

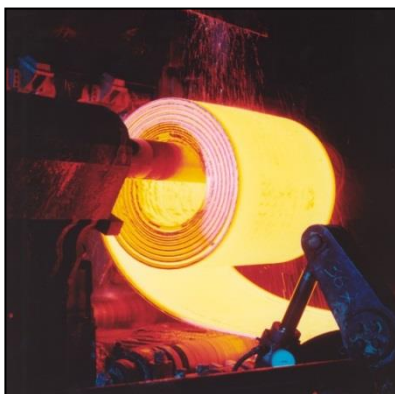
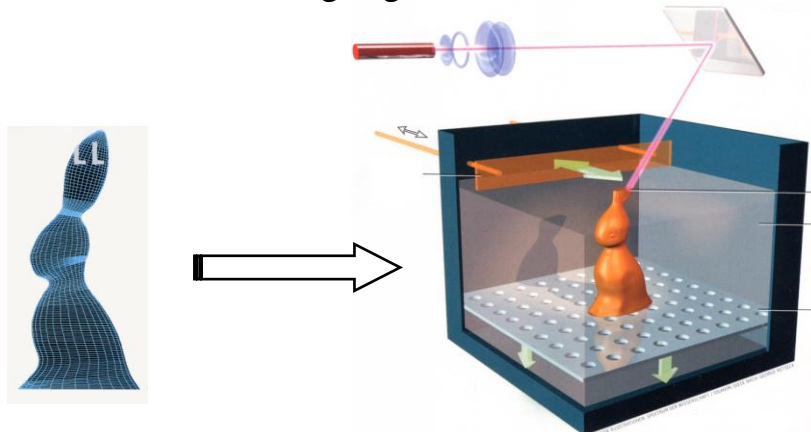
Prof. Dr.-Ing. H.G. Heinrich

Vorlesung "FEV, Fertigungsverfahren" (MB+PA)

Übersicht über Verfahren der Spanlosen Fertigung und Grundlagen der Umformtechnik

Die Arbeitsblätter sind bestimmt als vorlesungsbegleitende Unterlagen. Sie enthalten nur einen Teil (bzgl. Anzahl und Inhalt!) der in der Vorlesung besprochenen Folien und sind deshalb zum Eigenstudium des Faches nur bedingt geeignet.

Beachten Sie bitte auch die vorlesungsergänzenden Aufsätze auf meiner [Homepage](#).



Der Ausdruck des Skriptes auf DIN-A4-Größe und in Farbe ist empfehlenswert !

WS 2013/2014

1. Literaturangaben und Einführung

2. Übersicht über die Verfahren der SL FEV nach DIN 8582 (außer Umformen)

2.1 Umformen

2.1.1 (Strang)Gießen

2.1.2 Galvanoformung

2.1.3 Sintern

2.1.4 Rapid Prototyping

2.2 Fügen → s. auch Vorlesung + Praktikum Prof. Wörner (Schweißen)

2.2.1 Kleben

2.2.2 mechanisches Fügen

2.3 Beschichten

2.3.1 Galvanik

2.3.2 Verzinken

2.3.3 Hartstoffbeschichtungen (PVD-Verfahren)

2.3.4 Thermisches Spritzen

2.3.5. Sprühkompaktieren

2.4 Stoffeigenschaften ändern (Übersicht → Wärmebehandlungen, s. auch 2. Sem. WTK)

2.5 Verschiedene Möglichkeiten der Fertigung eines Produktes

3. Stoffeigenschaften ändern (Beispiel)

3.1 Kaltverfestigung und Erholung

3.2 Rekristallisation

4. Grundlagen der Umformtechnik (Werkstoffe, Spannungen)

4.1 Werkstoffe der Umformtechnik

4.2 Vorteile der Spanlosen Fertigung

4.3 Verformungsmechanismus bei Metallen

4.3.1 Gitteraufbau der Metalle

4.3.2 Wirkung der Versetzungen

4.4 Umformtechnik und Spannungs-Dehnungs-Diagramm

4.5 Wirkungen von Spannungen

4.5.1 Schmidt'sches Schubspannungsgesetz

4.5.2 Festigkeitshypothesen

4.6 Miller'sche Indizes

4.7 Gitterbaufehler und deren Wirkungen

5. Umformtechnik

5.1 Kenngrößen der Formänderung

5.2 Spannungs-Dehnungs-Diagramm und Fließkurve

5.3 Fließkurve nach Reihle

5.4 Umformen bei erhöhter Temperatur

5.4.1 Lauwarmumformen,

5.4.2 Halbwarmumformen,

5.4.3 Superplastizität

5.4.4 Thixoforming

5.4.5 Thermo-Spritzgießen

5.5 Fließkurven bei Kalt- und Warmumformung

5.6 Stauchen eines Zylinders (Kraftbedarf)

5.7 Ermittlung der Umformarbeit

6. Kurzübersicht über die Verfahren der Umformtechnik nach DIN 8582

7. Umformtechnik: Das Walzen

- 7.1 Walzerzeugnisse
- 7.2 Werkstoffkundliche Aspekte
- 7.3 Der Umformvorgang beim Walzen
 - 7.3.1 Werkstoffverhalten im Walzspalt (Einzieh-, Durchziehbedingung)
 - 7.3.2 Dickenabnahme beim Greifen und Walzen
- 7.4 Tribologie
 - 7.4.1 Reibung
 - 7.4.2 Schmierstoffe
 - 7.4.3 Oberflächenbehandlungen
 - 7.4.4 Die Reibzahl μ
- 7.5 Berechnung des Kraft- und Arbeitsbedarfs beim Walzen
- 7.6 Walzverfahren
 - 7.6.1 Längswalzen
 - 7.6.2 Querwalzen
 - 7.6.3 Schrägwalzen,
- 7.7 Walzenarten, -körper, -gerüste
- 7.8 Walzenwerkstoffe
- 7.9 Thermomechanisches Walzen

8. Das Tiefziehen

- 8.1 Definition, Nomenklatur, Werkstoffe
- 8.2 Prinzip, Verfahren
- 8.3 Spannungen beim Tiefziehen
- 8.4 Fehler beim Tiefziehen
- 8.5 Blechumformen: Trends und neuere Entwicklungen
 - 8.5.1 Tailored Blanks
 - 8.5.2 IHU
- 8.6 Berechnungen
 - 8.6.1 Ziehverhältnis
 - 8.6.2 Niederhalterkraft
 - 8.6.3 Stempelkraft
 - 8.6.4 Umformkraft
- 8.7 Werkzeuggestaltung
- 8.8 Ermittlung des Zuschnittes
- 8.9 Abstufung der Züge
- 8.10 Zeihringformen
- 8.11 Schmierung
- 8.12 Grenz-Formänderungs-Kurven

9. Das Schmieden

- 9.1 Schmiedeverfahren
 - 9.1.1 Freiformschmieden
 - 9.1.2 Gesenkschmieden
 - 9.1.2.1 Schmieden von der Stange
 - 9.1.2.2 Schmieden vom Spaltstück
 - 9.1.2.3 weitere Verfahren
 - 9.1.2.4 Kraftbedarf
 - 9.1.2.5 Arbeitsbedarf

Videofilme (falls Zeit vorhanden):

Neue Gießwalzverfahren (CSP)
Rapid Prototyping
Verzinken
Herstellung nahtloser Rohre
"Warmwalzen von Stahl", ("Großrohrwerk Mannesmann")
Blech, Draht- und Profilwalzen
Schmiedestück-Verwendung etc.

10. Liste der Fachausdrücke deutsch - englisch

11. Formelsammlung zur Klausur

Praktika PWF, 3. Semester (kann variieren)

Verantwortlich: Prof. Dr. Hammer

- 1 Zugversuch
- 2 Metallographie
- 3 Rasterelektronenmikroskop (Herr Bräu)

Verantwortlich: Prof. Dr. Heinrich

- 4 Kerbschlagbiegeversuch (Herr Hüttner)
- 5 Aushärten einer Al-Legierung**

Verantwortlich: Prof. Dr. Appel

- 6 Kunststofftechnik 1
- 7 Kunststofftechnik 2

Verantwortlich: Prof. Dr. Wörner

- 8 Lichtbogenschweißen
- 9 Giessen

Auswahl an Fachbüchern:

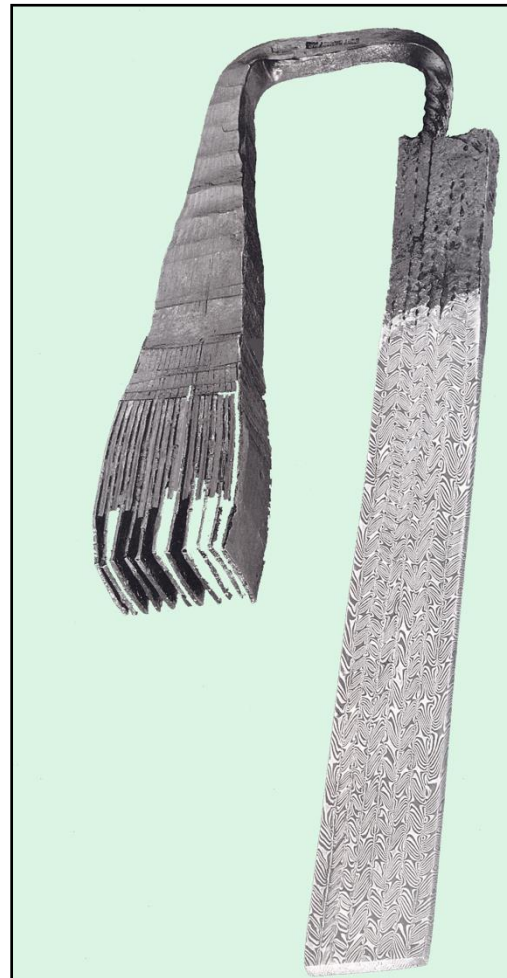
1. **Handbuch der Fertigungstechniken Band 1 - 4**
G.Spur,Th.Stöferle Carl Hanser Verlag
2. **Umformtechnik**
K. Grüning, Vieweg-Verlag
3. **Lehrbuch der Umformtechnik**
K. Lange, Springer-Verlag
4. **Handbuch der Umformtechnik**
Schuler, Springer -Verlag
5. **Taschenbuch der Umformtechnik**
H. Tschätsch, Hanser-Verlag
6. **Taschenbuch der Fertigungstechnik**
G. Witt u.a., Fachbuch-Verlag-Leipzig
7. **Spanlose Fertigung**
J. Flimm, Hanser-Verlag
8. **Werkstoffkunde**
Bargel/Schulze, VDI-Verlag

Das Skript liegt auf dem K-LW und meiner [homepage \(fhr, ab\)](#)

SL: Beispiel Umformtechnik (alt und neu)



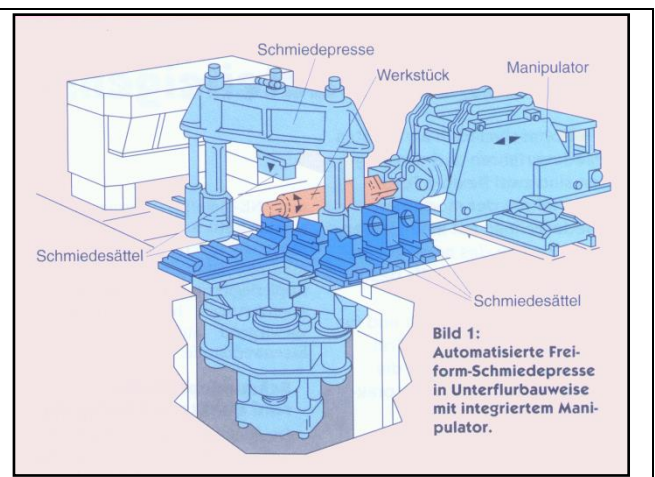
alt: Schwerter



Damaszenerklingen



neu: Kurbelwellen für PKW, LKW, Schiffe etc.



automatisierte Freiformschmiedepresse

Abb. 1: zur Einführung in die Spanlose Fertigung

2. Verfahren der spanlosen Fertigung (DIN 8582) → Übersicht

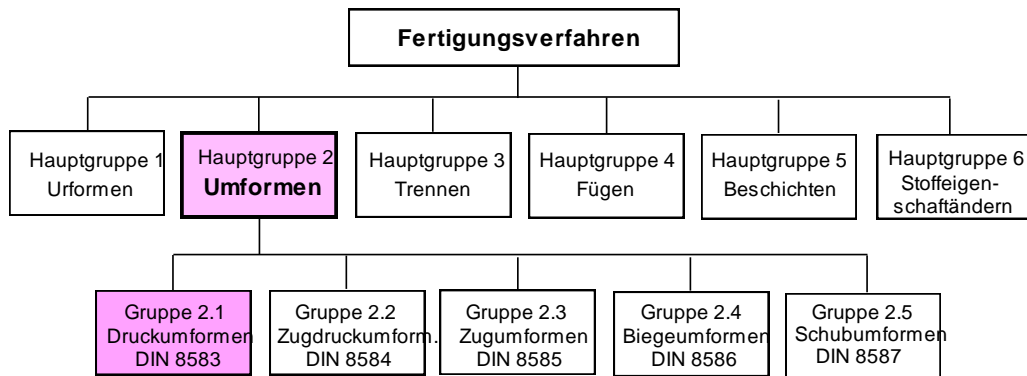


Abb. 2: Übersicht über die Verfahren der Spanlosen Fertigung

Urformen:

Umformen:

Trennen:

Fügen:

Beschichten:

Stoffeigenschaft ändern:

2.1 Urformen:

2.1.1 (Strang)gießen → Gießen der Vorprodukte zum Walzen

Die für das Walzen benötigten Ausgangsprodukte werden durch Gießen hergestellt. Es sind verschiedene Verfahren gebräuchlich. [Dickenangaben (s) sind Richtwerte]

Einige grundsätzliche Bemerkungen zu Block- und Kokillenguß:

Durch Gießen verarbeitet werden i.A. eutektikumsnahe Legierungen (→ Gießspirale) oder solche in der Nähe des reinen Metalls (Erstarrungsintervall, Seigerungen) → Zustandsschaubilder...

