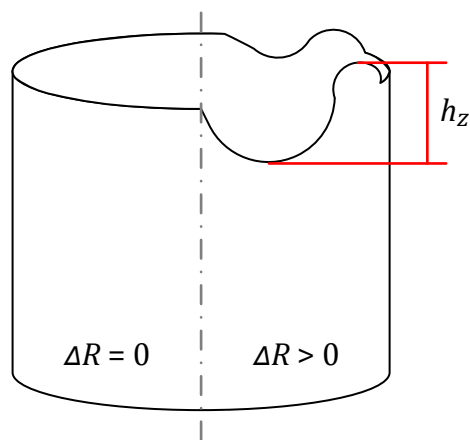


Abbildung 2-9: Schematische Darstellung der Zipfelbildung

## 2.12 Berechnung des Zuschnittsdurchmessers runder Ziehteile

Die Frage beim Ziehen runder Ziehteile lautet: Wie groß muss eine Ronde sein, um einen Napf der Höhe  $h$  mit einem Innendurchmesser  $d_0$  ziehen zu können?

Gesucht wird also der Mindestdurchmesser der Ronde. Es werden folgende Annahmen getroffen:

- Reiner Tiefziehvorgang (Blechoberfläche bleibt konstant)
- Vernachlässigung der Übergangsradien

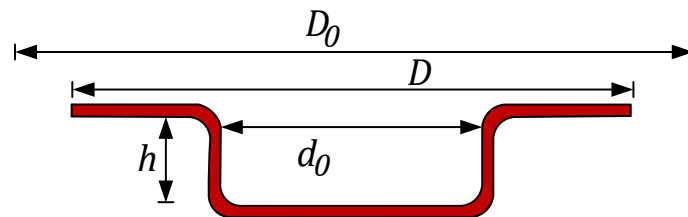


Abbildung 2-10: Querschnitt eines Napfes

Nach Abbildung 2-10 berechnet sich die Ziehteilhöhe gemäß Gleichungen 2-29 und 2-30.

$$h = \frac{d_0}{4} \left[ \left( \frac{D_0}{d_0} \right)^2 - \left( \frac{D}{d_0} \right)^2 \right] \quad (2-29)$$

$$h = \frac{d_0}{4 \cdot (\beta_0^2 - \beta^2)} \quad (2-30)$$

Bliebt kein Flansch bestehen, vereinfacht sich die Gleichung zu Gleichung 2-31.

$$h = \frac{d_0}{4} (\beta_0^2 - 1) \quad (2-31)$$

Bei gegebener Napfhöhe  $h$  und gegebenen Ziehverhältnis  $\beta$  berechnet sich der erforderliche Rondendurchmesser gemäß Gleichung 2-32.

$$\text{Ziehverhältnis: } \beta_0 = \frac{D_0}{d_0} = \sqrt{\frac{4h}{d_0} + \beta^2} \quad (2-32)$$

$$\text{Ohne Flansch: } \beta_0 = \sqrt{\frac{4h}{d_0} + 1} \quad (2-33)$$

$$D_0 = \sqrt{\frac{4h}{d_0} + 1} \quad (2-34)$$

Der so berechnete Wert stellt nur einen allgemeinen Anhaltspunkt dar, da auftretende Radien und die Eigenschaften des Werkstoffes nicht berücksichtigt werden. In der Praxis wird der genaue Zuschnitt erst nach Fertigstellung des Werkzeugsatzes ermittelt.

## **2.13 Einfluss der Ziehgeschwindigkeit und der Schmierung sowie der Rauigkeit des Tiefziehwerkstoffes auf das Tiefziehen**

Bei guter Schmierung wird bei Versagen der Riss zum Boden hin verlagert (größte Behinderung). Dort ist das Material kaum kaltverfestigt und besitzt oft eine geringere Bruchkraft. Es ist also unbedingt darauf zu achten, dass kein Schmiermittel in die Krafteinleitungszone gelangt.

