

## Umformen - Grundlagen

### **Einteilung der Umformverfahren**

- Unterscheidung nach dem Spannungszustand nach DIN 8582 (Druck-, Zug-, Zugdruck-, Biege- und Schubumformen)
- Unterscheidung nach der Einsatztemperatur (Kalt-, Halbwarm-, Warmumformung...)
- Unterscheidung nach dem Produkttyp (Massiv- und Blechumformung)
- Stationäre/instationäre Umformprozesse, je nachdem, ob sich das Geschwindigkeitsfeld in der Umformzone mit der Zeit ändert

### **Verformen**

Im Gegensatz zum Umformen bezeichnet man das Überschreiten der Plastizitätsgrenze bei nicht beherrschter Geometrie als Verformung.

**Umformen** ist das Ändern der Form eines festen Körpers unter Beibehaltung des Stoffzusammenhalts und der Masse bzw. des Volumens (DIN 8580). Die Beschreibung des damit umrissenen plastischen Verhaltens fester Körper, insbesondere von Metallen, ist viel komplexer als die des elastischen Verhaltens. Nachstehend werden dazu wichtige Grundlagengriffbe für die Auslegung und das Verständnis von Umformprozessen, die mit dem Feinschneiden kombinierbar sind, eingeführt.

**Massivumformen** ist das Umformen mit großen Querschnitts- und Abmessungsänderungen, z.B. durch Fließpressen, Stauchen, Prägen, Einsenken, Durchsetzen. Dabei treten große Formänderungen mit großer Verfestigung des Werkstoffs und damit hohen Kräften und Werkzeugbeanspruchungen auf.

**Blechumformen** ist das Umformen ohne bzw. mit geringen, ungewollten Änderungen der ursprünglichen Wanddicke von Blechzuschnitten, z.B. durch Tiefziehen, Kragenziehen, Biegen. Biegeumformverfahren können je nach Verfahren und Werkstückabmessungen beiden Verfahrensgruppen zugeordnet sein. Formänderungen, Verfestigungen und damit Kräfte sind bei Blechumformverfahren meist kleiner.

**Kaltumformen** ist das Umformen ohne Anwärmen, d.h. bei Raumtemperatur. In Kombination mit dem Feinschneiden kommen Kaltumformverfahren des Massiv- und Blechumformens zur Anwendung.

**Halbwarmumformen** ist das Umformen mit dem Anwärmen auf eine Temperatur unterhalb der Rekristallisationstemperatur.

**Warmumformen** ist das Umformen mit dem Anwärmen auf eine Temperatur oberhalb der Rekristallisationstemperatur. Diese liegt bei Metallen bei ca. 40% der Schmelztemperatur in [K].

**Thixotropie** ist Umformen (Schmieden) im Bereich zwischen Liquidus und Solidus-Temperatur → ZSD

**Superplastizität** ist eine ungewöhnlich starke Verformbarkeit von Metall-Legierungen  $\epsilon$  bis ca. 1000 % unter bestimmten Voraussetzungen → s. Vorlesung

## 1.1 Formänderungen

### Allgemeine Definitionen nach dem Zugversuch

Das plastische Verhalten von Metallen lässt sich mit Kennwerten aus dem Zugversuch bestimmen (**Bild 1 und 2**). Im Zugversuch selbst werden