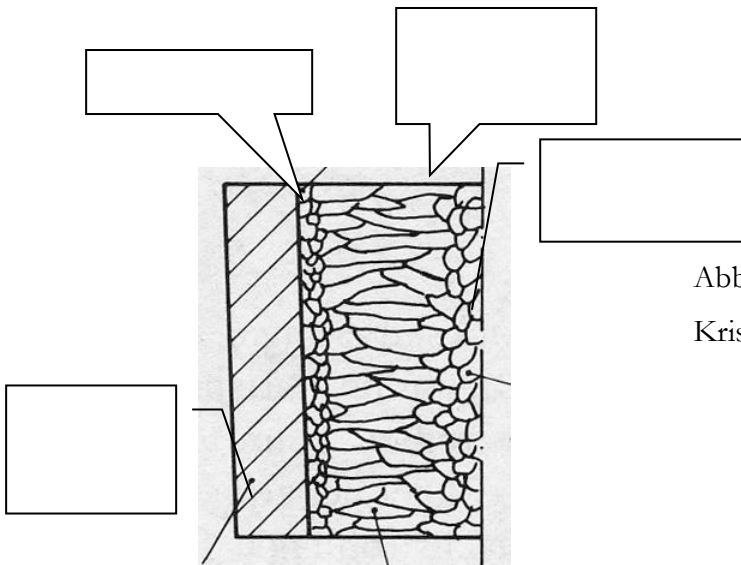


Abb. 3:

Kristallisation in einer Metall-(Stahl)-Kokille →

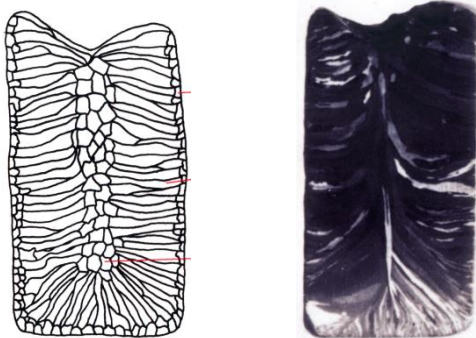


Abb. 4: Gußblock nach Erstarrung:

Links: schematisch

Rechts: Makroschliff

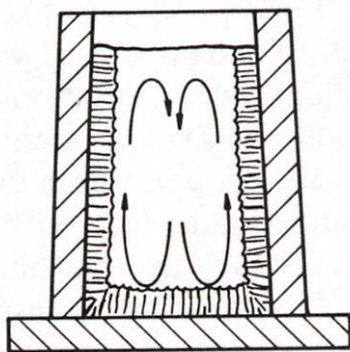
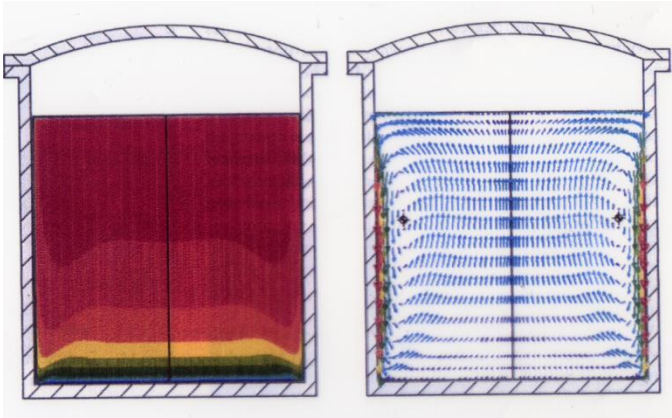


Abb. 5: Blockguß:

Strömung durch Gasblasen, prim. O₂ („kochen“),
→



FEM-Rechnungen:

Abb. 6 a), b):

T-Profil (links)

Strömung durch Thermik (rechts)

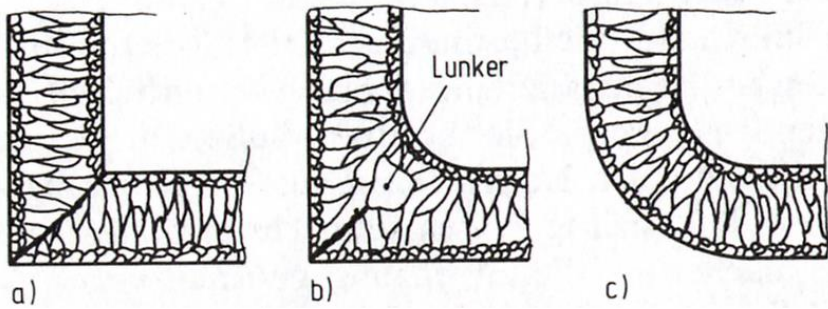


Abb. 7: Gußkonstruktionen:

Primärkristallisation in Ecken.

Optimal →

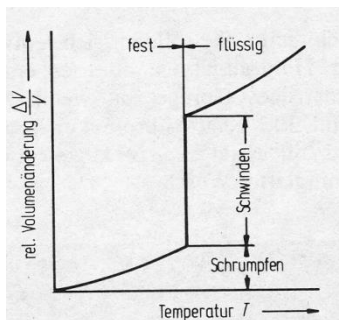


Abb. 8:

Volumenänderung beim Erstarren

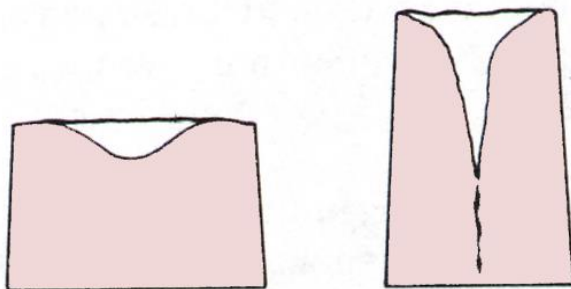


Abb. 9: Gegossener Block:

Lunkerbildung durch Schrumpfen beim Erstarren als f(Blockform)

→ Kopf- und Fadenlunker

→ Dopplung...

Block- und **Strangguß** dienen als Vormaterial zur Weiterverarbeitung, primär durch Walzen, s.u. Die Werkstoffeigenschaften werden durch die Umformbedingungen (T , t , „Durchwalzen“) beeinflusst.

Beim Formguß (zur Herstellung von Fertigteilen) hat das Gießverfahren den größten Einfluss → Abkühlv, Keimbildung, Korngröße...

Weiterhin zu berücksichtigen:

Strömung durch Gasblasen, prim. O_2 (kochen), → Nebenreaktionen → (nichtmet. Verunreinigungen (Oxide, Nitride, Hydride)

→ **Beruhigung** → **Al**

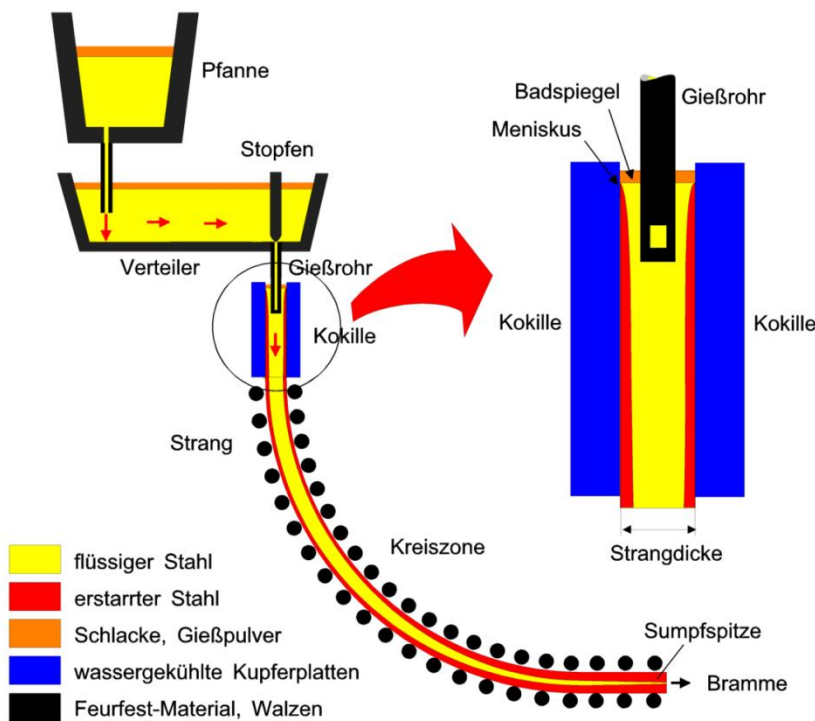
→ **Entgasung** → **Unterdruck**

[Blockguß: ($s > 400 \text{ mm}$)

ist das portionsweise Abgießen des Stahls in Dauerformen (Kokillen). Diese werden nach dem Abkühlen gelagert, bei Bedarf dann wieder erwärmt und verarbeitet. Blockguß verliert zunehmend an Bedeutung und wird nur noch im Bereich von Stücken großer Masse für die Weiterverarbeitung durch Schmieden angewendet.]

Strangguß (Brammenstrangguß): ($60 \text{ mm} < s < 400 \text{ mm}$)

dabei gelangt der flüssige Stahl aus der Gießpfanne über einen Verteilerbehälter unter Luftabschluss in eine kurze wassergekühlte Kupferkokille. Die Form der Kokille bestimmt die Form des Stranges. Vor Gießbeginn wird der Boden der Kokille mit dem so genannten Kaltstrang, einer Gliederkette, verschlossen. Sobald die vorgeschriebene Badspiegelhöhe erreicht ist, wird die Kokille in senkrechte Schwingungen versetzt, damit der Strang nicht an der Kokillenwandung haftet. Der in seiner Randzone erstarrte rotglühende Strang wird zunächst mit Hilfe des Kaltstranges und später durch die Treibrollen aus der Kokille gezogen, während die Kokille von oben ständig mit Flüssigstahl nachgefüllt wird, s. auch folgendes Bild



Eine Stranggießanlage besteht aus

- dem Pfannendrehturm zur Aufnahme der Stahlgießpfanne,
- einer Haltevorrichtung für die Kokillen mit der Schmelze,
- dem Verteiler, der die Schmelze zu den Kokillen leitet,
- der Kokille, dem System für die Strangführung,
- den Segmenten (früher Gießbögen),
- dem Auslaufrollgang,
- der Querteilanlage (Brennschneidanlage),
- der Markiermaschine und
- dem Kaltstrang

Abb. 10: Prinzip einer Stranggießanlage

Das Stranggießen ist vor allem in der Halbzeugfertigung für alle gebräuchlichen Metalle einschließlich Stahl nicht mehr entbehrlich.

Die Schmelze (s. auch [Stahlerzeugung.pdf](#)) wird gewöhnlich mit einer so genannten Pfanne vom Schmelzaggregat über den Gießkran zur Stranggießanlage transportiert und im Pfannendrehturm eingesetzt. Über einen Bodenablass, der durch einen Stopfen oder Schieber verschlossen wird, fließt die Schmelze in den Verteiler. Damit der flüssige Stahl nicht mit dem Luftsauerstoff reagiert, wird der flüssige Stahl in einem Schattenrohr geführt. Die Schmelze wird im Verteiler durch eine Schlackeschicht abgedeckt.

Aus dem Verteiler läuft die Schmelze frei oder durch ein Tauchrohr (auch Gießrohr genannt) in die Kokille. Der Durchfluss wird in Abhängigkeit vom Gießspiegel in der Kokille mit einem Stopfen gesteuert. Der Gießspiegel in der Kokille wird mit Schlacke abgedeckt. Diese verhindert Reoxidation der Schmelze, bindet aufgestiegene Unreinheiten und dient als Schmiermittel zwischen der erstarrten Schale und der Kokille. Zum Bilden der Schlacke wird kontinuierlich Gießpulver auf den Gießspiegel aufgebracht. Während des Gießens wird die Kokille oszillierend bewegt, um ein Anbacken des Stahls an den gekühlten Wänden der Kokille zu verhindern und den Transportvorgang zu unterstützen.

Für das Angießen wird ein Anfahrstrang (Kaltstrang) von unten in die Kokille eingeführt, der die Unterseite verschließt. Der eingefüllte Stahl erstarrt auf dem Anfahrstrang und wird mit diesem nach unten abgezogen. Nach Erreichen der metallurgischen Länge, also der Strecke, die der Strang benötigt, um vollständig zu erstarren, werden der Anfahrstrang und der Gussstrang voneinander getrennt.

Die Kokille kann entweder gerade oder gebogen ausgeführt werden. In geraden Kokillen verlässt der Strang die Kokille senkrecht nach unten. Um eine ausreichende Stranglänge zum völligen Erstarren der Schmelze zu erhalten, muss der Strang mit einer Biege- und Richteinheit in die Horizontale gebogen werden. In gebogenen Kokillen ist der Strang bereits kreisbogenförmig erstarrt, muss dann aber nach Erreichen der Horizontale gerichtet werden. Beide Konzepte haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile, die daraus resultieren, dass einerseits durch das Biegen des Strangs Risse entstehen und andererseits eine lange vertikale flüssige Strecke Vorteile für die Reinheit des Stahles bietet, da Unreinheiten in die Schlacke aufsteigen können. Zum Verbessern der Reinheit wird mit Argon gespült und es kann die Schmelze elektromagnetisch gerührt werden.

Unterhalb der Kokille wird der Strang von außen durch Luft-/Wasserbesprühung gekühlt. Außerdem wird er durch Rollen gestützt, um das Ausbauchen zu verringern, das wegen des auf die Strangschale wirkenden ferrostatischen Druckes erfolgt.

Nach dem Durcherstarren wird der Strang auf dem Auslaufrollgang mit Brennern in Längen geschnitten, um das Halbzeug zu erhalten.

Vorbandgießen (Dünnbrammengießen) ($20 \text{ mm} < s < 50 \text{ mm}$)

Die durch das Vorbandgießen erzeugte Bramme kann direkt in der Fertigstraße eines Warmwalzwerkes angestochen werden kann. Zwischen der Gießmaschine und dem Walzaggregat wird nur noch ein Durchlaufofen benötigt. Stoßofen und Vorgerüst entfallen, Abb s.u.

Das Vorbandgießen oder Dünnbrammengießen ist in Form des **CSP- Verfahrens** (Constant Strip Production) inzwischen eine weltweit etablierte Technik → s. auch Video am Ende des Semesters.

Bandgießen: ($6 \text{ mm} < s < 20 \text{ mm}$)

Ähnlich dem Vorbandgießen. Durch eine Gieß-Press-Anlage wird eine Bramme mit etwa 20 mm Dicke erzeugt, die direkt in der Fertigstraße eines Warmwalzwerkes angestochen werden kann. Zwischen der Gießmaschine und dem Walzaggregat wird nur noch ein Ausgleichofen benötigt. Mit diesem Verfahren können kostengünstig einfache Stahlgüten hergestellt werden. Der Nachteil ist dessen geringe Flexibilität und der tendenziell schlechteren Oberflächenqualität.

Dünnbandgießen: ($1 \text{ mm} < s < 6 \text{ mm}$)

hier erstarrt der Stahl zwischen zwei sich gegeneinander drehenden wassergekühlten Walzen und wird vollständig erstarrt als Band, bis 1,5 mm Dicke, nach unten abgeführt, s. Abb. In die Anlage wird typischerweise ein Walzgerüst eingeordnet, in dem nach einem Walzstich eine minimale Banddicke von 1 mm erreicht werden kann.

Durch die Gießgeschwindigkeit (z.B. 20 m/min) kann der Prozess wie folgt gesteuert werden:

- Gieß-v hoch: Schmelze tropft durch →
- Gieß-v mittel: Walzen dienen nur zur Abkühlung →
- Gieß-v niedrig: Kombination von Gieß- und Walzvorgang:
→ ermöglicht

Ursprünglich wurde das heute verbreitete 2 Rollen Dünnbandgießen (s. Abb.) durch [Henry Bessemer](#) ca. 1860 patentiert. Er konnte es allerdings nicht in die Marktreife überführen. Seit Mitte der neunziger Jahre wird dieses Verfahren für rostfreie Stähle und Elektrostähle industriell genutzt.

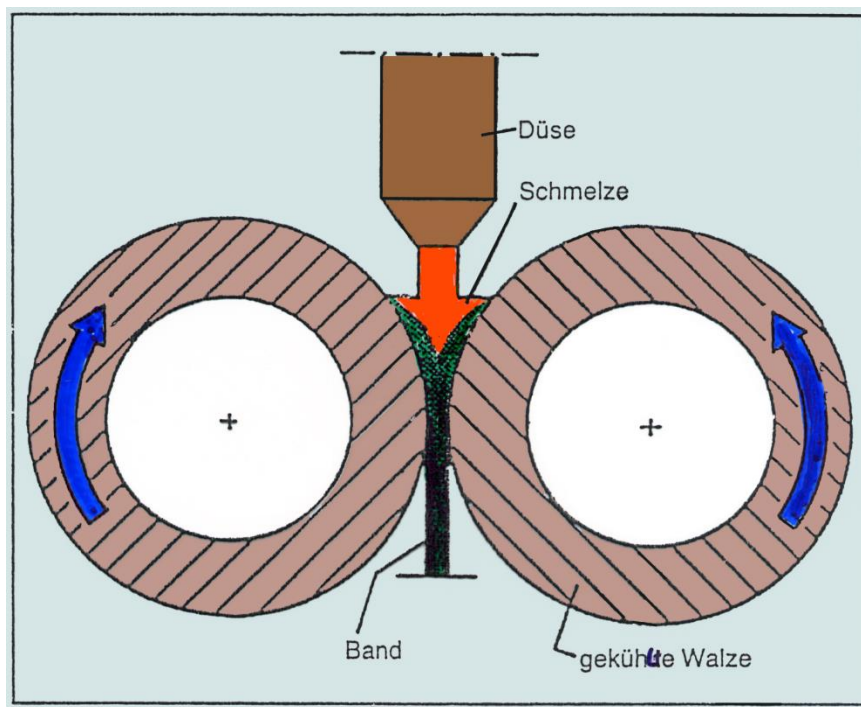


Abb. 11: Schematische Darstellung der Bandherstellung in einer Zwei-Walzen-Gießanlage

Dieses Verfahren hat die Vorteile, dass nur geringe Investitionskosten nötig sind, relativ kleine Mengen kostengünstig herstellbar sind und durch den Wegfall der Wiedererwärmung zum Warmwalzen die Energie zum Wiederaufheizen der Brammen eingespart wird und dadurch mit geringen Kosten produziert werden kann.