Für die Rauigkeit des Tiefziehwerkstoffes wird gefordert:

- nicht zu glatt, da dann kein Ölreservoir an der Oberfläche mitgeführt werden kann; Damit nimmt die Reibung zu;
- gleichmäßige Rauigkeit, damit die gesamte Fläche trägt. Einzelne Spitzen führen zur Ein-ebnung und Taschenbildung.



## 3 Mechanische Kennwerte

### 3.1 Formänderungsvermögen

Das Formänderungsvermögen ist die Eigenschaft, plastische Formänderungen ertragen zu können, ohne dabei einen Bruch zu erfahren. Dabei hängt der beim Bruch erreichte Umformgrad von verschiedenen Einflussgrößen wie z.B. Geometrie des Systems und Kinetik des Vorgangs, welche wiederum Auswirkungen auf den Spannungszustand sowie den Umformgrad und die Temperatur haben, ab. Für das Formänderungsvermögen gibt es bisher keine bestimmte Werkstoffkenngröße. Es gilt:

$$\text{Formänderungsvermögen} = f(\text{Spannungszustand, Werkstoff, } \varphi, \vartheta)$$

Für ein bestimmtes Umformverfahren muss die größtmögliche Formänderung in Abhängigkeit von den Umformbedingungen in Betriebsversuchen oder Modellversuchen ermittelt werden.

### 3.2 Formänderungsfestigkeit $k_f$

Die Kraft  $F$ , die zur Umformung eines Werkstoffes aufgebracht werden muss, ist abhängig von der Formänderungsfestigkeit, Geometrie und der Reibung. Mit der Formänderungsfestigkeit  $k_f$  wird die Spannung bezeichnet, bei der der Werkstoff unter bestimmten Bedingungen zu Fließen beginnt. Sie ist eine Werkstoffkenngröße und muss in Versuchen ermittelt werden.

Es gibt zwei einfache formelmäßige Beziehungen, die das Fließkriterium angeben. Diese sind mit verschiedenem physikalischem und mathematischem Hintergrund von Tresca (1864) und von v. Mises (1913) angegeben worden. Beide Formeln liefern bei reiner Zug- oder Druckspannung gleiche Ergebnisse, bei reiner Torsion beträgt der maximale Unterschied 15 %, wobei das Fließverhalten technischer Werkstoffe durch die Fließbedingung nach v. Mises besser beschrieben wird als nach Tresca.

- Nach Tresca setzt plastisches Fließen ein, wenn die Differenz der größten und der kleinsten Hauptspannung einen kritischen Wert, die größte Schubspannung  $\tau_{max}$ , erreicht hat.

$$k_f = \tau_{max} = |\sigma_1 - \sigma_3| \quad \text{mit} \quad \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \quad (3-1)$$

- Nach v. Mises beginnt ein isotroper und homogener Körper dann zu fließen, wenn eine Kombination der auf ihn wirkenden Spannungen einen kritischen Wert, die Formänderungsfestigkeit  $k_f$ , erreicht hat.

Für die Hauptnormalspannungen lautet die Fließbedingung gemäß Gleichung 3-2:

$$k_f = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3-2)$$

Der einfachste Versuch zur Bestimmung von  $k_f$  ist der einachsige Zug- oder Druckversuch, Hierbei ist  $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$  und nur  $\sigma_1 \neq 0$ . Im Bereich bis zur Gleichmaßdehnung liegt ein einachsiger Spannungszustand. Für das Fließkriterium nach Tresca und v. Mises folgt somit Gleichung 3-3.

$$k_f = \sigma_1 \quad (3-3)$$

Allgemein gilt für die Formänderungsfestigkeit:  $k_f = k_f(\varphi, \dot{\varphi}, \vartheta)$