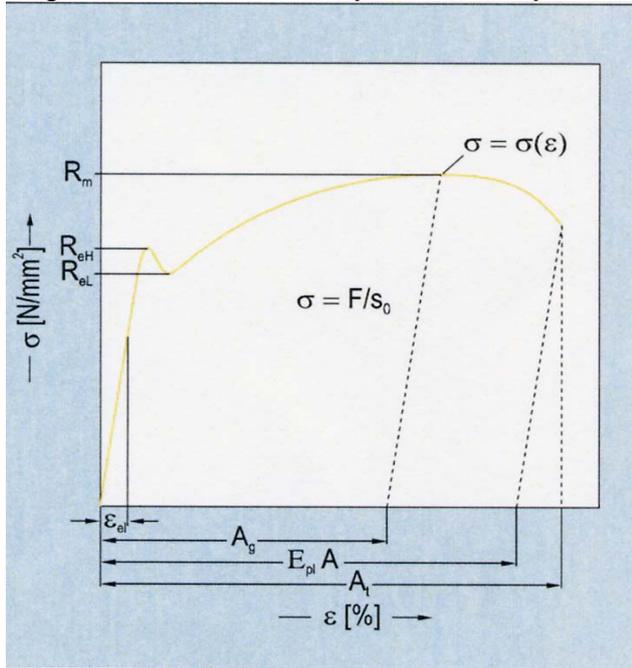


Bild 1 Spannungs-Dehnungs-Diagramm mit Kennwerten.

$R_m$	= Zugfestigkeit
$R_{eH}$	= Obere Streckgrenze
$R_{eL}$	= Untere Streckgrenze
$\sigma$	= Spannung
$\varepsilon$	= Dehnung
$\varepsilon_{el}$	= Elastische Dehnung
$A_{pl}$	= Plastische Dehnung
$\varepsilon_t$	= Momentane plastische Dehnung
$A_g$	= Gleichmaßdehnung
$A$	= Bruchdehnung
$A_t$	= Gesamte Dehnung bei einem Bruch
$F$	= Kraft
$S_0$	= Ausgangsquerschnitt

[EN 10002]

Kräfte und Verlängerungen der Probe gemessen. Generell werden dabei Dehnungen und Kräfte auf den unbelasteten Ausgangszustand bezogen. Es gilt für die Dehnung  $\varepsilon = \Delta l / l_0$  oder  $\varepsilon = (l - l_0) / l_0$  worin  $l$  die momentane, gedehnte Länge und  $l_0$ , die Anfangsmesslänge ist. Wegen des durch das Hooksche Gesetz  $\varepsilon_{el} = \sigma / E$  für Metalle gegebenen elastischen Verhaltens bis nahe zur Streckgrenze  $R$ , (**Bild 1**) bzw. Proportionalitätsgrenze,  $R_p$  (**Bild 2**) teilt sich die Dehnung in den elastischen Dehnungsanteil  $\varepsilon_{el}$  und den plastischen Dehnungsanteil  $\varepsilon_{pl}$  auf; die momentane Gesamtdehnung ist mithin  $\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$

Zur Beschreibung des elastisch-plastischen Verhaltens von metallischen Werkstoffen wurden folgende Kennwerte genormt:

$A_0$  = Streckgrenzendehnung (am Ende des elastischen Bereichs)

$A_g$  = nichtproportionale Dehnung bei Höchstkraft (Gleichmaßdehnung)

$A$  = Bruchdehnung  $\frac{l_u - l_0}{l_0} \cdot 100\%$  (entspricht  $\varepsilon_{pl}$ , beim Bruch), worin  $l_u$  die Messlänge nach dem Bruch ist

dem Bruch ist

$A_t$  = gesamte Dehnung beim Bruch (entspricht  $\varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$  beim Bruch) ist

$Z$  = Brucheinschnürung  $\frac{s_u - s_0}{s_0} \cdot 100\%$  worin  $S_0$  = Anfangsquerschnitt innerhalb der Versuchslänge und  $s_u$  = kleinster Probenquerschnitt nach dem Bruch ist.

Diese fünf Kennwerte werden in der Regel in Prozent angegeben.