Eine schematische Darstellung der Verfahren sowie die Vorteile der neueren Verfahren am Beispiel des Dünnbrammengießens finden Sie in den folgenden Abbildungen:

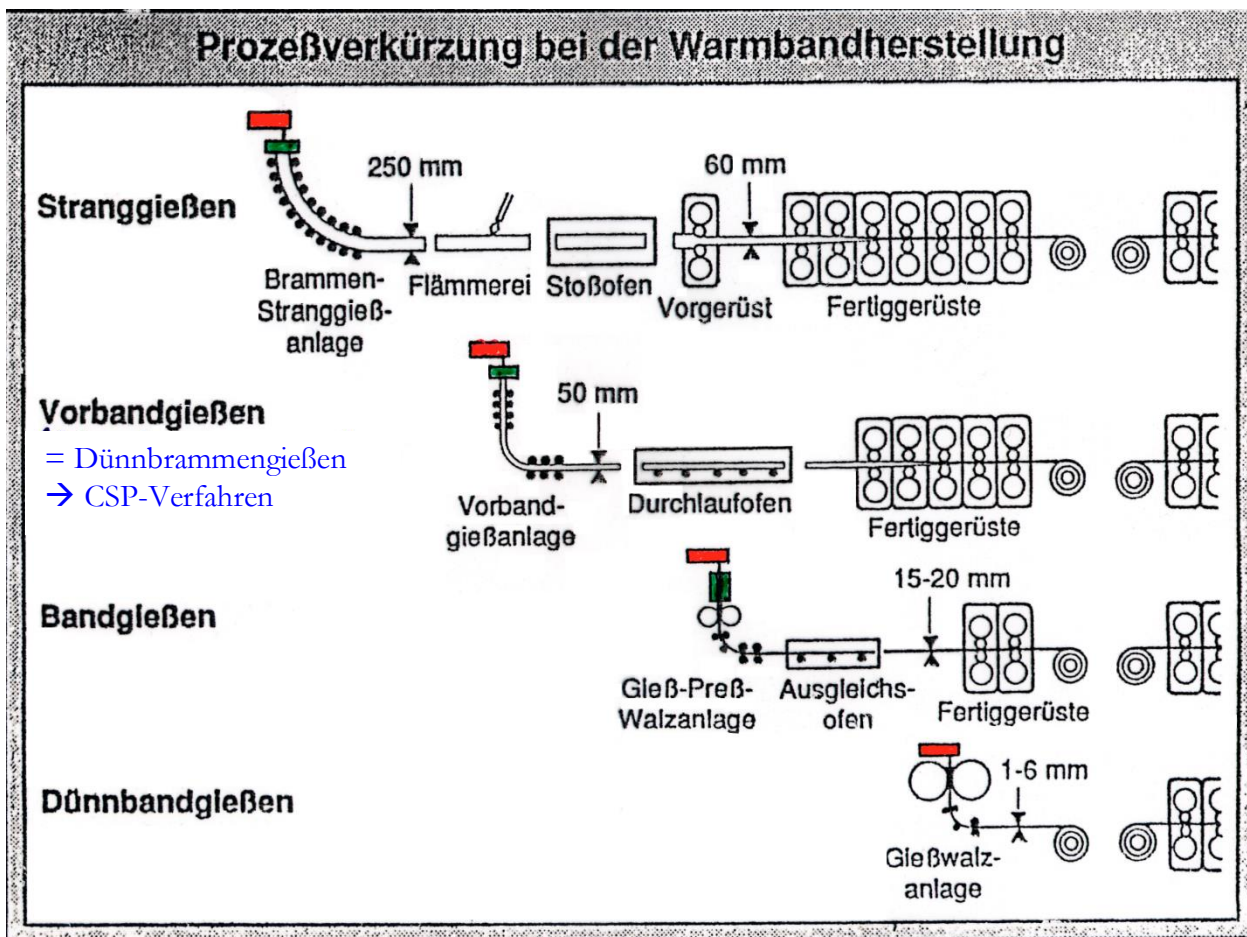


Abb. 12: Warmbandherstellung: Vergleich verschiedener Verfahren

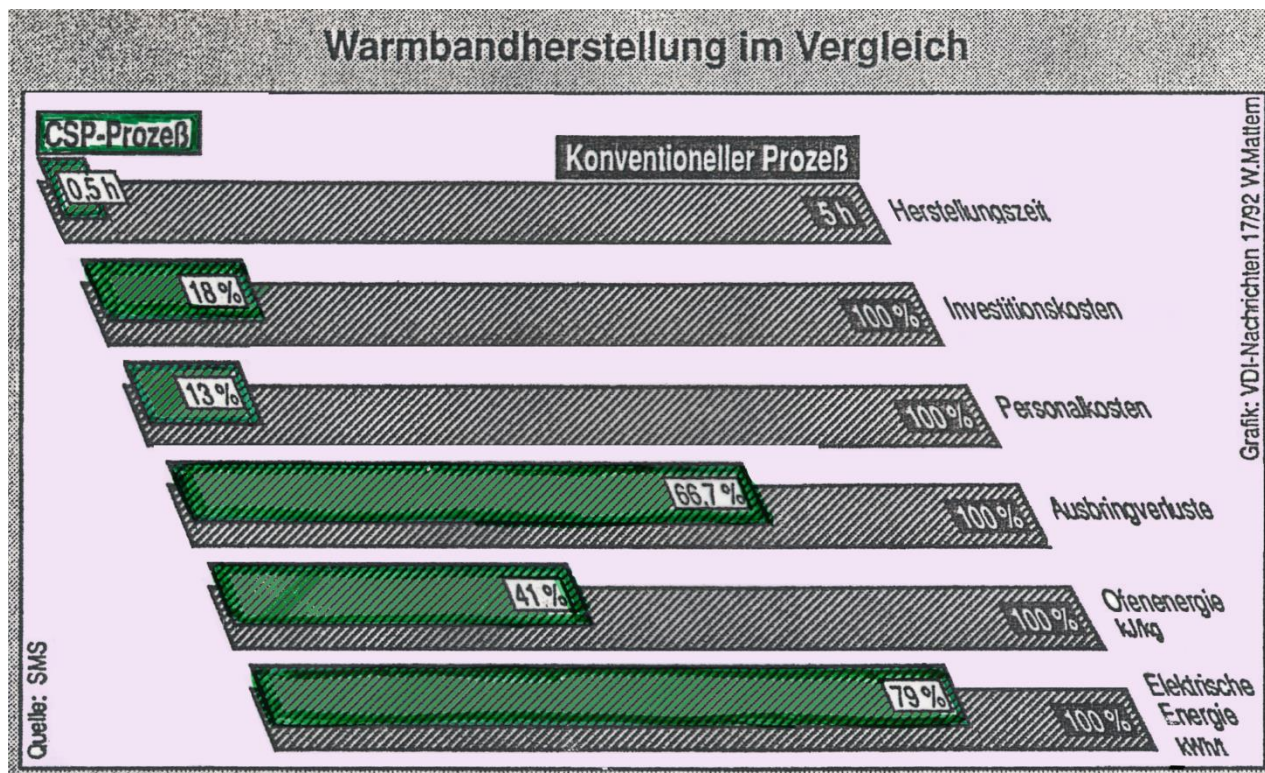


Abb. 13: Warmbandherstellung: Vergleich CSP-Verfahren – konventioneller Prozess

Formguß:

Das Metall wird in eine Form (aus feuerfestem Material) gegossen. Nach Entfernung (meist Zerstörung) der Form ist das Werkstück (bis auf evtl. Nachbearbeitung) fertig → Glocken, Schiffsschrauben...

Blockguß ($s > 400 \text{ mm}$):

Das Metall wird in große Behälter („Kokillen“ aus Stahl, innen feuerfest ausgemauert) gegossen, wo es erstarrt. Nach Erstarren werden die „Blöcke“ in ein Lager transportiert. Bei Bedarf werden sie wieder hervorgeholt, in (Tief-)Öfen erhitzt (z.B. auf 1200 °C bei Stahl) und dann sukzessive heruntergewalzt.

→ teuer und nur noch bei besonderen Werkstoffen angewendet.

Strangguß ($60 \text{ mm} < s < 400 \text{ mm}$):

Das Metall (meist aus Schrott in 2 Elektroöfen erschmolzen) wird in eine spezielle, unten offenen Kokillen gegossen. Nach dem Angießen, das mit Hilfe eines „Kalt-stranges“ erfolgt, kann kontinuierlich weiter gegossen werden. Die Abmessungen des Stranges, der „Bramme“, sind wesentlich geringer als beim Blockguss. Das (Warm-)Walzen erfolgt direkt nach dem Gießen (nach Durchlaufen eines T-Ausgleichsofens).

→ Kostengünstiger als Blockguss, für die Massenproduktion geeignet.

Dünnbrammengießen ($20 \text{ mm} < s < 60 \text{ mm}$):

Stand der Technik.

Dünnbandgießen ($1 \text{ mm} < s < 6 \text{ mm}$):

Führt zu sehr dünnen Brammen. Senkt die Kosten weiter. Geringere Losgrößen möglich. Verfahren noch nicht in großem Umfang angewendet.

Beachte den Einfluss der Gießform und der Abkühlgeschwindigkeit auf das Gefüge und damit auf die Werkstoff-Eigenschaften.

Das nachfolgende Warmumformen führt durch Normalisieren oder Rekristallisieren zur Veränderung des Gefüges und damit zur Verbesserung der Werkstoff-Eigenschaften.

2.1.2 „Galvanoformung“

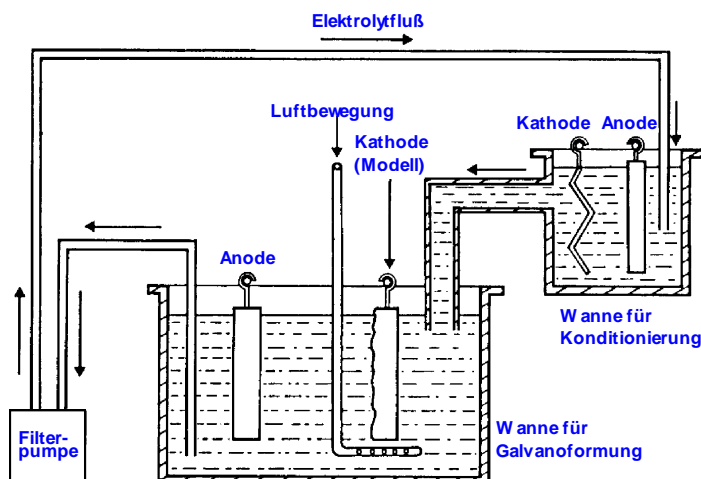
Galvanoformung ist ein Verfahren zur Reproduktion von Teilen durch galvanische Metallabscheidung von (meist) Nickelwerkstoffen auf einem Badmodell mit einer porenfreien Abscheidung von bis zu 10mm Schichtstärke, so dass das Modell als selbstständige Form (Werkzeug) verwendet werden kann.

Galvanoformung / Galvanik (s.u.)

Galvanoformung	Galvanik (Galvanisieren)
Schicht (<u>eigenständiges Werkstück</u>) auf Modell	Schicht auf Werkstück
Wandstärke i.a. im mm-Bereich ⇒ (selbsttragendes Werkstück, i.A. < 10 mm)	dünnere Überzug, z.B. 20 µm ⇒ (Korrosions-, Verschleißschutz, Optik)
Niederschlag (Werkstück) leicht vom Modell entferntbar	Niederschlag (Schicht) haftet fest

Benötigte Hardware bei der Galvanoformung:

- ❑ Tank (Wanne) / Filterpumpe / Badbewegung/ -beheizung / Gleichrichter



Typische Wannenanordnung für eine Galvanoformungsanlage mit Ni-Speed-Elektrolyten

Abb. 14: Galvanoformungsanlage (schematisch)

Elektrolytbestandteile: (Ni-Speed-Elektrolyt)

- ❑ $\text{NiSO}_4 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ oder $\text{Ni}(\text{NH}_2\text{SO}_3)_2$ ⇒ Ni^{++} - Ionen-Lieferant
- ❑ NiCl_2 ⇒ verbessert die Leitfähigkeit (nur Wattscher El.)
- ❑ H_3BO_3 ⇒ puffert den pH-Wert, erniedrigt die Porenanzahl
- ❑ Tenside ⇒ Netzmittel (z.B. "Spüli")
- ❑ $\text{Co}(\text{NH}_2\text{SO}_3)_2$ ⇒ Co^{++} - Ionen-Lieferant (Ni-Co-Legierungen)
- ❑ Amidosulfonsäure ⇒ pH-Wert ↓
- ❑ $\text{Ni}(\text{OH})_2$ ⇒ pH-Wert ↑
- ❑ Schwefel ⇒ Härte, Versprödung
- ❑ Sacharin ⇒ σ ↓
- ❑ 2 Butin1,4-diol ⇒ Einebnung

Teilschritte bei der Herstellung einer Galvanoform:

- ❑ Herstellung eines Modells (Formkörpers)
- ❑ Galvanisches Abscheiden einer ausreichend dicken Metallschicht
- ❑ Trennen des galvanogeformten Werkstücks vom Modell
- ❑ Eventuelles Nachbearbeiten (hinterfütern, spanend)

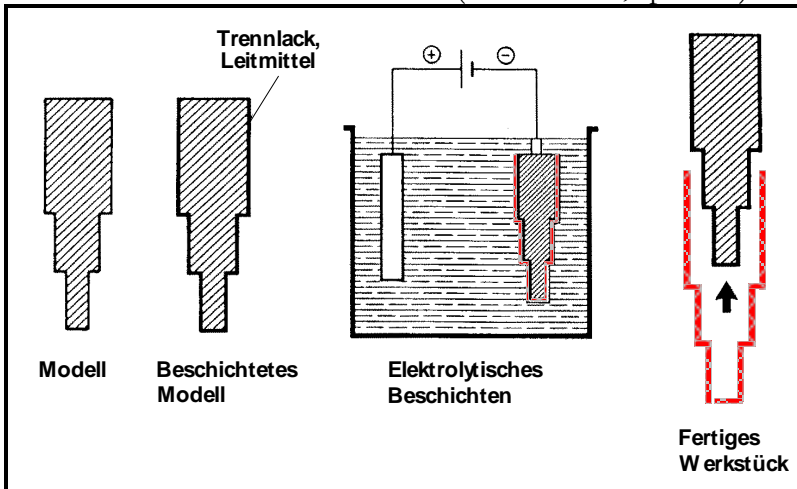


Abb. 15

Arbeitsweise bei der Galvanoformung

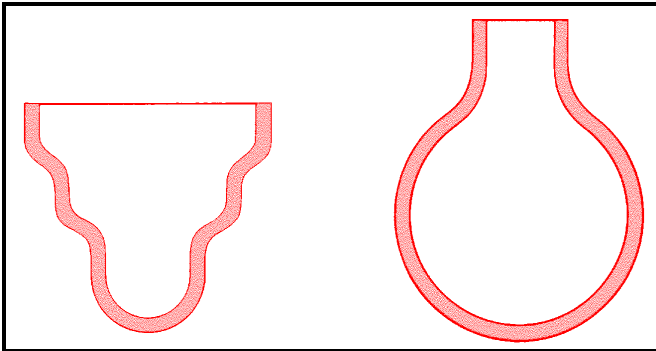


Abb. 16:

Modelle für die Galvanoformung für Teile ohne (links) und mit Hinterschneidung (rechts)



Abb. 17:

Schäumform für das Lenkrad des VW-Passat

Beispiel: Schritte bei der Herstellung einer Galvanoform für ein Pkw-Lenkrad:

1. Bau eines "Original"-Lenkrades von Hand, z.B. lederüberzogen
2. Erzeugung von 2 Negativen (Halbformen) aus Epoxidharz
3. Erzeugung von 2 Positiven (Halbformen) aus Epoxidharz ⇒ Modelle
- 3a deren Oberfläche wird leitfähig gemacht (i.a. "versilbert")
4. Einbringen in den Elektrolyten ⇒ 2 Negative aus Nickel ⇒ Galvanoformen (die darin geschäumten/gespritzten/gegossenen Kunststoffteile ergeben wieder ein Positiv/Original)
- 4a. Trennen der Galvanoform vom Modell
5. Nachbearbeitung (Adaptierung an den Kunden, s.o.) ⇒ fertige Galvanoform als Produktionsform zum Schäumen, Gießen oder Spritzen von Kunststoffen

weitere Anwendungsbeispiele:

Spritz- und Druckgießformen für die Kunststoffindustrie (Armaturenbretter, Lenkräder...)