Trägt man  $k_f = k_f(\varphi)$  unter der Bedingung  $\dot{\varphi} = \text{konst.}$  auf, so erhält man die ideale Fließkurve. Da es gewöhnlich nicht gelingt  $\dot{\varphi}$  und  $\vartheta$  konstant zu halten, spricht man nur von der Fließkurve des betreffenden Werkstoffes. Während bei der Fließkurve für die Kaltumformprozesse (Kaltfließkurve) der Einfluss von  $\dot{\varphi}$  und  $\vartheta$  i.A. vernachlässigt wird, d.h.  $k_f = k_f(\varphi)$ , so müssen bei der Ermittlung der Warmfließkurve die Abhängigkeiten von  $\dot{\varphi}$  und  $\vartheta$  berücksichtigt werden.

In *Abbildung 3-1* ist der schematische Verlauf von Fließkurven bei Kaltumformung (a) und Warmumformung (b) dargestellt.

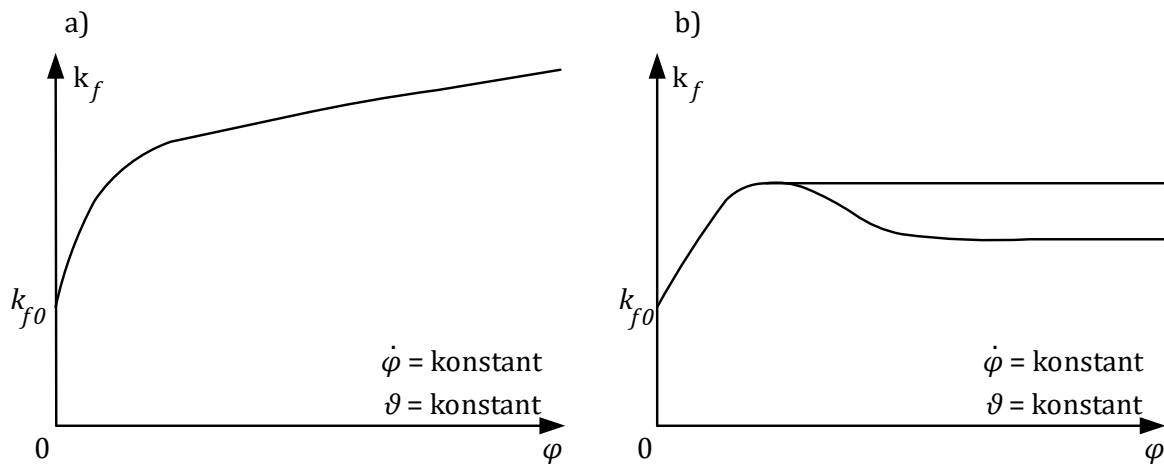


Abbildung 3-1: Fließkurven bei a) Kalt- und b) Warmumformung

Bei der Kaltumformung kommt es während der Umformung zu einer Verfestigung (a), bei der Warmumformung oberhalb der Rekristallisationstemperatur treten neben der Verfestigungs- auch Entfestigungserscheinungen auf (Erholung und Rekristallisation), wodurch die Fließspannung ab einem gewissen Umformgrad konstant bleibt oder sogar abfällt auf ein konstantes Niveau.

### 3.3 Verfahren zur Bestimmung von $k_f$

Ermittlung von Kalt- und Warmfließkurven eignen sich grundsätzlich folgende Verfahren:

- Zugversuch
- Ermittlung von  $k_f$  aus einem Zugversuch
- Zugversuch aus vorgeformten Blechstreifen
- Zylinderstauchversuch
- Kegelstauchversuch
- Flachstauchversuch
- Verdreh- oder Torsionsversuch
- Biegeversuch

Wegen des versuchstechnischen Aufwandes werden zur Ermittlung von Warmfließkurven nur der Torsionsversuch und der Zylinderstauchversuch zwischen ebenen Bahnen angewandt.