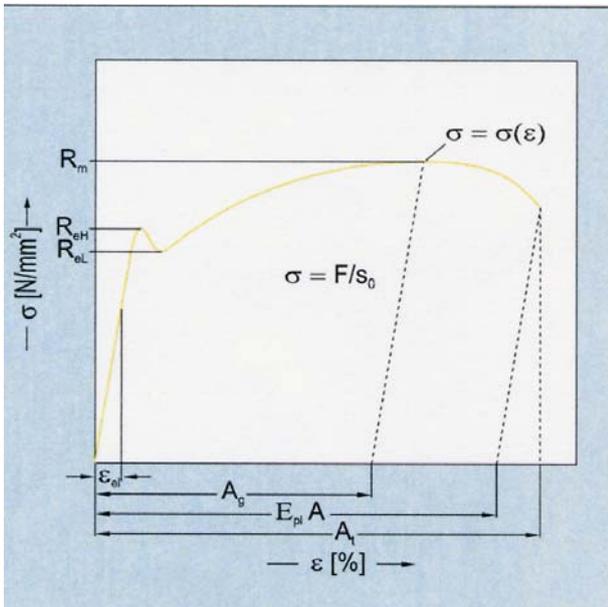


Bild 2 Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei nichtproportionaler Dehnung mit Kennwerten.

- $R_m$  = Zugfestigkeit
- $R_p$  = Streckgrenze
- $\sigma$  = Spannung
- $\epsilon$  = Dehnung
- $\epsilon_{pl}$  = Dehnung bei RP
- $A_g$  = Gleichmaßdehnung
- $A_t$  = Bruchdehnung
- $F$  = Kraft
- $s_0$  = Ausgangsquerschnitt

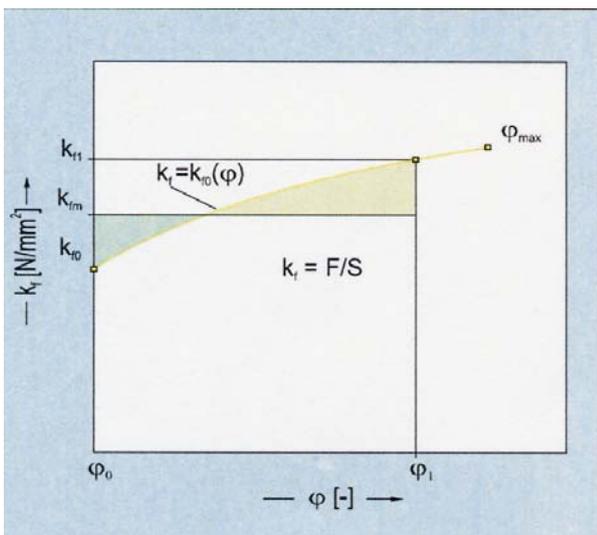
[EN 100021]

### Spezielle Definitionen für die Umformtechnik

Für größere Formänderungen wird der elastische Dehnungsanteil häufig vernachlässigbar klein, d.h.  $\epsilon_{pl} \gg \epsilon_{el}$ . Der Anfangszustand ist dann für die Berechnung der momentanen Formänderungen ohne Bedeutung, und es gilt analog zu  $\epsilon = \Delta l / l_0$  auch  $d\varphi = dl / l_0$ . Durch Integration über die gesamte Formänderung ergibt sich  $\varphi = \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_1}{l_0} = \ln(1 + \epsilon)$ . Dieses

logarithmische Formänderungsmaß heißt Umformgrad  $\varphi$ . Er wird in der Umformtechnik benutzt. Ausgezeichnete Punkte auf der Fließkurve (**Bild 3**) sind:

- $\varphi_0$  = Anfangswert des Umformgrads
- $\varphi_1$  = Umformgrad zum Zeitpunkt 1
- $\varphi_g$  = Umformgrad bei Gleichmaßdehnung
- $\varphi_{max}$  = Umformgrad bei Bruch



**Bild 3:**

Fließkurve, Fließspannungs-Formänderungs Diagramm für  $\epsilon_{el} = 0$

- $k_f$  = Fließspannung
  - $k_{f0}$  = Ausgangswert der Fließspannung
  - $k_{fm}$  = mittlere Fließspannung
  - $k_{f1}$  = Fließspannung zum Zeitpunkt 1
  - $\varphi$  = Umformgrad
  - $\varphi_{max}$  = Maximaler Umformgrad
  - $F$  = Kraft
  - $S$  = Tatsächlicher Querschnitt
- [EN 10002]