Scherblätter für Elektro-Rasierer, Siebe für analytische Zwecke, Preßmatrizen für CDs,

in der Mikrosystemtechnik, und zwar als Mikrogalvanoformung, auch lithografisch-galvanische Abformungstechnik :

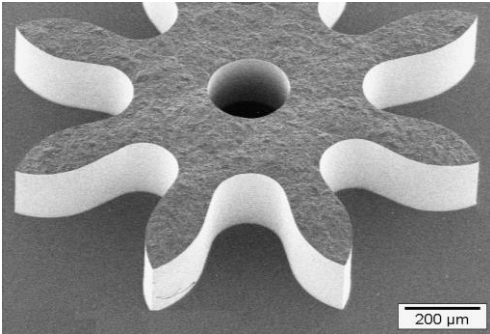


Abb. 18:

Mikro-Zahnrad →

„Mikro“Galvanoformung



Abb. 19:

Erosiosschutz für Hubschrauberrotoren →

„Makro“Galvanoformung

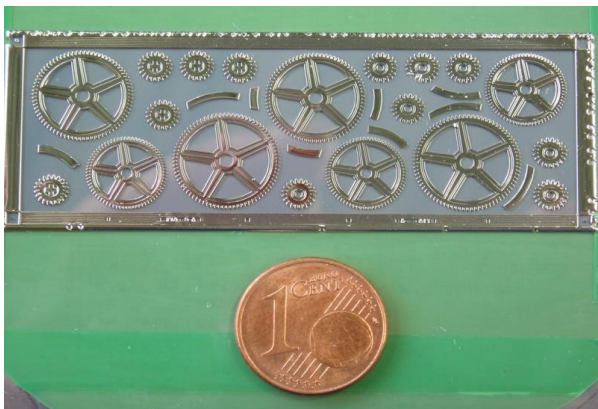


Abb. 20: Mikrobauteile, z.B. für Uhren

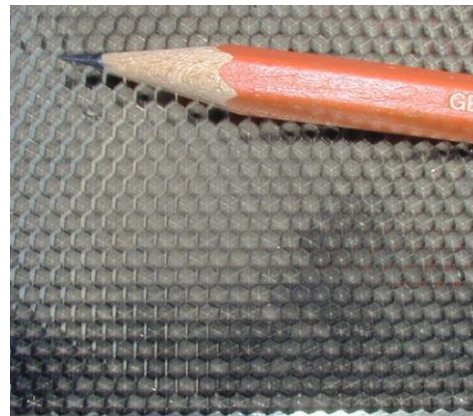


Abb. 21: Hochpräzise galvanische Abformung eines Reflektors.

beachte: _____ "

*Weitere Informationen zum Galvanoformen finden Sie im entsprechenden [Praktikums-Skript](#) auf meiner homepage sowie Internet unter:

<http://www.fi-sch.de/>

<http://www.elektroform-galvano.de/>

Buchtipps:

S.A. Watson, „Galvanoformung mit Nickel“, Eugen G. Leutze-Verlag, ISBN 3-87480-050-4

N. Kanani, „Galvanotechnik“, Hanser-Verlag, 2000, ISBN 3-446-214024-5-050-4

2.1.3 Urformen: "Sintern"

Die Sintertechnik gestattet die Herstellung von Fertigteilen und Halbzeugen unter Umgehung der flüssigen Phase. Sie findet insbesondere Anwendung bei der Herstellung von Bauteilen aus hochschmelzenden oder schwer bearbeitbaren Werkstoffen. Ausgangsprodukte sind Pulver.

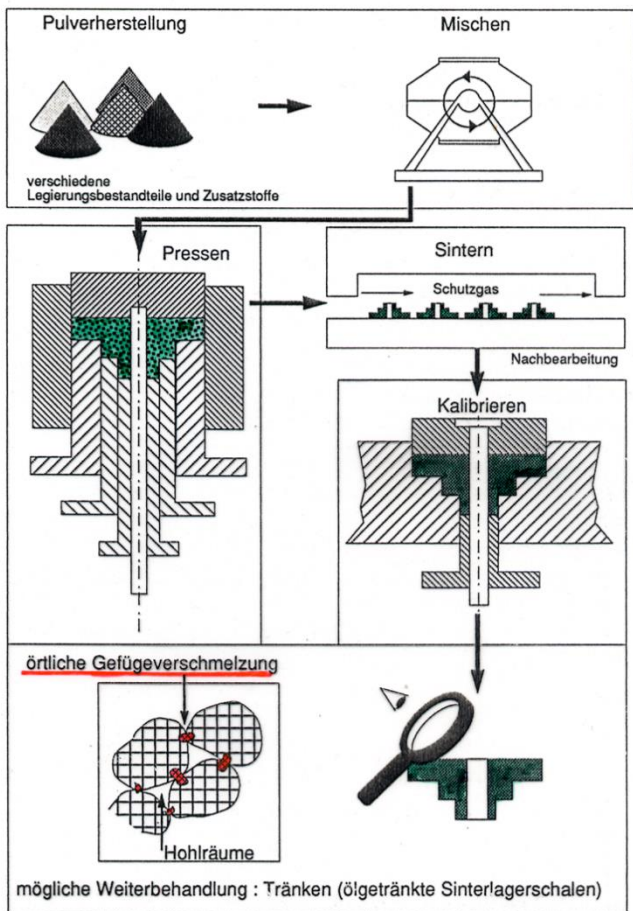


Abb. 22: Fertigungsprozeß beim Sintern

Der Fertigungsprozeß besteht aus drei Teilen:



Erfolgt auch die Wärmebehandlung unter Druck, spricht man vom Drucksintern, werden die Vorgänge Pressen und Sintern wiederholt, vom Doppelsintern.

Details s. nächste Seite.

Beim Sintern werden Pulvermassen zunächst so geformt, dass wenigstens ein minimaler Zusammenhalt der Pulverpartikel gegeben ist (evtl. Hilfsmittel). Deshalb darf z.B. bei der Pulvermetallurgie die Korngröße 0,6 mm nicht übersteigen. Der vorgepresste **Grünling** wird im Anschluss durch Wärmebehandlung unterhalb der Schmelztemperatur verdichtet und ausgehärtet.

Die Herstellung des Grünlings erfolgt dabei entweder durch Verpressen von Pulvermassen (Herstellung technischer Produkte) oder durch Formung und anschließendes Trocknen (beispielsweise bei der Herstellung von Steinzeug oder Tongut).

Der Sintervorgang läuft in drei Stadien ab, während derer sich die Porosität und das Volumen des Grünlings deutlich verringert. Im ersten Stadium erfolgt lediglich eine Verdichtung des Grünlings, wohingegen sich im zweiten Stadium die offene Porosität deutlich verringert. Die Festigkeit der Sinterkörper beruht auf den im dritten Stadium gebildeten Sinterhälsen, die durch Oberflächendiffusion zwischen den Pulverpartikeln entstehen.

In manchen Fällen erfolgt nach dem letzten Vorgang noch ein Kalibrieren des Werkstückes, meistens wenn eine sehr hohe Maßgenauigkeit erforderlich ist, welche durch den nicht exakt berechenbaren Volumenverlust nicht durch reines Sintern erreichbar ist. Dabei wird das quasi fertige Werkstück noch einmal unter hohem Druck in eine Form gepresst. Somit ist eine hohe Maßhaltigkeit oder z.B. die Einhaltung der technischen Toleranzen (Form- und Lagetoleranz) möglich.

Man wendet das Sintern heute im Bereich der Minerale (Keramik), technischen Keramik, Metalle (Pulvermetallurgie) und Kunststoffe an. Im Bereich des Rapid Prototyping verwendet man auch Laser, um das lokale Verschmelzen zu erreichen und nennt dies Lasersintern, s.o.



Sinterprodukte

- Gebrauchskeramiken (Porzellangeschirr) und technisches Porzellan (beispielsweise Isolatoren)
- aber auch Bauteile wie Schneidkeramik oder keramische Magnete
- Metallische Form- und Fertigteile in großen Serien,
 - vor allem in der Automobilindustrie, z.B. Lager und Lagerschalen, Gleitlager, Bauteile für Motoren und Getriebe, Siebe, Filter und Dauermagnete,
 - aber auch Werkzeug-Teile oder Wendeschneidplatten aus Hartmetallen.
- Zahntechnik verwendet Sintern zur Herstellung von Keramikzähnen, Verblendungen

Produktbeispiele (Näheres in VL)



Abb. 23:
Sinterprodukte

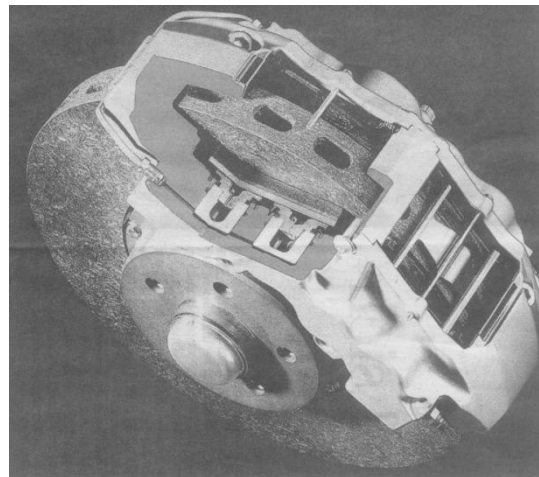


Abb. 24:
Motorrad-
Bremsbeläge
(Honda Fireblade)



Druck-Sinterprodukte

Abb. 25



Keramikbremse

Abb. 26:

Im Versuchsstadium: Ventile für PkW-Motoren

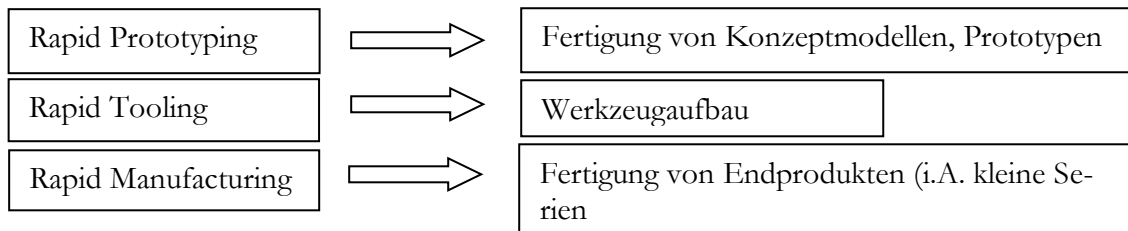
2.1.4 Urformen: "Rapid Prototyping"

Unter dem Begriff des Rapid Prototyping werden alle technischen, methodischen und organisatorischen Maßnahmen zusammengefasst, die von der Formulierung einer Produktidee bis zum fertigen Produkt führen.

Heute meint man damit i.a. Verfahren, die zur spanlosen Fertigung von Modellen (Produktentwicklung) und Bauteilen in vergleichsweise kurzer Zeit zu verringerten Kosten führen. Diese sind „generatives Fertigungsverfahren“ → Werkstück wird schichtweise aufgebaut. Ausgangsmaterial: Pulver (Kunststoff, Stärke, Metall), flüssige Harze, kunststoffbeschichtete Folien, Kunststoffdraht.

Beispielartikel sowie Beispiele einzelner Produkte s. die nächsten Seiten inkl. Links sowie im auf meiner Homepage unter „[Rapid Prototyping](#)“.

Man unterscheidet folgende Anwendungen:



Die Herstellung verläuft schichtweise (layers). Voraussetzung: ein 3-dimensionales Volumenmodell (CAD), das das Bauteil in Schichten (z.B. 1/100tel mm) enthält.

Idee: Herstellung fertiger Modelle ohne produktspezifische Werkzeuge in kurzer Zeit.

Funktionsweise: schichtweise Fertigung, s. folgende Abbildungen

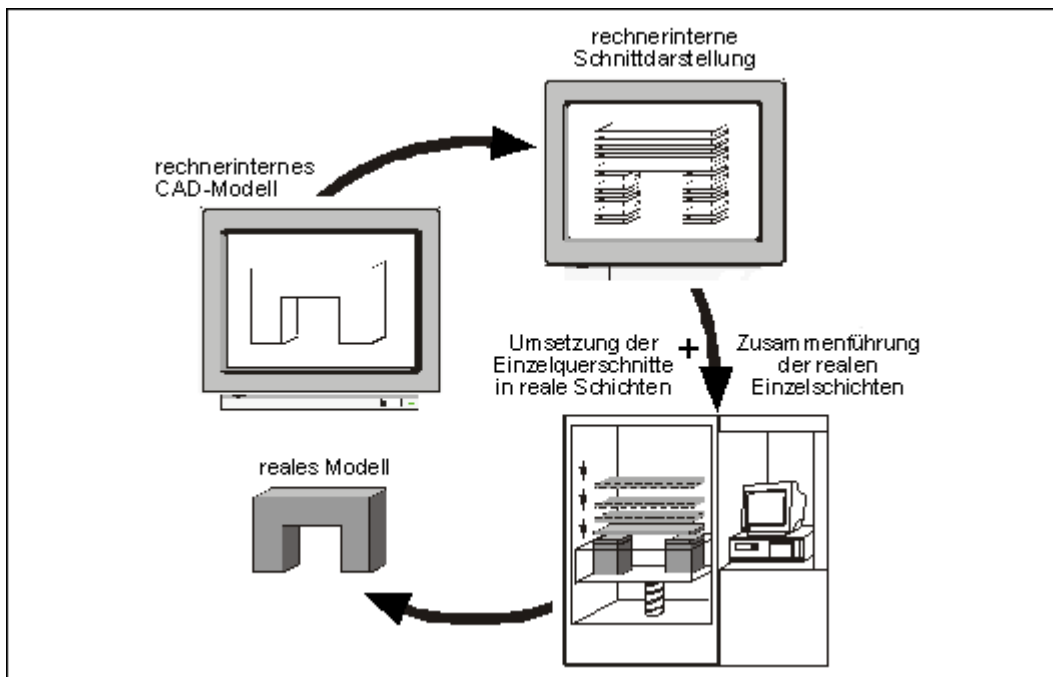


Abb. 27: Fertigungsablauf beim Rapid Prototyping

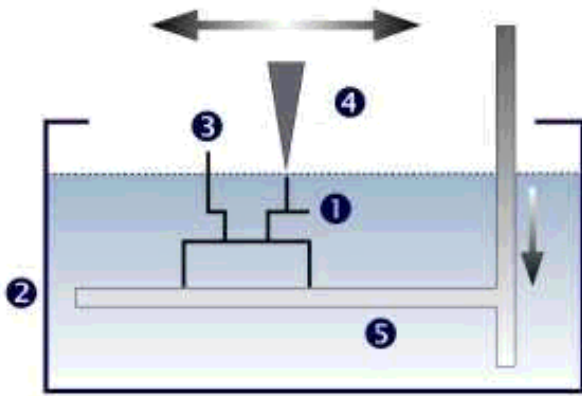


Abb. 28: a) Prinzipdarstellung

b) „ThermoJetPrinter“

Zunächst wird das vorhandene 3D-CAD-Modell mit Hilfe der STL-Schnittstelle (Standard Transformation Language) in einen standardisierten Datensatz transformiert. Der STL-Datensatz beschreibt die Bauteilgeometrie (1) durch sehr dünne Schichten und wird auf den Prozessrechner der Stereolithographie-Maschine (2) übertragen. Beim Stereolithographie-Prozess wird die Oberfläche eines flüssigen Photopolymer-Harzes (3) mit einem UV-Laserstrahl (4) gemäß dem STL-Datensatz selektiv belichtet. Das Harz härtet durch die Einwirkung des Lasers an den belichteten Flächen aus. Dann wird die Bauteilplattform (5) abgesenkt und eine neue dünne Schicht Photopolymer-Harz aufgetragen. Durch Wiederholung dieser Schritte wird sukzessive die vollständige Geometrie von unten nach oben auf-gebaut. Das so entstandene Bauteil wird abschließend nachgehärtet und entgratet.