Die Wahl des Prüfverfahrens ist in erster Linie von den Umformbedingungen des technischen Verfahrens abhängig, weiterhin vom Werkstoff, der Temperatur, dem Umformgrad, der Umformgeschwindigkeit und dem Umformprogramm. Dabei sind möglichst die gleichen Temperaturen, Umformgeschwindigkeiten, Umformgrade sowie Umform- und Pausenzeiten anzustreben z.B. wegen der ablaufenden dynamischen und statischen Entfestigungsvorgänge beim Warmwalzen.

### 3.4 Der Zugversuch

Der Zugversuch liefert dann eine Fließkurve, wenn die wirkende Kraft  $F$  auf die augenblickliche Fläche  $A$  der Probe bezogen wird, siehe Gleichung 3-4:

$$k_f = \sigma_1 = \frac{F(\varphi)}{A(\varphi)} \quad (3-4)$$

Der einachsige Spannungszustand herrscht allerdings nur bis zum Beginn der Einschnürung, wodurch nur relativ geringe Formänderungen möglich sind. Aus diesem Grund werden Versuche nur bis zum Beginn der Einschnürung durchgeführt, die Probe wird auf einer Drehbank abgedreht und der Zugversuch wird weiter bis zur erneuten Einschnürung fortgesetzt, usw.

#### 3.4.1 Bestimmung von $k_f$ aus einem Zugversuch (Näherung)

Die Kaltfließkurve  $k_f = (\varphi)$  ergibt bei Auftragen im doppellogarithmischen Maßstab eine Gerade. Diesen Sachverhalt kann man durch die in Gleichung 3-5 angegebene Beziehung ausdrücken.

$$k_f = k_{f1} \cdot \varphi^n \quad (3-6)$$

Der Exponent  $n$  wird aus dem Kraft-Verlängerungsdiagramm durch Gleichsetzen mit der Formänderung  $\varphi_{gi}$  am Ende der Gleichmaßdehnung erhalten:

$$n \equiv \varphi_{gi} = \ln\left(\frac{A_0}{A_{gi}}\right) \quad (3-7)$$

$k_{f1}$  erhält man durch die in Gleichung 3-8 dargestellte Beziehung.

$$k_{f1} = \sigma_B \left(\frac{e}{n}\right)^n \quad (3-8)$$

### 3.4.2 Zugversuch an vorgeformten Blechstreifen

Hier werden nun mehrere Flachproben aus der gleichen Ausgangsform (Charge) um steigende Formänderungen  $\varphi$  heruntergewalzt, daraus jeweils mehrere Parallelproben entnommen, an denen im Zugversuch die Streckgrenze  $\sigma_S$  als  $k_f$  bestimmt wird. Falls keine natürliche Streckgrenze vorhanden ist, wird an Stelle der Streckgrenze die 0,2 %-Dehngrenze und  $\sigma_{0,2}$  als Fließspannung ermittelt. Bei den meisten Stählen kann für  $\varphi > 0,3$  weder  $\sigma_S$  noch die  $\sigma_{0,2}$ -Grenze bestimmt werden, da vorher schon der Bruch eintritt. In diesen Fällen wird anstelle der genannten Spannungen die Zugfestigkeit  $\sigma_B$  ermittelt und gleich  $k_f$  gesetzt. Die erhaltenen Werte bestimmen einige Punkte der Fließkurve, so dass Zwischenwerte durch Interpolation ermittelt werden müssen. Die Erstellung eines Fließkurvenpolynoms durch eine Ausgleichsrechnung für die Messwerte ist ebenfalls möglich.

Es sei darauf hingewiesen, dass Fließkurven i.A. nur für den Formänderungsbereich gelten, für den sie ermittelt wurden, eine Extrapolation der Messwerte über den Bereich hinaus führt häufig zu völlig falschen Ergebnissen.