Für räumliche (dreiachsige) Formänderungen (z.B. in Länge, Breite, Höhe) gilt:

$$\varphi_l + \varphi_b + \varphi_h = 0$$

Es besagt, dass die Änderung einer Werkstückabmessung durch Umformen immer mit anderen Abmessungsänderungen verbunden ist. Dies muss bei der Auslegung eines Umformprozesses sorgfältig beachtet werden. Es gilt die Volumenkonstanz. Der Werkstoff kann nicht verdichtet werden.

## 1.2 Spannungen

### **Spannungen im Zugversuch**

Spannungen sind auf eine Flächeneinheit wirkende Kräfte. Im Zugversuch nach EN 10002 werden die Spannungen auf den Anfangsquerschnitt bezogen:

$$\sigma = \frac{F}{s_0}$$

Daraus ergibt sich der charakteristische Abfall des Spannungsverlaufs nach Erreichen des Spannungswertes  $R_m$ , (Zugfestigkeit), da der tatsächliche Querschnitt, der die Zugkraft zu übertragen hat, bis zum Bruch abnimmt.

### **Umformtechnik und wirkende Spannungen**

In der Umformtechnik werden die Spannungen auf den momentanen Querschnitt, im Zugversuch nach EN 10002 auf  $S$ , sonst allgemein auf  $A$ , bezogen; der sich ergebende Spannungswert heißt Fließspannung:  $k_f = F / s$  bzw.

$$k_f = F / A$$

Ausgezeichnete Werte gemäß **Bild 3** sind:

- $k_{f0}$  = Anfangswert von  $k_f$ ; entspricht etwa  $R_e$ ,  $R_p$
- $k_{f1}$  = Fließspannung bei einem gegebenen Umformgrad
- $k_{fm}$  = mittlere Fließspannung über einer gegebenen Umformung
- $k_f$  =  $\int_{\varphi_0}^{\varphi_1} k_f d\varphi$  oder näherungsweise  $\frac{1}{2}(k_{f0} + k_{f1})$ , s. Bild 3.

## 1.3 Fließkurve

Die Fließkurve (**Bild 3**) beschreibt den Zusammenhang zwischen Fließspannung  $k_f$  und Umformgrad  $\varphi$ . Sie ist werkstoff-, temperatur- und umformgeschwindigkeitsabhängig. Die Ausgangsfließspannung  $k_{f0}$  wird durch die Fließbedingung  $\sigma_v = k_f$  bestimmt. ist die auf einen einachsigen Spannungswert zurückgerechnete Vergleichsspannung aus einer mehrachsigen, räumlichen Beanspruchung ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_m$ ). Erreicht sie den aus Versuchen ermittelten Wert von  $k_{f1}$  so tritt plastisches Fließen ein. Nähere Hinweise zur mathematischen Formulierung der Fließspannung und zu Einflüssen auf die Fließkurve bzw. Fließspannung → Vorlesung

## 1.4 Fließbedingungen

Eine plastische Formänderung bewirkt gemäß **Bild 3** eine Verfestigung, die durch den Anstieg von  $k_{f0}$  auf  $k_{f1}$  in Abhängigkeit vom Umformgrad  $\varepsilon_{pl}$  beschrieben wird. Sie wird durch Gleitung, Zwillingsbildung und Versetzungsbewegung im Kristallgitter der Metalle bewirkt; Näheres → Vorlesung. Die Verfestigung lässt sich durch Glühen (Rekristallisationsglühen, Weichglühen, Normalglühen) rückgängig machen, Näheres → Vorlesung.

## 1.5 Reibung

Nach DIN 50323 ist die Reibung eine Wechselwirkung zwischen sich berührenden Stoffbereichen von Körpern. Sie wirkt einer Relativbewegung entgegen.