Vorteile: schnelle Fertigung von Modellen bis hin zu Vor- und Kleinserienteilen ohne Einsatz von produktspezifischen Werkzeugen.

Beachte:

- z.T. Nachbearbeitung der Oberfläche nötig, da die Bauteile schichtförmig aufgebaut sind
- die mechanischen Eigenschaften sind richtungsabhängig, wenn die Verbindung der Schichten durch Hilfsstoffe (Klebstoff) erfolgt

Verfahren (Auswahl):

A) Stereolithographie (SL, ältestes Verfahren)

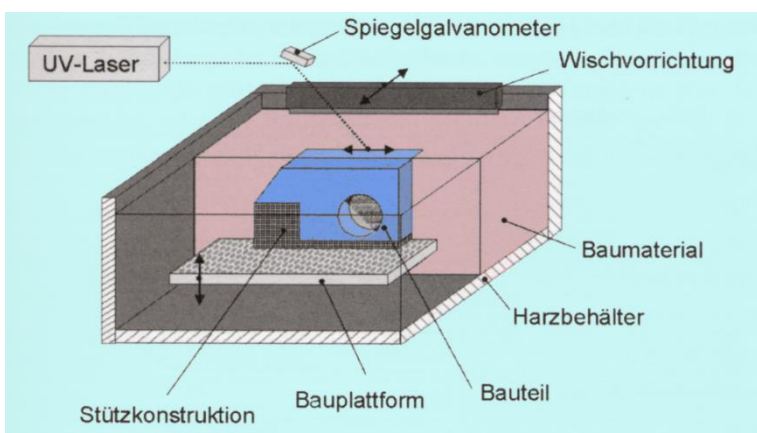


Abb. 29:

Stereolithographie, schematische Darstellung

Die Stereolithographie (SL) war der Auslöser sämtlicher Entwicklungen auf dem Gebiet der generativen Fertigung, da sich mit ihr erstmals eine schichtweise Fertigung umsetzen ließ. Bei den eingesetzten Baumaterialien handelt es sich um flüssige Harze, die durch Bestrahlung mit UV aushärten. Zu Beginn des Prozesses ist der Bauraum mit dem benötigten Werkstoff gefüllt. Bei den Anlagen, in denen ein Laser die Be-

lichtung der Geometrien übernimmt, befindet sich die Bauplattform zu Beginn etwa eine Schichtdicke unterhalb des Flüssigkeitsspiegels. Der Laser schreibt die aktuelle Schichtstruktur in das Harz, und die Plattform senkt sich um eine weitere Schichtdicke ab. Eine Wischvorrichtung sorgt für die Glättung des nachfließenden Harzes, Die nächste Schicht wird generiert (s. Abb. oben). Da überhängende Strukturen zum Absinken im Harzbad neigen, sind auf jedes Teil abgestimmte Stützen mitzubauen.

Die Stereolithographie gilt als das genaueste aller generativen Verfahren. Lediglich der Laserstrahldurchmesser begrenzt die Auflösung der Linienbreite und somit der minimalen Wandstärke. Hohlräume sind mit der Einschränkung darstellbar, dass Öffnungen zum Herausfließen des unvernetzten Harzes vorhanden sein müssen. Die Transparenz vieler SL-Werkstoffe erlaubt weiterhin die Betrachtung solcher Hohlräume. Überschreitet die Größe eines Modells den möglichen Bauraum, besteht die Möglichkeit, das Modell mehrteilig zu bauen und zusammenzukleben. Die Festigkeit ausgehärteter SL-Teile erlaubt eine Nachbearbeitung durch Sandstrahlen, Schleifen, Lackieren und teilweise spanende Verfahren.]



Abb. 30:

Beispiel eines Bauteils, hergestellt mittels Stereolithographie

B) LASER-Sintern,

Das Lasersintern (LS) zählt zu den am häufigsten angewendeten Verfahren, da es Modelle mit seriennahen Eigenschaften liefert. Es lassen sich Werkstücke aus Kunststoffen und neuerdings auch aus Metallwerkstoffen herstellen. Der Begriff Lasersintern leitet sich aus der Ähnlichkeit mit dem aus der Pulvermetallurgie bekannten Fertigungsverfahren Sintern ab. Aus einem pulverförmigen Ausgangsmaterial wird durch Aufschmelzen eine Sinterhalsbildung mit anschließendem Verschmelzen der Partikel eingeleitet, nach Abkühlung hat sich ein fester Werkstoffverbund gebildet. Der Parameter Druck fehlt hier gegenüber dem herkömmlichen Sintervorgang.

In der Abb., s.u., ist das Verfahrensprinzip dargestellt. Auf der Bauplattform befindet sich vorgeheiztes Pulver, welches durch einen CO_2 -Laser geometrieabhängig aufgeschmolzen wird. Ein Spiegelsystem dient zur Führung des Laserstrahls, welcher zeilenweise die zu generierende Kontur überstreicht.

Durch die Versinterung entweicht die im Pulver enthaltene Umgebungsluft, und es findet eine Dichtesteigerung statt, die mit einer Schrumpfung einhergeht. Die hohe Vorwärmtemperatur verhindert eine starke Abkühlung der Schichten während des Bauprozesses und minimiert die Schrumpfung. Ist eine Schicht generiert, wird der Bauraum um den Betrag der voreingestellten Schichtdicke abgesenkt und neues Pulver aufgetragen. Dies kann einerseits mittels einer Walze, die einen Pulverhaufen vor sich her schiebt, oder (wie in der Abb.) durch Überstreichen des Pulverbettes mit einer werkstoffgefüllten Rinne erfolgen. Abschließend wird das neu aufgetragene Pulver auf die Vorwärmtemperatur aufgeheizt und die nächste Schicht gesintert. So entsteht Schicht für Schicht das Bauteil. Es ist dabei dauerhaft von nicht versintertem Pulver umgeben, welches eine stützende Wirkung hat.

Ist ein Bauprozess beendet, muss man den Pulverkuchen, der die Teile enthält, bis zur Formstabilitätstemperatur abkühlen, weil sonst die Teile schockartig abkühlen und Verzug auftritt. Im schlimmsten Fall ist das Produkt dann unbrauchbar. Nach der Entnahme sind die Teile einsatzbereit.

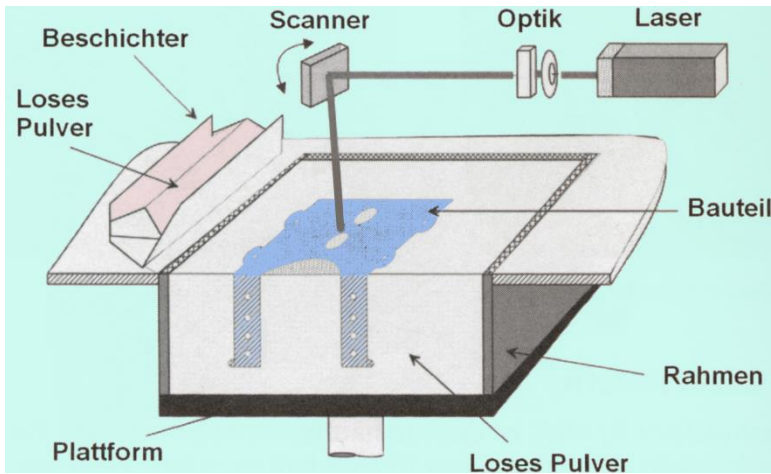


Abb. 31:

LASER- Sintern,
schematische Darstellung

Leistungsdaten (Beispiel 2010):

Bauraum: 250x250x215 mm³
 Schichtdicke: 20 – 100 µm
 Laserleistung: 200 W
 Scange-
 schwindigkeit: 7 m/s

C) Selektives LASER-Melting

Selektive Laser Melting (SLM) ist ein neuartiges Rapid Tooling-Verfahren, das durch die hohe Schmelzleistung des Lasers in der Lage ist, aus handelsüblichen Metallpulvern 100% dichte Teile zu fertigen. Die Teile oder speziell Werkzeuge werden, wie bei anderen Rapid Prototyping-Anwendungen, schichtweise aufgebaut. Dabei wird das verwendete Pulver mit einem intensiven Laserstrahl, der gemäß der jeweiligen Schichtgeometrie geführt wird, lokal begrenzt aufgeschmolzen. Mit dem SLM-Verfahren ist es möglich, feinste Details, z. B. dünne Wände, mit weniger als 100 µm Dicke, zu bauen. Direkt nach dem Bauprozess weisen die Teile oder Werkzeuge an den Oberflächen R_z Werte von 10 ... 30 µm auf. Da die SLM-Teile 100% Dichte und ähnliche Materialeigenschaften wie herkömmlich gefertigte Teile aufweisen, können sie wie konventionelle Metallteile bearbeitet werden (Bohren, Fräsen, Gewinde-schneiden, Polieren, Tempern und evtl. Härten). Ein großer Vorteil der generativen Fertigung ist die Möglichkeit, Formenkavitäten zu erzeugen, die oberflächennahe Kühlkanäle (conformal cooling) aufweisen. Diese an der Werkzeuoberfläche angelegten Bohrungen ermöglichen ohne die bekannten Einfallstellen im Kunststoff durch effektives Kühlen schnellere Zyklus- bzw. Entformungszeiten beim Spritzgießen.

Beispiel: Fertigung einen Leitrades

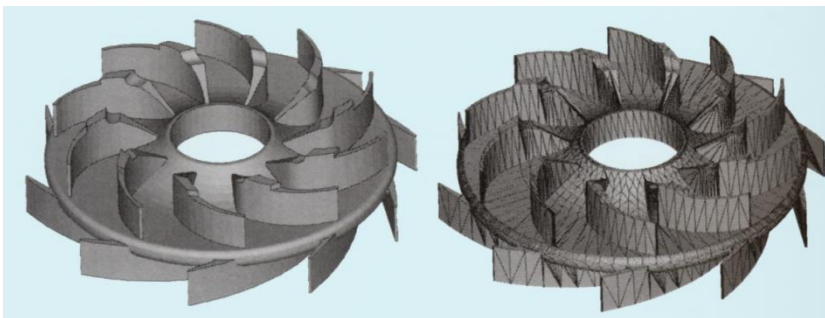


Abb. 32:

a) Darstellung des Leitrades
im STL-Format

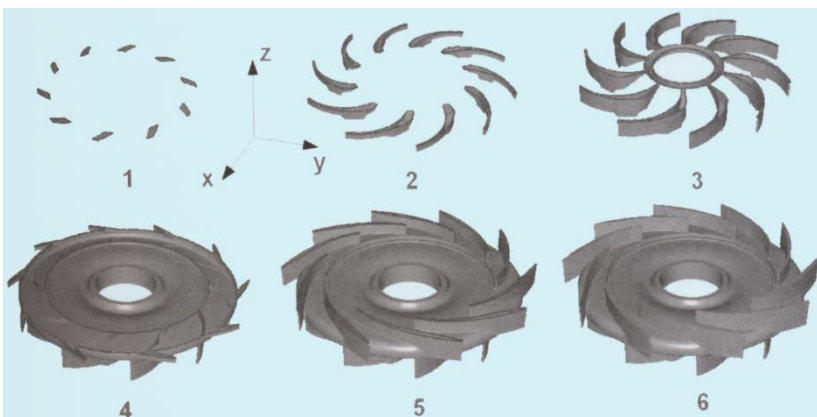
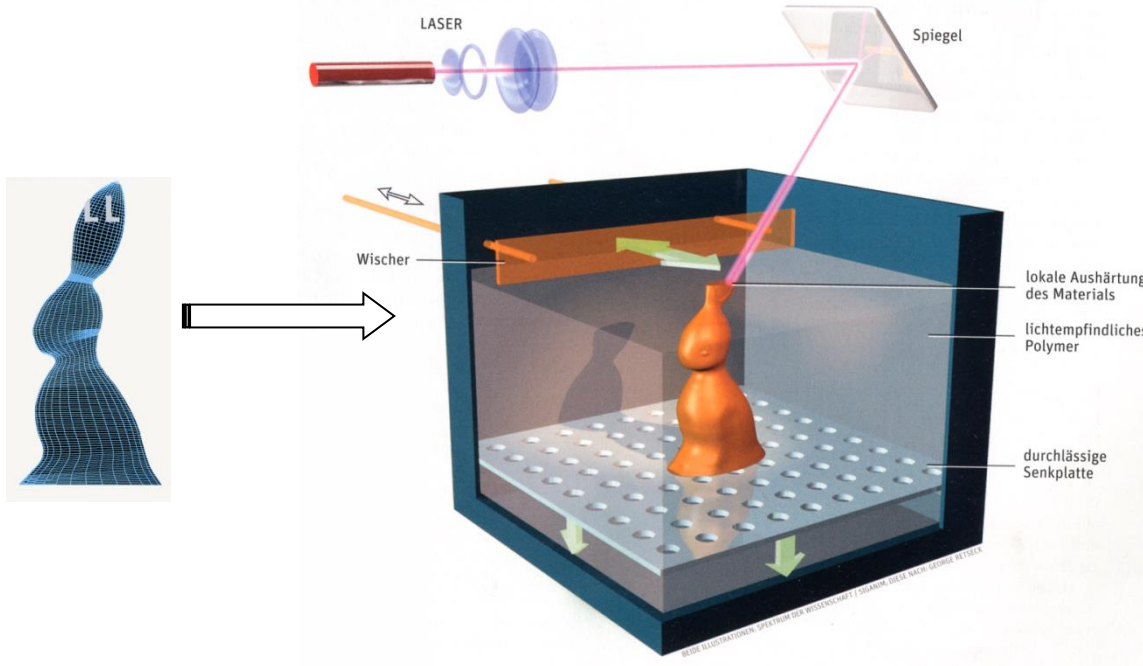


Abb. 33:

b) Grundprinzip der generati-
ven Fertigung

gaben erwähnten Taschenbuch der Fertigungstechnik von G. Witt.

Nach dem gleichen Prinzip erfolgt die Herstellung für Formen von Osterhasen, s. Deckblatt des Skriptes.



→ s. auch Videos in VL

Fazit:

Rapid Prototyping ist heute

Anbieter von 3D-Druckern für zu Hause sind z.B. RepRap, Fab@home oder MakerBot.

Auf <http://www.thingiverse.com> finden Sie eine große Auswahl von Datensätzen für Teile zum Ausdrucken mit dem 3D-Drucker. Wenn Sie keinen 3D-Drucker haben, können Sie die Datensätze z.B. bei <http://www.rapidobject.com> ausdrucken und sich die Teile per Post zuschicken lassen !

**Ein brandneues Buch (9/2013) zum Thema:
„Additive Fertigungsverfahren“
Verlag Europa Lehrmittel**

Weitere Informationen zum Thema s.: <http://www.3dsystems.com/>

3-D-Drucker zu kleinem Preis

VDI nachrichten, Berlin, 6. 9. 13, pek
Der FreeSculpt 3-D-Drucker und Kopierer EX1 von Pearl versteht sich mit einem Kurs von etwa 1100 € als Preisbrecher. Zusammen mit einer Kamera und der 3-D-Scan-Software wird 3-D-Drucken und -Kopieren kinderleicht: Das Objekt wird mit der Scan-kamera fotografiert, bei Bedarf am Computer bearbeitet und sofort am 3-D-Drucker ausgedruckt. Sogar eigene Vorlagen, auch Gesichter, können eingescannt und als 3-D-Objekte ausgedruckt werden. kle

Foto: Pearl

Rapid Prototyping (Zusammenfassung)

Primär:

Schnelle Erzeugung von Anschauungsmodellen sowie reale einsetzbaren Prototypen (Testmodelle) und Bauteilen aus 3D-CAD-Daten.

Prinzip:

Schichtweises Erzeugen von 3-dimensionalen Bauteilen aus Harzen, Wachsen oder Pulvern (Metall / Kunststoff / Keramik) mit Hilfe eines Computers.