Bei Verwendung der durch den Zugversuch ermittelten Fließkurven für den Walzvorgang (ebene Formänderung) muss die durch die äußere Geometrie ( $h_o, h_i$ ) gegebene Formänderung  $\varphi$  auf eine Vergleichsformänderung  $\varphi_v$  umgerechnet werden.

$$\text{Für v. Mises: } \varphi_v = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \varphi \qquad \text{Für Tresca: } \varphi_v = \varphi$$

Die Vergleichsformänderung berücksichtigt, dass beim Walzen kein einachsiger Spannungszustand herrscht, für den aber eine Fließkurve ermittelt wurde.

### 3.5 Zylinderstauchversuch zwischen ebenen Bahnen

Der Zylinderstauchversuch ist das für große Formänderungen am weitesten verbreitete Verfahren zur Bestimmung von  $k_f$ . Voraussetzung für die Anwendbarkeit ist, dass die Reibung an den Probenstirnflächen durch optimale Schmierung ausgeschaltet oder zumindest minimal ist. Unter diesen Bedingungen gilt, dass nur  $\sigma_1$  ist und es gilt für Tresca und v. Mises:

$$k_f = \sigma_1 = \frac{F(\varphi)}{A(\varphi)} \quad (3-9)$$

Die Stauchkraft  $F$  kann unmittelbar gemessen werden. Die Fläche  $A$  ermittelt man am zweckmäßigsten aus der Probenhöhe nach der Beziehung (Volumenkonstanz):

$$A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon} \quad (3-10) \quad \varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0} \quad (3-11)$$

Um den meist nicht völlig auszuschaltenden Einfluss der Reibung klein zu halten, muss die Probe zu Beginn mindestens ein Höhen/Durchmesser-Verhältnis von  $h_0/d_0=2$  aufweisen. Bei Verwendung des Zylinderstauchversuches zur Ermittlung der Warmfließkurve müssen Prüfmaschinen eingesetzt werden, bei denen die Formänderungsgeschwindigkeit konstant gehalten werden kann (sogenannte Plastometer). Auf üblichen Prüfmaschinen kann  $\dot{\varphi}$  wegen der Gültigkeit der in Gleichung 3-12 angegebenen Beziehung nicht konstant gehalten werden. Weiterhin beeinflusst die Temperaturerhöhung der Probe durch den Stauchvorgang die Messungen.

$$\frac{d\varphi}{dt} = \dot{\varphi} = \frac{v}{h} \quad \text{mit } v = \text{Stößelgeschwindigkeit} \quad h = \text{Augenblickshöhe} \quad (3-12)$$

Die Vergleichsspannung und die Vergleichsformänderung sind beim Stauchversuch sowohl nach Tresca als auch nach v. Mises gleich den gemessenen Größen.

$$\sigma_v = k_f = \sigma_1 \quad (3-13)$$

$$\varphi_v = \varphi = \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right) \quad (3-14)$$

### 3.6 Kegelstauchversuch

Beim Kegelstauchversuch werden anstelle der ebenen Stauchbahnen kegelförmige benutzt, die auf Zylinderproben drücken, welche an den Stirnflächen mit Innenkegeln versehen sind. Dabei wird der Kegelwinkel so gewählt, dass er gleich dem Reibungswinkel ist. Dadurch wird der Reibungswert gleich Null (Gleichung 3-15), sodass in der Stauchprobe durch die aufgebrachte Stauchkraft ein einachsiger Spannungszustand erzeugt wird.

$$\mu = \tan(\alpha - \rho) = 0 \quad (3-15)$$

Wegen der aufwendigen Probenherstellung hat der Kegelstauchversuch aber keine weite Verbreitung gefunden, zur Ermittlung von Warmfließkurven ist er nicht geeignet.

### 3.7 Flachstauchversuch

Bei diesem Versuch werden zwei genau gegenüberstehende starre Stempel mit ebener Profilfläche in einen ebenfalls ebenen Körper eingedrückt, dessen Breiten/Höhen-Verhältnis größer als 6 sein muss, damit eine ebene Formänderung vorliegt.