Die Reibung ist eine Systemeigenschaft, da sie von einer Vielzahl von Einflussgrößen (Oberflächengeometrie und -beschaffenheit, Flächenpressung, Relativgeschwindigkeit, Temperatur, Werkstoffpaarung, Luftfeuchtigkeit und Schmierstoff) abhängt. Die Reibung beeinflusst bei Umformprozessen nicht nur die Geschehnisse im Kontaktbereich, sondern auch den Spannungs- und Formänderungszustand in der gesamten Umformzone und somit auch den Kraft- und Arbeitsbedarf.

Die Differenzierung kann in Abhängigkeit der Bewegungszustände (Gleitreibung, Rollreibung, Stoßreibung) oder in Abhängigkeit des Aggregatzustands erfolgen (Festkörperreibung, Flüssigkeitsreibung, Mischreibung). In der Umformtechnik kommt es bei Verwendung flüssiger Schmierstoffe meist zu Mischreibungszuständen.

Die Bestimmung der Reibungszahl  $\mu$  setzt eine genaueste Kenntnis des Kontaktzustandes voraus und gestaltet sich in den meisten Fällen als äußerst schwierig. Anwendung finden als Rechenverfahren das Coulombsche Reibungsgesetz (1) und das so genannte Reibungsfaktormodell (2):

$$(1) |F_r| = \mu \cdot |F_n| \text{ mit } F_r \text{ als Reibungskraft und } F_n \text{ als Normalkraft}$$

$$(2) |\tau_r| = m \cdot k \text{ mit } m \text{ als Reibungsfaktor } (0 < m < 1), \tau_r \text{ als Reibungsschubspannung und } k \text{ als Schubfließspannung } (k_f/2)$$

Beide Reibungsgesetze geben die physikalischen und chemischen Vorgänge in der Reibungszone nur sehr grob wieder. Folgende Richtwerte haben sich für die aufgeführten Kalt- und Warmumformprozesse bewährt (**Tabelle 1**):

Tabelle 1

Umformverfahren	Formänderung	Reibungszahl (Stahlwerkstoff)
Kaltwalzen	gering	0,07
	groß	0,03
Kaltfließpressen	gering	0,1
	groß	0,05
Drahtziehen	gering	0,1
	groß	0,05
Tiefziehen	gering	0,05
	groß	0,05 - 0,1
Warmwalzen		0,2
Strangpressen		0,02 - 0,2
Schmieden		0,2

Tabelle 1 Richtwerte für Reibungszahlen bei ausgewählten Umformprozessen.

Weitere Richtwerte → s. VL

## 1.6 Formänderungsvermögen/Grenzformänderung

Das Formänderungsvermögen ist ein Maß für die für einen gegebenen Werkstoff erzielbare maximale Formänderung. Das Formänderungsvermögen ist keine konstante Größe und auch keine Werkstoffeigenschaft. Werkstoffabhängige Größen für erzielbare Formänderungen sind  $R_m$ ,  $A$  und  $R_p$  sowie das Streckgrenzenverhältnis  $R_p/R_m$ , das für gut umformbare Stähle zwischen 0,5 und 0,7 liegt. Bei mehrachsigen Beanspruchungen mit mittleren Normalspannungen im Druckbereich gilt

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

Dabei wird  $\varphi_{\max} \gg A$  (s.  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Kurve). Durch Druckspannungsüberlagerung, z.B. beim Stauchen, Durchdrücken, Feinschneiden, lassen sich wesentlich größere Umformungen als im Zugversuch bzw. plastische Formänderungen erzielen.

Mit entsprechend weichgeglühten Kohlenstoffstählen, legierten Stählen höherer Festigkeit und Feinkornstählen lassen sich ähnliche Umformungen erzielen wie mit weicheren unlegierten Kohlenstoffstählen. Allerdings sind die erforderlichen Umformkräfte dabei, den jeweiligen Werten der Fließspannung  $k_f$  und des Umformgrads  $\varphi$  entsprechend, höher.