Vorgehensweise:

Erzeugung eines 3D-Abbildes des Bauteils im PC (CAD). Aufspaltung in dünne Schichten. Übermittlung der Daten der untersten Schicht an ein geeignetes Ausgabesystem. Mit Hilfe eines geeigneten Verfahrens wird dann eine Schicht der gewünschten Kontur und Dicke erzeugt ⇒ Oberfläche stufig ⇒ mechanische Nachbehandlung

Verfahren: z.B. LASER-Sintern, Stereo-Lithographie

Beispiel: Rapid-Steel-Verfahren: Es wird ein metallischer Prototyp aus Stahlpulver erzeugt, dessen Körnchen mit Kunststoff umhüllt sind. Der Prototyp entsteht, indem die Kunststoffumhüllung der Körnchen in aufeinander folgenden Schichten durch einen Laserstrahl an den gewünschten Stellen miteinander versintert wird. Das Resultat ist ein poröser, metallischer "Grünling". In einem Ofen wird er dann bei hoher Temperatur metallisch versintert und anschließend mit einer Bronzelegierung getränkt. Das Ergebnis ist ein dichter metallischer Prototyp, der auch Hohlräume und Hinterschneidungen aufweisen kann. Das Material ist porenfrei, die damit erzeugten Spritzgußteile haben eine sehr gute Oberflächenqualität. Darüber hinaus ist der Werkstoff lötlbar, so dass bei Konturänderung oder Formschäden schnelle Reparaturen möglich sind.

Fertigung in Stunden bis Tagen möglich. Dank neuer Werkstoffentwicklungen (z.B. PA mit 95% der Dichte vom Spritzguss, spezielle Stahlpulver) realer Einsatz der Bauteile möglich (kleine Stückzahlen).

Beispielanwendungen:

- Formel 1 (Minardi): Radnaben, Getriebe- und Steuergehäuse (Ti)
- Spritzgießwerkzeuge (50.000 - 100.000 Produktionszyklen, Gussformen nach Kunststoffmodell)
- (PA, PU-Bauteile) für Heißwasser-/Öl-Kreisläufe (auch im PKW)
- Zahnräder (stahlähnlich, C35) für kleine Getriebe
- Abgasturbolader für Dieselmotoren (3K Warner)

Fazit:

Rapid Prototyping ist heute eines der wichtigsten Werkzeuge in der Produktentwicklung sowie eine Alternative zu den herkömmlichen Verfahren bei der Herstellung von Kleinserien.

Das Kapitel 2.2 (Umfomen) ist Hauptthema der Vorlesung (ab Kap. 3, s.u.).

2.3 Fügen : „Kleben“

(Das Hauptverfahren „Schweißen“ wird von Prof. Wörner im Rahmen einer Vorlesung und eines Praktikums besprochen)

Kleben ist in der Fügetechnik das Mittel der Wahl beim Leichtbau und zugleich eine Querschnittstechnologie, deren Bedeutung in den letzten Jahrzehnten kräftig zugenommen hat. In 2013 werden ca. 870.000 t in Deutschland hergestellt. Im Auto werde durchschnittlich 20 kg Klebstoff eingesetzt.

Vorteile:

- Unterschiedliche Materialien z.B. Metalle und Nichtmetalle können verbunden werden.
- Dichte Verbindungsfugen → keine Korrosion; da kein Wasser eindringen kann
- Besseres Dämpfverhalten → weniger Lärmentwicklung
- Ausgleich von unterschiedlichen T-Koeffizienten (Ausdehnung)

Klebtechnik kann herkömmliche Fügeverfahren wie Schweißen, Schrauben oder Nieten ersetzen. Konstrukteure sollten aber bereits bei der Entwicklung ihrer Produkte die speziellen Anforderungen der Klebtechnik berücksichtigen.

Beim Kleben kommt es primär auf die (chemische) Verbindung des Klebstoffes (Kunststoffes) mit den zu fügenden Werkstoffen und die Festigkeit, Dehnbarkeit, T-Beständigkeit, chemische Beständigkeit und Alterungsbeständigkeit des Klebstoffes an. All dies ist im Wesentlichen auf chemische Grundlagen zurückzuführen, auf die hier nicht näher eingegangen wird.

Beim Fertigungsverfahren „Kleben“ sind je nach Klebstoff und Werkstoff die Parameter Oberflächenvorbereitung, Temperatur, Anpressdruck und -zeit von Bedeutung.

Klebgerecht konstruieren:

Wichtig sind ausreichend große Klebflächen, ein korrekter dimensionierter Klebspalt, gleichmäßige Spannungsverteilung sowie die Vermeidung von Schäl- und Biegebeanspruchung. Eine konstante Klebstoffdicke läßt sich beispielsweise über eine definierte Auflagefläche gewährleisten wenn, am Bauteil Abstandhalter integriert sind oder eine geeignete Nut-Feder-Geometrie vorhanden ist.

Oberfläche vorbereiten (Wichtig bei allen Verfahren der Oberflächentechnik!)

Der Klebstoff muß die Oberfläche gut benetzen können, damit ausreichend Bindungskräfte gebildet werden. Kunststoffteile lassen sich durch Entfetten Plasma-Behandlung oder Beflammung von haftmindernden Substanzen reinigen. Ein Aufrauen der Oberfläche durch Schleifen oder Strahlen kann zudem die Anbindung der Fügestelle verbessern.

Kleben statt Nieten, Schrauben, Schweißen am Beispiel: Verbindungstechnik im Automobil:

In der modernen Fahrzeugherstellung lassen sich fast alle Bauteile mit Hilfe industrieller Hochleistungs-Klebstoffe verbinden. Vor allem dort, wo unterschiedliche Materialien aufeinander treffen, kommen die Vorzüge von Klebstoffen besonders zum Tragen. Das gilt verstärkt für den Materialmix im innovativen Leichtbau, der ohne Klebeverbindungen nicht realisierbar wäre. Ein weiterer großer Vorteil liegt in der Kosteneinsparung: So benötigt ein Mittelklasse-Fahrzeug beispielsweise rund 5.000 Schweißpunkte, von denen jeder mit etwa fünf Cent zu Buche schlägt. Gut die Hälfte davon läßt sich durch Klebenähte ersetzen. Dies spart rund 70 Euro pro Fahrzeug. Zudem reduziert der Einsatz von einem Kilogramm Klebstoff das Fahrzeuggewicht um 25 Kilogramm, weil die höhere Steifigkeit der geklebten Karosserien die Verwendung dünnerer Bleche erlaubt.

Karosseriesteifigkeit deutlich erhöht

Ein gutes und bereits weit verbreitetes Beispiel für Glas/Metall-Verbindungen ist die Direktverglasung mit feuchtigkeitshärtenden Polyurethansystemen. Diese Multifunktionsverklebung hält die Scheibe auch bei einem Unfall und erhöht die Karosseriesteifigkeit. Sie erleichtert außerdem die Prozessautomatisierung. Für Scheibenklebstoffe werden von Degussa hochreine Kieselsäuren der Marke AEROSIL® sowie Schwarzpigmente (Pigment Blacks) der Marke PRINTEX® seit Jahren erfolgreich

eingesetzt. Sie ermöglichen die Herstellung gut zu verarbeitender, standfester und UV-stabiler Produkte, die präzise durch automatisierte Klebstoffpistolen auf die Karosseriebauteile aufgetragen werden. Der Copolyester DYNACOLL® erhöht die Anfangsfestigkeit und verkürzt die Montagezeit. Ein weiterer erfolgreicher Trend ist der Einsatz struktureller Klebstoffe für Metall. Damit lassen sich nochmals deutliche Verbesserungen hinsichtlich der Karosseriesteifigkeit und des Crashverhaltens erzielen. Vorteilhaft sind auch Gewichtsreduktion, Formgebungsvielfalt und Strukturfestigkeit. All diese Pluspunkte dürften die Marktaussichten dieser Metall-Kunststoff-Kombinationen künftig deutlich ansteigen lassen.

Gute Nass- und Trockenhaftfähigkeit

Derzeit werden beim strukturellen Kleben einkomponentige Epoxidharze oder zweikomponentige Polyurethane eingesetzt. Dabei wird den Klebstoffen eine hohe Funktionalität auch unter ungünstigen äußeren Bedingungen abverlangt. Dies lässt sich nur über die Zugabe entsprechender chemischer Zusätze erreichen. So erhöht die Verwendung von Silanen wie DYNASYLAN® in Strukturklebern die Nass- und Trockenhaftfähigkeit („Adhesion Promotion“). Gleichzeitig verbessert sich der Widerstand gegen Lösungsmittel, Hitze, Feuchtigkeit und Verwitterung. Auch das Mischverhalten der Klebstoffkomponenten wird optimiert und die Verarbeitung deutlich erleichtert.

Schmelzklebstoffe für die Innenraumökologie

Vorteile bietet die Klebetechnologie ebenfalls in der Fahrgastzelle, wo sehr unterschiedliche Materialien wie Textilien, Leder und Kunststoffe miteinander verbunden werden. Bei der Auswahl des Klebstoffs spielen hier neben der Wirtschaftlichkeit vor allem ökologische Aspekte eine wichtige Rolle.

Maßgeschneiderte Schmelzklebstoffe auf Basis von DYNAPOL® S und DYNACOLL® entsprechen diesen erhöhten Anforderungen: Sie erreichen sehr schnell eine maximale Klebstärke und erlauben dadurch die unverzügliche Weiterverarbeitung der geklebten Bauteile. Lösemittelfreie Klebstoffe vermindern unangenehme Ausdünstungen in neuen Autos, das so genannte Fogging.

Neuentwicklung: Entkleben „auf Knopfdruck“

Eine der größten Herausforderungen der Chemiebranche ist die Herstellung einer wieder lösbaren Klebeverbindung. Denn während Karosserien aus verschweißtem Stahl einfach eingeschmolzen werden, sind aus einem Materialmix hergestellte und geklebte Fahrzeuge beim Recycling heute noch ein Problem. Benötigt werden hierfür Kleber, die quasi „auf Kommando“ ihre Klebekraft wieder verlieren.

Dies kann das Klebstoff-Additiv MagSilica® des internen Start-ups „Degussa Advanced Nanomaterials“ leisten. Klebstoffe, die MagSilica® enthalten, lassen sich über ein magnetisches Wechselfeld erwärmen. Sie härten so einerseits deutlich schneller aus als konventionelle Produkte. Andererseits können solche Klebungen durch punktgenaue Erwärmung wieder gelöst werden. Auf diese Weise lässt sich die Klebeverbindung wieder „abschalten“.

Bayerischer Hersteller: Delo

Das Hauptverfahren des Kapitels 2.3 (Fügen), d.h. das Schweißen, wird in einer Vorlesung und in einem Praktikum bei Prof. Wörner ausführlich behandelt.

2.2.2 mechanisches Fügen (Auswahl)

2.2.2.1 Davex-Verfahren

Anders als beim Walzprofilieren oder Verschweißen von Flachmaterialien werden mit der DAVEX-Technologie Bänder über ein neuartiges Rollfügeverfahren im sogenannten T-Stoß miteinander verbunden → Fügen durch Umformen

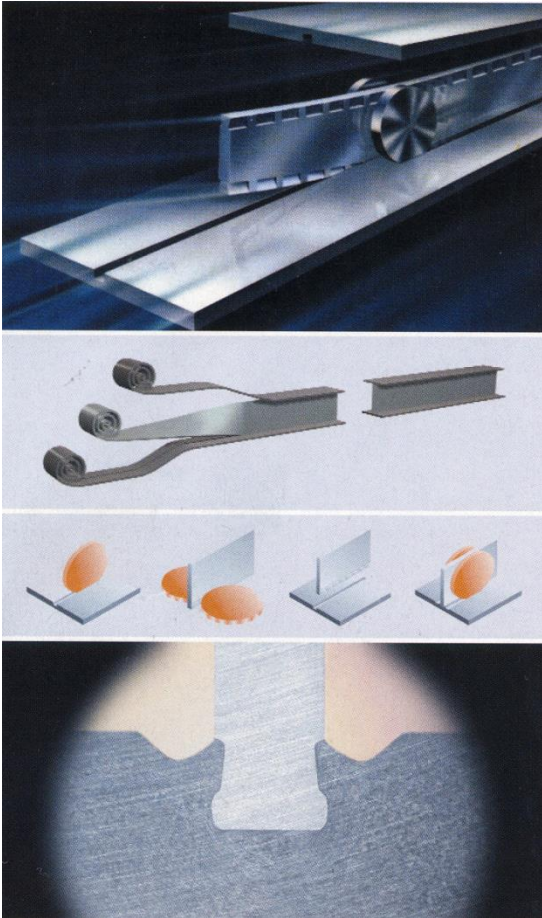


Abb. 34:
Das Davex-Verfahren → Fertigungsschritte und Makro-Schliffbild der Verbindung:

Die DAVEX-Verbindung entsteht in einem innovativen Rollfügeverfahren. Dabei wird das Profilmaterial direkt vom Coil zugeführt. Im Schliff (unteres Bild) wird der DAVEX-Verbindungs-aufbau sichtbar

Zunächst wird mit einem speziellen Rollwerkzeug eine Nut in das Gurtmaterial eingewalzt. Parallel dazu erhält das für den Steg vorgesehene Material an den Kanten eine Kontur. In einem sich anschließenden Arbeitsgang wird der Steg dann in die vorbereitete Gurtnut eingesetzt und auf beiden Seiten des Steges je eine Schließnut in die Gurte gewalzt. Dabei fließt Material in die Konturen an den Stegkanten.

Kennzeichen der DAVEX-Verbindung sind also ein Formschluss, der sich - ohne Schweißen - aufgrund der Stegkantenkontur ergibt [plastische Kalt-Verformung], und ein Kraftschluss aufgrund von Eigenspannungen zwischen Gurt und Steg.

Mit dem Rollfügeverfahren lassen sich Stahlträger fertigen, deren Stege im Verhältnis zum Gurt deutlich schlanker sind als bei gängigen, warm gewalzten Profilen. Außerdem sind die Profile exakt geformt und scharfkantig. Auf einer erst kürzlich in Gelsenkirchen fertig gestellten Produktionslinie - der weltweit ersten ihrer Art - werden die DAVEX-Profile direkt aus Coils, dem zu Rollen gewickeltem Stahlband, gefertigt. Als Werkstoff für die DAVEX-Stahlprofile ist allgemeiner Baustahl nach DIN EN 10025 zugelassen. Konstrukteure können die Träger wie geschweißte Stahlprofile nach DIN 18800 berechnen.

Grundsätzlich lassen sich alle duktilen, also dehn- und verformbaren Materialien miteinander kombinieren. Und da unsere Verbindungstechnik keinen Stoffschluss (wie beim Schweißen) erfordert, bleiben die Werkstoffe von einer thermischen Gefügeveränderung verschont. So gelingt es uns Profile zu

erzeugen, die einen Steg außerhalb der Mitte aufweisen. Völlig neu ist auch die Möglichkeit, nun zum Beispiel Kunststoffstege mit metallischen Gurten zu verbinden. Ein solches Profil ließ sich bislang nicht wirtschaftlich herstellen, bietet aber aufgrund der elektrischen, thermischen und akustischen Entkoppelung der metallischen Gurte Marktpotenziale für innovative Anwendungen.

Kaum am Markt, sorgt unser DAVEX-Fassadenträger schon für Aufsehen: Der walztechnisch nicht herstellbare gelochte Steg und die präzise rechtwinklige Ausführung von Gurt und Steg charakterisieren die neue Produktpalette. Das Lochband verleiht dem Steg Transparenz und lässt Konstruktionen und Architekturen aus diesem Material sehr filigran und leicht wirken. Die Träger sind für Innen- und Außenanwendungen zugelassen, wobei die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für symmetrische und unsymmetrische **I**- und T-Profile mit gelochten oder geschlossenen Stegen gilt. Hierbei muss das Gurtmaterial zwischen sechs und zehn Millimeter und das Stegmaterial drei oder vier Millimeter dick sein.

Noch können wir nicht übersehen, welche Vielfalt neuartiger Materialkombinationen und Geometrien mit DAVEX möglich werden. Fast täglich entwickeln wir neue Lösungen, die wir in ihren Eigenschaften zu optimieren suchen. Und fast täglich öffnen sich uns neue Märkte. Besonders fasziniert uns, dass wir durch die Mischbauweise, die große geometrische Freiheit, die exakte Ausführung der Verbindung sowie die interessante und ansprechende neue Optik unsere Produkte optimal auf individuelle Kundenanforderungen abstimmen können. Einsatzgebiete sind beispielsweise Armierungsprofile für Fertigteile aus Leichtbeton, Hybridprofile mit Kunststoffstegen für Leichtbauanwendungen, Designprofile im Fassadenbau oder etwa Stützen und Dachträger im Gewerbe- und Bürobau.