Die Ermittlung von  $k_f$  erfolgt über die Ermittlung des mittleren Druckes gemäß Gleichung 3-16.

$$p = \frac{F(\varphi)}{A_0} \quad (3-16)$$

$\varphi$  kann aus der Anfangs- und der Augenblickshöhe errechnet werden. Je nach Wahl des Fließkriteriums müssen die bei ebener Formänderung ermittelten Fließspannungen auf die Vergleichsdarstellung umgerechnet werden. Die ebene Formänderung beim Flachstauchversuch wird durch folgenden Hauptspannungs- und Hauptverzerrungszustand gekennzeichnet:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= p & \sigma_2 &= \frac{p}{2} & \sigma_3 &= 0 \\ \varphi_1 &= -\varphi & \varphi_2 &= 0 & \varphi_3 &= 0 \end{aligned}$$

Nach v. Mises folgen somit Gleichungen 3-17 und 3-18

$$\sigma_v = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot p = k_f \quad (3-17)$$

$$\varphi_v = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \varphi \quad (3-18)$$

Nach Tresca folgten wiederum Gleichung 3-19 und 3-20.

$$\sigma_v = p = k_f \quad (3-19)$$

$$\varphi_v = \varphi \quad (3-20)$$

D.h. hier ist keine Umrechnung erforderlich, da  $\sigma_2$  in diesem Fall nicht berücksichtigt wird.

### 3.8 Torsionsversuch

Beim Torsionsversuch wird an zylindrischen Vollproben das Torsionsmoment  $M_t$  in Abhängigkeit vom Torsionswinkel  $\theta$  gemessen. Daraus wird die Schubspannung  $\tau$  in Abhängigkeit von der Schiebung  $\gamma$  folgendermaßen ermittelt:

Das Moment der inneren Kräfte hält dem Moment der außen am Stab angreifenden Kräfte das Gleichgewicht. Ist die Verteilung der Schubspannung  $\tau$  über den Querschnitt in Abhängigkeit vom Radius  $r$  bekannt, kann daraus das Moment unter den Voraussetzungen der elementaren Theorie, dass

- kreisförmige Querschnitte während der Umformung eben bleiben;
- keine Längenänderung der Probe eintritt, d.h. dass der Werkstoff isotrop ist und es auch während der Umformung bleibt,

gemäß Gleichungen 3-21 berechnet werden:

$$M_t = \frac{2 \cdot \pi \cdot R^3}{\gamma_R^3} \cdot \int_0^{\gamma_R} \tau \cdot \gamma^2 d\gamma \quad \tau = \tau(\gamma) \quad (3-21)$$

mit  $R$  = Probendurchmesser,  $\gamma_R = \frac{\theta \cdot R}{l}$  = Schiebung am Probenrand,  $l$  = Messlänge

Nach Ludwik und Scheu ist die Bestimmungsgleichung für die Schubspannung am Rande der Probe in Gleichung 3-22 aufgeführt.

$$\tau_R = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R} \cdot \left( 3M_t + \gamma_R \cdot \frac{dM_t}{d\gamma_R} + \dot{\gamma}_R \cdot \frac{dM_t}{d\dot{\gamma}_R} \right) \quad (3-22)$$

Setzt man  $\dot{\gamma}_R$ , so erhält man die für die Kaltumformung gültige Fließkurve.

Im Versuch wird  $M_t = M_t(\theta)$  gemessen, mit obigen Gleichungen  $\tau_R$  im Abhängigkeit von der Schiebung  $\gamma_R$  rechnerisch ermittelt oder graphisch aufgetragen.