Die folgende Grafik zeigt den prinzipiellen Verlauf des Formänderungsvermögens (**Bild 4**) niedrig legierter Stähle als Funktion der Temperatur.

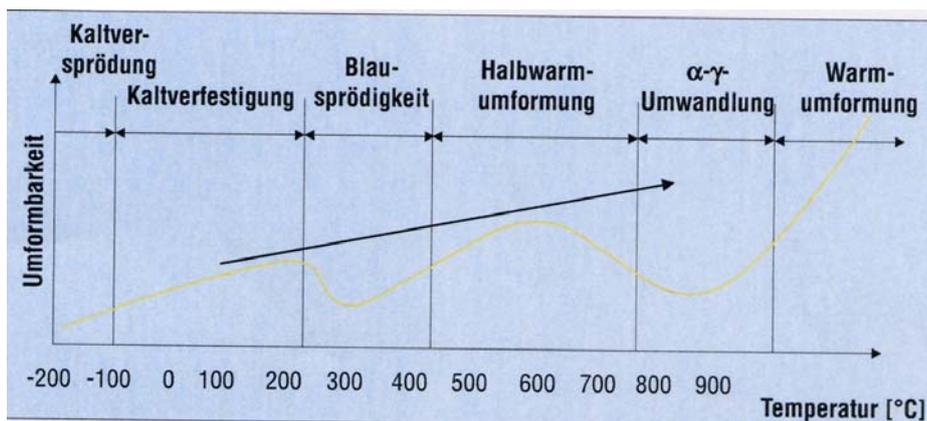
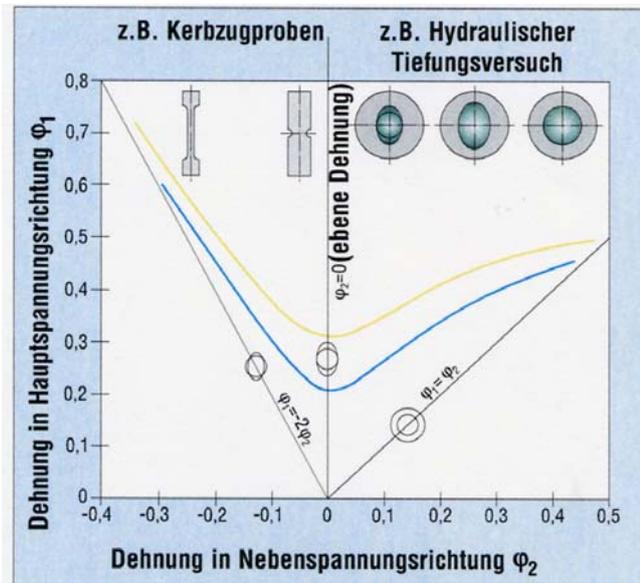


Bild 4: Umformbarkeit als Funktion der Temperatur.

Die elastische Rückfederung - wichtig vor allem beim Biegen und Tiefziehen - hängt von der absoluten Höhe von  $R_p$  bzw. von  $k_{f0}$  bei praktisch gleichem E-Modul für Stähle verschiedener Festigkeit bei Raumtemperatur ab, d.h. sie wird mit zunehmender Streckgrenze größer.

Im Grenzformänderungsdiagramm (**Bild 5**) stellen die Grenzformänderungskurven die Versagensgrenzen bzgl. Einschnüren bzw. Reißen/Bersten des Materials dar. Alle Formänderungskombinationen innerhalb der Oberfläche des Bleches, die sich unterhalb der Kurven befinden, führen nicht zu einem Versagen des Werkstücks während der Umformung. Liegen die Formänderungskombinationen oberhalb der dargestellten Kurven, ist eine Einschnürung bzw. ein Bruch des Werkstoffs zu erwarten.



**Bild 5:** Grenzformänderungsdiagramm

Gelb: Grenzformänderungskurve (Bruch)

Blau: Grenzformänderungskurve (Einschnürung)