2.2.2.2 Weitere Möglichkeiten des mechanischen Fügens:

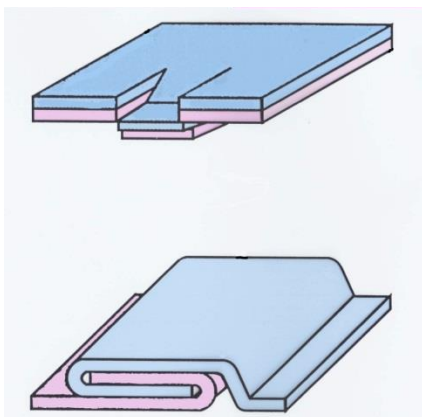


Abb. 35:

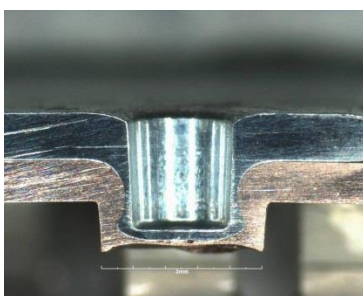
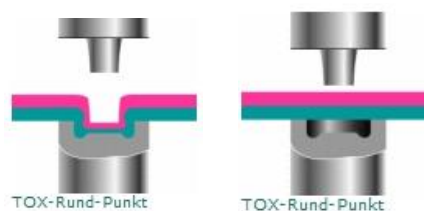
Fügen durch Trennen und Umformen

Abb. 36:

Fügen durch Bördeln

Abb. 37 a,b,c:

Fügen Umformen (Tox-Verfahren)



Ein einfacher Rundstempel presst die zu verbindenden Materialien in die Matrize. Bei weiterem Kraftaufbau wird das stempelseitige Material gezwungen, innerhalb des matrizenseitigen Materials nach außen zu „hinterfließen“ → Kaltverformung → Kaltverfestigung.

Das Ergebnis: ein runder Punkt verbindet ohne Kanten und Grate, an denen Korrosion ansetzen könnte. Auch bei aluminium- oder zinkbeschichteten Stahlblechen bleiben die anti-korrosiven Eigenschaften erhalten, die Schutzschicht fließt mit.

Vorteile: Billiger als Punktschweißen. Auch nicht verschweißbare Materialien können verbunden werden. Voraussetzung: Kaltumformbarkeit (nicht zu spröde)

Näheres unter <http://www.tox-de.com>

2.3 Beschichten

2.3.1 Galvanik („mit Außenstrom“)

Gegenüber (Sauerstoff-)Korrosion anfällige Metalle werden vielfach durch galvanisch erzeugte dünne Überzüge aus korrosionsbeständigen Metallen geschützt.



Abb. 38:

Beschichtungsverfahren – ein Vergleich

Unter Galvanisieren versteht man die elektrochemische Abscheidung von metallischen Niederschlägen (Schichten, Überzügen) auf Gegenständen aus Metallen und auch Nichtmetallen. Die Schichten dienen insbesondere zur Verbesserung der Korrosions- und Verschleißbeständigkeit aber auch zu optischen Zwecken. Sie sind relativ dünn (μm) und sollen eine gute Haftfestigkeit aufweisen (Im Gegensatz zur Galvanoformung, s.o.).

Voraussetzungen für einen gelungenen Galvanikprozess sind u.a.:

- eine geeignete Vorbereitung der Oberfläche (Aktivierung \rightarrow Haftfestigkeit, Leitfähigkeit, s. auch Folie Autolack..)
- ein geeigneter Elektrolyt (leitfähige Flüssigkeit, die das abzuscheidende Metall in Ionenform (Konzentration!) enthält)
- ein elektrischer Strom (i.A. DC), der entweder mithilfe einer Außenschaltung, s. Abb., oder durch einen Redoxvorgang im Elektrolyten erzeugt wird.
- eine geeignete elektrische Spannung
- eine geeignete Temperatur
- eine geeigneter pH-Wert
- eine geeignete Konvektion (Konzentrationsausgleich)

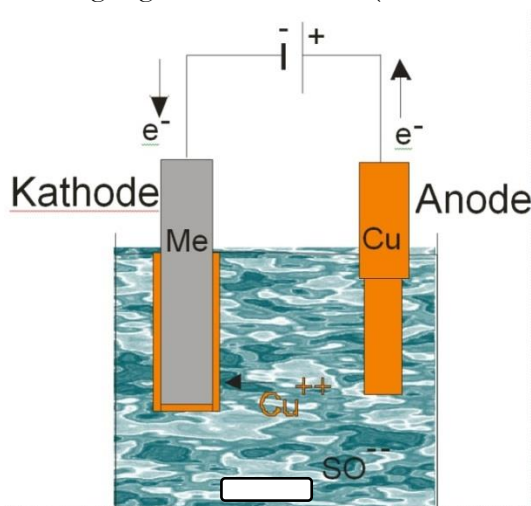


Abb. 39:

Galvanische Verkupferung eines Metalls (Me) im Kupfersulfatbad (Prinzipdarstellung)

Anode (Oxidation):

Kathode (Reduktion):

Die positiven Metallionen wandern von der Anode [Migration (+ Konvektion)] zur negativen Kathode, dem Werkstück, wo sie reduziert werden und eine Schicht ausbilden. Während an der Kathode Elektronen aufgenommen werden, findet an der Anode ein Oxidationsvorgang statt, bei dem Elektronen abgegeben werden. Hierbei geht die Anode selbst in Lösung oder an ihr werden Bestandteile des Elektrolyten oxidiert. Als Anodenmaterial wird oftmals das abzuscheidende Metall verwendet. Bei bestimmten Verfahren, wie z. B. der Verchromung, kommen jedoch auch unlösliche Anoden zum Einsatz.

Metalle die galvanisch abscheidbar sind :

Ia	Ila	IIla	IVa	Va	VIa	VIIa	VIII						Ib	IIb	IIIb	IVb	Vb	VIb	VIIb	O	
1 H																					2 He
3 Li	4 Be														5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	
11 Na	12 Mg														13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr				
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe				
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn				
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Ku																		

Abb. 40: Galvanische Abscheidung – mögliche reine Metalle

Die kathodische Metallabscheidung ermöglicht in erster Linie Nickel, Chrom, Kupfer, Zinn und Zink aber auch Blei, Silber, Platin und Legierungen sowie Dispersionsschichten abzuscheiden, s. Folien

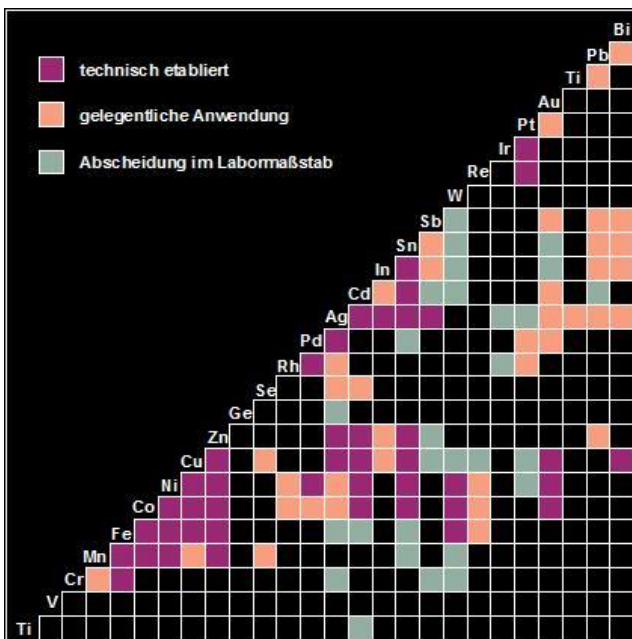
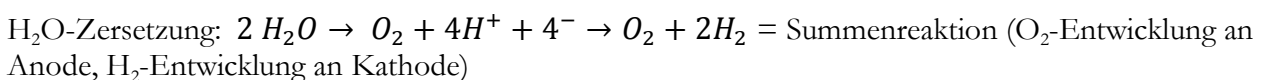
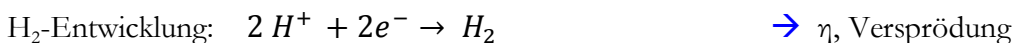


Abb. 41:
Galvanische Abscheidung – Binäre Legierungen

Die meisten dieser Metalle sind unedel und werden aus sauren wässrigen Lösungen abgeschieden. Was bedeutet das? → i-U-Kurve



pH-Wert-Änderung durch H_2 -Entwicklung: → evtl. Ausfällung von Hydroxiden möglich

→ also: galvanische Abscheidung aus wässrigen Lösungen nicht möglich?

→ doch möglich wegen der auftretenden **Hemmungen**, die zu einer Polarisierung führen, d.h. das Potenzial der H_2 -Entwicklung zu niedrigeren Potenzialen verschieben → Näheres s. VL B-KOB.

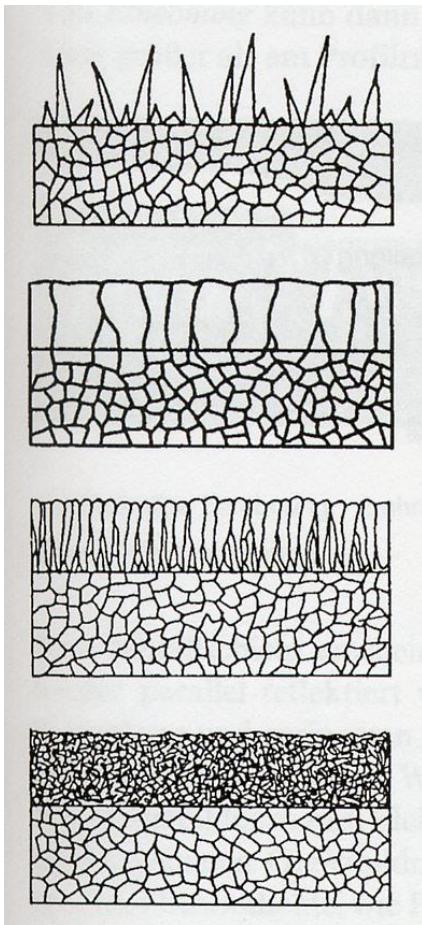
Spannungsreihe der Elemente

Name des Metalls	Halbreaktion Reduktion	Halbreaktion Oxidation	Normalpotenzial *) (E ⁰ /Volt bei 25°C)
Lithium	Li	Li ⁺ + e ⁻	-3,04
Caesium	Cs	Cs ⁺ + e ⁻	-3,03
Rubidium	Rb	Rb ⁺ + e ⁻	-2,98
Francium	Fr	Fr ⁺ + e ⁻	-2,90
Kalium	K	K ⁺ + e ⁻	-2,93
Barium	Ba	Ba ²⁺ + 2e ⁻	-2,91
Strontium	Sr	Sr ²⁺ + 2e ⁻	-2,90
Calcium	Ca	Ca ²⁺ + 2e ⁻	-2,87
Radium	Ra	Ra ²⁺ + 2e ⁻	-2,80
Natrium	Na	Na ⁺ + e ⁻	-2,71
Lanthan	La	La ³⁺ + 3e ⁻	-2,38
Magnesium	Mg	Mg ²⁺ + 2e ⁻	-2,37
Cer	Ce	Ce ³⁺ + 3e ⁻	-2,34
Uran	U	U ³⁺ + 3e ⁻	-1,80
Aluminium	Al	Al ³⁺ + 3e ⁻	-1,66
Titan	Ti	Ti ²⁺ + 2e ⁻	-1,63
Mangan	Mn	Mn ²⁺ + 2e ⁻	-1,19
Vanadium	V	V ²⁺ + 2e ⁻	-1,18
Niob	Nb	Nb ³⁺ + 3e ⁻	-1,10
Chrom	Cr	Cr ²⁺ + 2e ⁻	-0,91
Zink	Zn	Zn ²⁺ + 2e ⁻	-0,76
Chrom	Cr	Cr ³⁺ + 3e ⁻	-0,74
Gallium	Ga	Ga ³⁺ + 3e ⁻	-0,55
Eisen	Fe	Fe ²⁺ + 2e ⁻	-0,45
Cadmium	Cd	Cd ²⁺ + 2e ⁻	-0,40
Indium	In	In ³⁺ + 3e ⁻	-0,34
Cobalt	Co	Co ²⁺ + 2e ⁻	-0,28
Nickel	Ni	Ni ²⁺ + 2e ⁻	-0,26
Molybdän	Mo	Mo ³⁺ + 3e ⁻	-0,20
Zinn	Sn	Sn ²⁺ + 2e ⁻	-0,14
Blei	Pb	Pb ²⁺ + 2e ⁻	-0,13
Wolfram	W	W ³⁺ + 3e ⁻	-0,10
Eisen	Fe	Fe ³⁺ + 3e ⁻	-0,04

Wasserstoff	H_2	$2H^+ + 2e^-$	0,00
Rhenium	Re	$Re^{3+} + 3e^-$	+0,30
Kupfer	Cu	$Cu^{2+} + 2e^-$	+0,34
Ruthenium	Ru	$Ru^{2+} + 2e^-$	+0,46
Kupfer	Cu	$Cu^+ + e^-$	+0,52
Thallium	Tl	$Tl^{3+} + 3e^-$	+0,74
Rhodium	Rh	$Rh^{3+} + 3e^-$	+0,76
Silber	Ag	$Ag^+ + e^-$	+0,80
Quecksilber	Hg	$Hg^{2+} + 2e^-$	+0,80
Palladium	Pd	$Pd^{2+} + 2e^-$	+0,96
Iridium	Ir	$Ir^{3+} + 3e^-$	+1,16
Platin	Pt	$Pt^{2+} + 2e^-$	+1,18
Gold	Au	$Au^{3+} + 3e^-$	+1,50
Gold	Au	$Au^+ + e^-$	+1,69
			*) gerundet auf 2 Stellen nach dem Komma

→ Bei Klick auf die blauen Links: Weitere Infos zu den Metallen...

Die Schichtbildung erfolgt über Keimbildung und Keimwachstum. Dabei beginnt die Keimbildung an energetisch günstigen Stellen der Oberfläche.



Es bilden sich verschiedene Kristallisationstypen:

FI-Typ: Feldorientierter Isolationstyp
 → i.A. unerwünscht (η ca. 0 – 10 mV)

BR-Typ: Basisorientierter Reproduktionstyp
 → wie Epitaxie, grobkörnig (η ca. 10 – 100 mV)

FT-Typ: Feldorientierter Texturtyp
 → starke Anisotropie, i.A. nicht gewünscht
 (η ca. 100 – 150 mV)

UD-Typ: Unorientierter Dispersionstyp
 → gut für technische Zwecke ($\eta > 200$ mV)

Abb. 42: Wachstumstypen galvanischer Schichten
 Details s. Hofmann, S.74, **s. auch Folien Nasser**

Auch die Abscheidung von Legierungs- und Dispersionsschichten ist möglich.

Die abgeschiedenen Schichten weisen in der Regel keine gleichmäßige Schichtdicke auf. Vorspringende Ecken und Kanten des als Kathode gepolten Werkstücks werden infolge der hier höheren Stromdichte stärker belegt. Bauteile die mittels kathodischer Abscheidung zu beschichten sind, sollten daher keine scharfen Kanten, Hinterschneidungen und Abschattungen aufweisen. Für möglichst glatte Oberflächen und Entlüftungen bei gleichzeitiger Gasentwicklung an der Kathode ist zu sorgen. Gleichmäßige Schichtdicken sind mittels Hilfsanoden oder zusätzlichen Blechen realisierbar, s. Abb. 42 - 44.