Um einen Vergleich der Kurve  $\tau_R = \tau_R(\gamma_R)$  mit den üblichen Fließkurven  $k_f = k_f(\varphi)$  zu ermöglichen, muss eine Umrechnung auf die Vergleichsdarstellung erfolgen:

Nach v. Mises:

$$\sigma_v = \sqrt{3 \cdot \tau_R} \quad (3-23) \quad \varphi_v = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \gamma_R \quad (3-24)$$

Nach Tresca:

$$\sigma_v = 2 \cdot \tau_R \quad (3-25) \quad \varphi_v = \frac{1}{2} \cdot \gamma_R \quad (3-26)$$

### 3.9 Bestimmung von Werkstoffkennwerten

Die Durchführung eines Umformvorgangs erfordert Kräfte bzw. Spannungen, die den zu bearbeitenden Werkstoff in einen plastischen Zustand versetzen und diesen während der Dauer der Umformung aufrechterhalten. Diese Kräfte bzw. Spannungen sind außer vom Umformverfahren, der Werkzeug- und Werkstückgeometrie und anderen Einflussgrößen insbesondere vom Umformwerkstoff und den Umformparametern wie Größe der Umformung, Umformtemperatur und Umformgeschwindigkeit abhängig.

Als wichtigstes Kriterium für die Beurteilung des Werkstoffverhaltens im plastischen Zustand und damit der Größe der während der Umformung auftretenden Spannungen gilt die Fließspannung  $k_f$ . Wird die Fließspannung  $k_f$  in Abhängigkeit des Umformgrades  $\varphi$  aufgetragen, erhält man die Fließkurve. Mit ihr kann der Verlauf der Kaltverfestigung eines metallischen Werkstoffes während der plastischen Formänderung dargestellt werden. Die Kenntnis der Fließkurve ermöglicht es im jeweiligen Anwendungsfall, die für die Auswahl der günstigsten Umformbedingungen und für die Auslegung von Umformmaschinen und Werkzeugen wichtigen Umformkräfte und -arbeiten vorauszubestimmen.

Bei Erreichen der Streckgrenze beginnt der Werkstoff zu fließen, d.h. plastische Deformation tritt ein. Liegt keine ausgeprägte Streckgrenze vor, wird der Beginn des plastischen Fließens auf die technologische Streckgrenze festgesetzt, d.h. bei 0,2 % bleibender Dehnung nach dem Entlasten.

$$\sigma_{0,2} = k_f \quad (3-27)$$

Der elastische Anteil, der durch die Hook'sche Gerade repräsentiert wird, ist davon abzuziehen.

Hier greift somit Gleichung 3-28.

$$k_f = \frac{F}{A_0} = \frac{\text{Kraft für die 0,2\% - Dehngrenze}}{\text{Ausgangsquerschnittsfläche}} \quad (3-28)$$

Bei dem gesamten Verfahren zur Fließkurvenbestimmung werden Isotropie, Homogenität und Volumenkonstanz (Inkompressibilität) des Werkstoffes vorausgesetzt.

Die mechanischen Eigenschaften metallischer Werkstoffe sind temperaturabhängig, z.B. Formänderungsvermögen, Elastizitätsmodul usw. Werkstoffkennwerte werden von der Beanspruchungsart (Zug, Druck, Torsion, Biegung oder Scherung) und von der möglichen Versagensweise (Verformen oder Bruch) bestimmt.



Werkstoffkennwerte sind z.B.:

**Streckgrenze:** Kennzeichnet die Spannung, bei der ein Werkstoff zu fließen beginnt.

**Dehngrenze:** Hat die bleibende Formänderung einen Betrag von 0,2 % (bzw. 0,4 % bei Torsion) erreicht, so bildet die zugehörige Spannung die entsprechende Dehngrenze.

**Festigkeit:** Die Zug-, Druck-, Torsions- oder Scherfestigkeit ist schließlich jene (fiktive) Spannung, die man erhält, wenn man die jeweils größte ertragbare Belastung auf den Ausgangsquerschnitt der unbelasteten Probe bezieht.

Beim Zugversuch nach DIN 50145 können folgende Werkstoffkennwerte aufgenommen werden:

a) **Streckgrenze**  $\sigma_s = \frac{F_s}{A_0}$

Sie ist gleich der auf den Ausgangsquerschnitt  $A_0$  der Probe bezogene Last  $F_s$ , bei der das Last-Verlängerungsdiagramm unter Auftreten einer merklich bleibenden Dehnung eine Unstetigkeit zeigt. Die Streckgrenze tritt als ausgeprägte Fließgrenze nur bei wenigen metallischen Werkstoffen auf, so z.B. bei weichem Flusstahl.

b) **0,2% – Dehngrenze**  $\sigma_{0,2}$

Bei Werkstoffen, die keine ausgeprägte Streckgrenze aufweisen, wird als Ersatz-Streckgrenze die Spannung  $\sigma_{0,2}$  ermittelt, bei der sich nach Entlasten eine bleibende Dehnung von 0,2 % einstellt. Man bezeichnet sie als 0,2 %-Dehngrenze.

c) **0,2% – Dehngrenze**  $\sigma_B = \frac{F_{\max}}{A_0}$

Sie ist gleich der höchsten im Versuch gemessenen Kraft  $F_{\max}$ , bezogen auf den Ausgangsquerschnitt  $A_0$  der Probe. Die Zugfestigkeit  $\sigma_B$  ist eine fiktive Spannung. Die "wahre" Spannung erhält man, indem man die Kraft  $F$  auf den jeweiligen Querschnitt  $A$  bezieht, siehe Gleichung 2-29.

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{2-29}$$

Sie ist stets um den Faktor  $A/A_0$  größer als die entsprechende fiktive Spannung im Last-Verlängerungsdiagramm des Zugversuchs. Bis zum Erreichen der Höchstlast, wegen der gleichmäßigen Spannungsverteilung ist die wahre Spannung zugleich die höchste Spannung. Danach bildet sich bei verformungsfähigen Werkstoffen ein mehrachsiger Spannungszustand aus, so dass die Beziehung  $\sigma = F/A$  nur noch die mittlere Spannung in Belastungsrichtung angibt, während der Maximalwert in der Stabachse darüber liegt. So bald letzterer die Trennfestigkeit des verfestigten Werkstoffs erreicht, kommt es zum Bruch.

**d) Bruchdehnung**      $\delta = \left( \frac{\Delta L_B}{L_0} \right) \cdot 100\%$

Sie ist die auf die ursprüngliche Messlänge  $L_0$  bezogene bleibende Verlängerung  $\Delta L_B$  nach dem Bruch der Probe. Gebräuchlich ist die Messlänge  $5 \cdot \emptyset$  der Probe ( $L_0 = 5 \cdot d_0$ , Kreuzer Proportionalitätsstab). Die Bruchdehnung erhält den Index 5:  $\delta_5$ .

**e) Bruchdehnung**      $\psi = \left( \frac{\Delta A_B}{A} \right) \cdot 100\%$

Sie ist die auf den Ausgangsquerschnitt  $A_0$  bezogene bleibende Querschnittsminderung  $\Delta A_B$  an der Bruchstelle.

Streckgrenze bzw. 0,2 %-Dehngrenze und Zugfestigkeit sind für die Dimensionierung eines Bauteils maßgebende Festigkeitskennwerte. Das Verformungsvermögen des Werkstoffes beeinflusst die bei der Festigkeitsberechnung einzusetzenden Sicherheitsbeiwerte.

## Literaturverzeichnis

- [1] K. Lange;  
Umformtechnik – Handbuch für Industrie und Wissenschaft; Band 3: Blechbearbeitung;  
Springer-Verlag
- [2] K. Lange;  
Grundlagen der Umformtechnik, Band 1: Grundlagen; Springer-Verlag
- [3] H. Lippmann und O. Marenholtz;  
Plastomechanik der Umformung metallischer Werkstoffe; Springer Verlag
- [4] R. Kopp und H. Wiegels;  
Einführung in die Umformtechnik; Verlag Mainz
- [5] W. Dahl und R. Kopp;  
Umformtechnik Plastomechanik und Werkstoffkunde; Springer Verlag
- [6] Schuler;  
Handbuch der Umformtechnik; Springer-Verlag