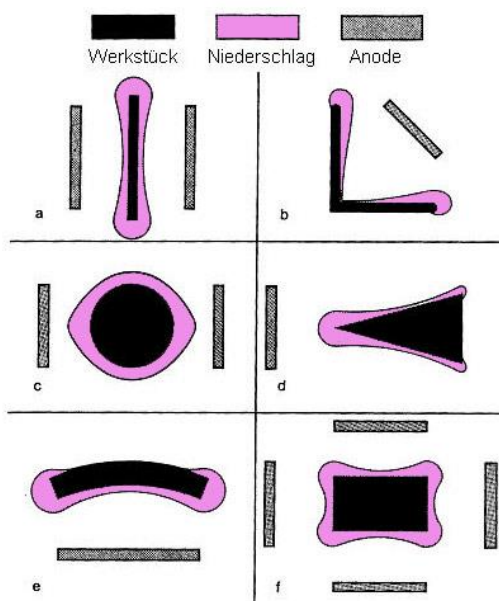


Abb. 43:

Typische Niederschlagsverteilung auf verschieden geformten Oberflächen. „Hundeknochen-Effekt“ stärker bei größeren Schichtdicken

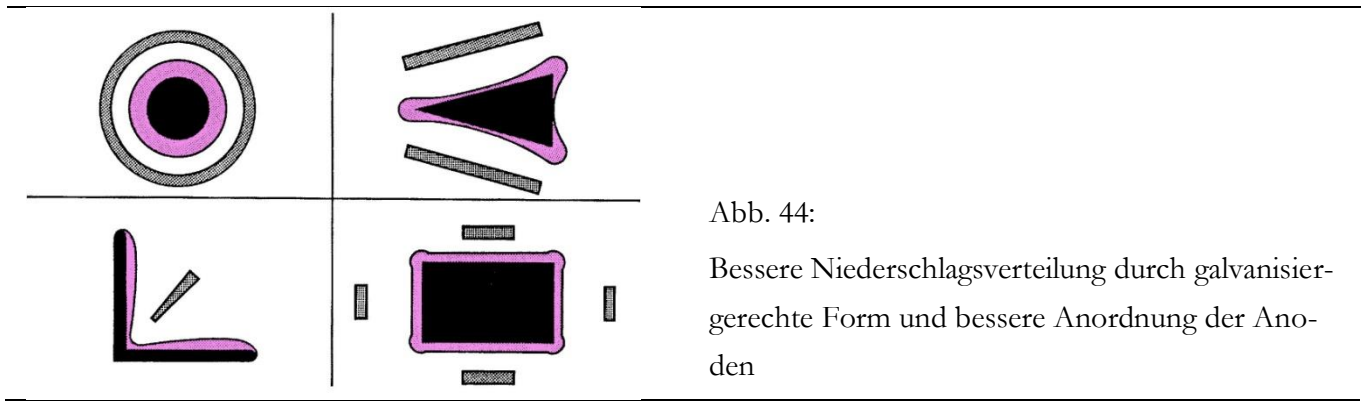


Abb. 44:

Bessere Niederschlagsverteilung durch galvanisiergerechte Form und bessere Anordnung der Anoden

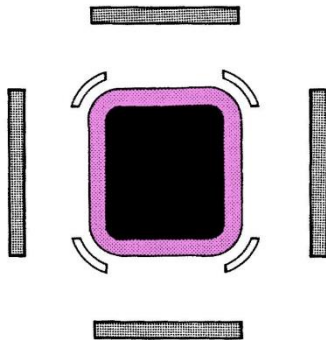


Abb. 45:

Beeinflussung der Stromlinienverteilung durch Abschirmungen aus Kunststoff

Die Schichtdicken liegen im Bereich weniger μm bis hin zu $100 \mu\text{m}$, in Sonderfällen auch darüber \rightarrow Galvanoformung.

Bei nicht leitenden Grundwerkstoffen muss die Oberfläche durch ein geeignetes Vorbehandeln, z. B. Elektrolacke oder Bekeimung, elektrisch leitend gemacht werden.

Durch **Badzusätze** kann verändert werden:

- der Glanz der Schicht
- der Spannungszustand der Schicht

Einsatzbereiche der Schichten

- Korrosions- und Verschleißschutz
- Haft- und Lötgrund
- Verbessern der elektrischen Leitfähigkeit
- Reparatur von Bauteilen
- Leitstrukturen auf Kunststoffträgern
- Durchkontaktieren von Bohrungen in der Leiterplattentechnik (stromlos)
- Verbesserung der Optik.

Technische Anlagen:

Abb. 40 zeigt Darstellungen von möglichen Anlagen zur Galvanisierung. Beckengalvanisierung für große Teile, s. auch Folien Nasser.

Trommel- und Glockengalvanisieren für schüttfähige Massengüter (z.B. Schrauben) Das Verfahren zeichnet sich durch das Wegfallen zeitaufwendiger Gestellbeschickungen aus.

In der Praxis wird bei großen Stückmengen die Ware (die zu beschichtende Werkstücke) mithilfe von Warenträgern in den Elektrolyten eingetaucht und wieder herausgehoben, s. Abb. Weitere Beispiele in VL.

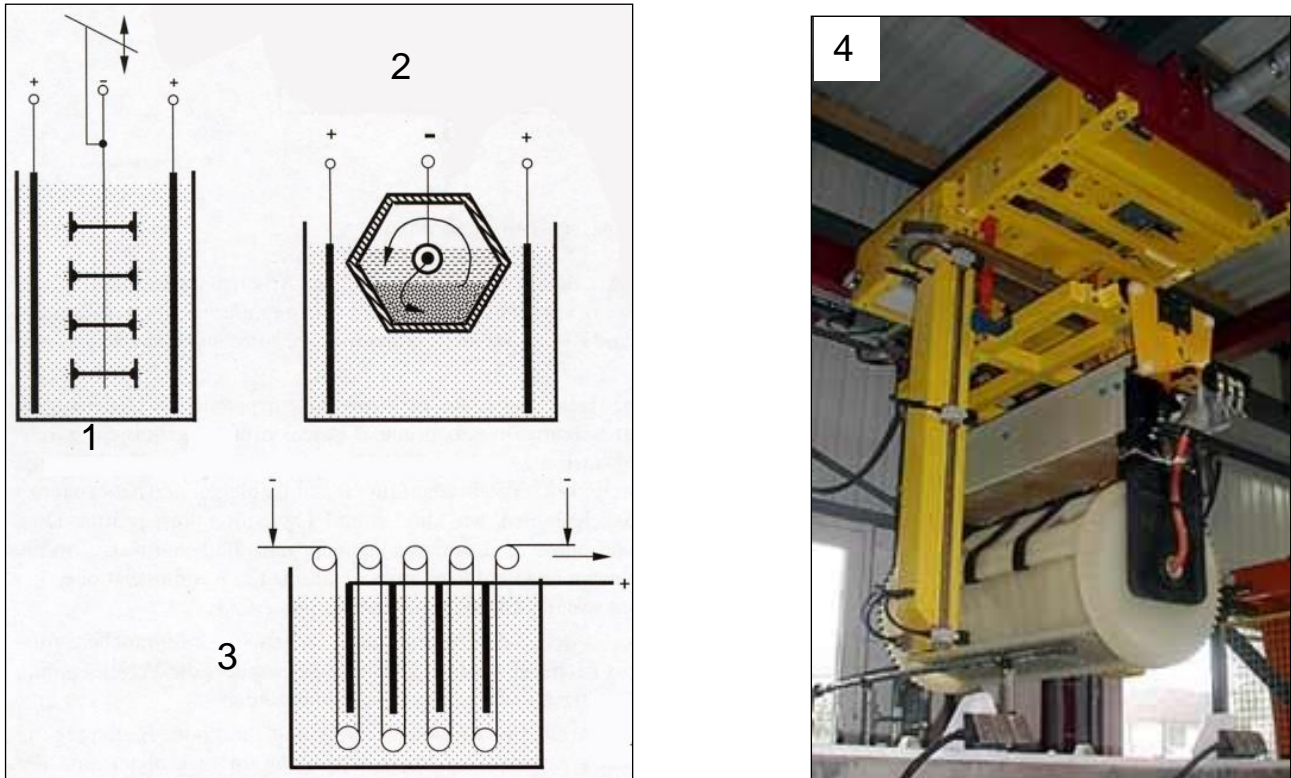


Abb. 46: Ausführungsformen von Warenträgern:

- 1: Gestelltechnik,
- 2: Trommelverfahren
- 3: Umlenk-Durchlaufverfahren für Drähte und Bänder
- 4: Warentrommel im Betrieb

Die mittlere Schichtdicke lässt sich mit dem 1. Faradayschen Gesetz berechnen

Aufgabe: Berechne zur Abscheidung einer 0,5 mm dicken Ni-Schicht auf einer kreisförmigen Oberfläche ohne Berücksichtigung der H₂-Entwicklung

geg.: $\rho_{\text{Ni}} = 8,9 \text{ g/cm}^3$, $M = 58,69 \text{ g/mol}$, $i = 50 \text{ mA/cm}^2$, $z = 2$, $F = 96486 \text{ As/mol}$,
 $d = 2 \text{ cm}$

$$\Delta m = \frac{M \cdot I \cdot t}{z \cdot F} \quad (F = \text{Faradaykonstante, } z = \text{Wertigkeit, } M = \text{Molekulargewicht})$$

Lösg.:

Galvanik: (Außen-)stromlose Abscheidung → s. VL OT

Eine Auswahl von Anwendungen aus der Galvanik zeigen die folgenden Abb.

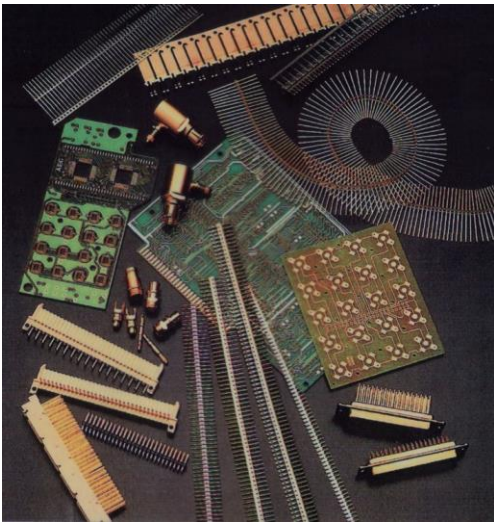
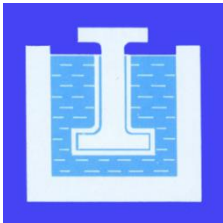


Abb. 47: Verschiedene Anwendungen galvanischer Schichten

2.3.2 Beschichten : Verzinken

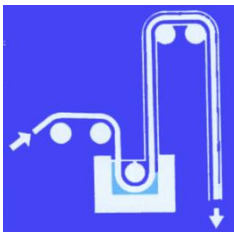
Hauptanwendung: Beschichtung un- und niedriglegierter Stähle.

Wirkung: Schutz vor atmosphärischer Korrosion, höhere Verschleiß- und Abriebbeständigkeit bei Transport und Montage.

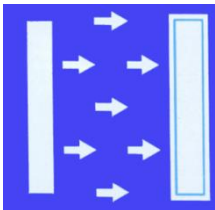


- ❑ **Feuerverzinken:**
Das Feuerverzinken findet durch Tauchen des Werkstücks in ein flüssiges Zn-Bad bei ca. 430 °C statt.

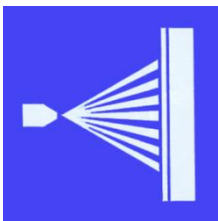
- ❑ **Stückverzinken:**
Diskontinuierliches Verfahren, bei dem die Teile einzeln in schmelzflüssiges Zn getaucht werden (DIN 50976)



- ❑ **Bandverzinken:**
Kontinuierliches Schutzverfahren (Durchlaufverfahren) für Stahlband (DIN 17162), Draht



- ❑ **Galvanisches Verzinken:**
Elektrolytische Zn-Abscheidung aus i.a. sauren, wässrigen Bädern mit Gleichstrom ⇒ galvanische Schichten, s.u.



- ❑ **Thermisches Spritzen mit Zink:**
Schmelzflüssiges Zn wird mittels Druckluftspritzpistole auf die Werkstückoberfläche gespritzt



- ❑ **Zinkstaubbeschichtungen:**
Zinkstaubpigmentierte Beschichtungsstoffe werden als Schutzschichten auf Stahlteile appliziert

Abb. 48: Verschiedene Verfahren des Verzinkens und deren offizielle Symbole (Details ab nächster Seite)

Verzinken: Übersicht über die verschiedenen Verfahren

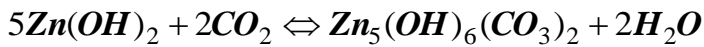
VERFAHREN	Übliche Dicke des Überzuges bzw. der Beschichtung [μm]	Legierung mit dem Untergrund	Aufbau und Zusammensetzung des Überzuges bzw. der Beschichtung	Verfahrenstechnik	Nachbehandlung	
					üblich	möglich
A ÜBERZÜGE Feuerverzinken a) Diskontinuierlich: – Stückverzinken DIN 50976 – Rohrverzinken DIN 2444 b) Kontinuierlich: – Bandverzinken DIN 17162 – Kontinuierliches Feuerverzinken von Bandstahl – Drahtverzinken DIN 1548	50–150 50–100 15– 25 20– 40 5– 30	ja ja ja ja	Eisen-Zink-Legierungsschichten am Stahluntergrund, in der Regel mit einer darüberliegenden Zinkschicht	Eintauchen in flüssiges Zink Durchlaufen durch flüssiges Zink	— Chromatieren —	Beschichten – sowie in geringem Umfang auch Galvannealen*
Thermisches Spritzen – Spritzverzinken DIN 8565	80–150	nein	Überzug aus Zinktropfen mit Oxidhaut	Aufspritzen von geschmolzenem Zink	Versiegeln durch penetrierende Beschichtung	Beschichten
Galvanisches bzw. elektrolytisches Verzinken – Einzelbäder DIN 50961 – Durchlaufverfahren	5– 25 2,5– 5	nein nein	lamellarer Zinküberzug	Zinkabscheidung durch elektrischen Strom in wässrigen Elektrolyten	Chromatieren	Beschichten
Metallische Überzüge mit Zinkstaub a) Sherardisieren b) Mechanisches Plattieren	15– 25 10– 20	ja nein	Eisen-Zink-Legierungsschichten homogener Zinküberzug, gegebenenfalls auf Kupfer-Zwischenschichten	Diffusion Stahl-Zink unterhalb Zn-Schmelztemperatur Aufhämmern von Zinkpulver durch Glaskugeln	— zum Teil Chromatieren	Beschichten Beschichten
B BESCHICHTUNG Zinkstaubbeschichtung	dünnsch. 10– 20 normalsch. 40– 80 dicksch. 60–120	nein	Zinkstaubpigment in Bindemittel	Auftragen durch Streichen, Rollen, Spritzen, Tauchen	Deckbeschichtung auf Grundbeschichtung abgestimmt	—
C Kathodischer Korrosionsschutz	Zink-Anoden hoher Reinheit (99,995%) zur Verhinderung der Eigenpolarisierung sind selbstregulierend und optimal in wässrigen Elektrolyten mittlerer und hoher Leitfähigkeit. Fremdstromanlagen erfordern begrenztes Schutzpotential und Sicherung gegen Übersteuerung. Die Stromkapazität je dm^2 Zinkanode von etwa $5300 \text{ A} \times \text{h}$ ermöglicht kleine Anoden mit geringem Strömungswiderstand. Die erforderliche Schutzstromdichte ist vom Zustand und den äußeren (Bewegungs-)Bedingungen abhängig. Optimal ist der aktiv in den Korrosionsprozeß eingreifende kathodische Schutz in Verbindung mit einer Beschichtung.					

* Umwandeln eines Zinküberzuges durch gezielte Wärmebehandlung, besonders beim Bandverzinken.

2.4.5.1 Feuerverzinken

Grundlagen:

Zn ist ein sehr unedles Metall → Spannungsreihe der Elemente. Dies gilt nur für den metallischen Zustand. Für das Korrosionsverhalten entscheidend ist die Oberfläche. Dort reagiert das Zn an Luft mit Bestandteilen der Atmosphäre. Hauptreaktion ist die Bildung von basischem Zinkkarbonat:



Diese Schicht ist für das gute Korrosionsverhalten in atmosphärischer Umgebung verantwortlich. Damit sie sich gut ausbildet, sollte das verzinkte Werkstück für mindestens einige Tage gut belüftet werden.

Ist dies nicht der Fall, kommt es zur Weißrostbildung, d.h. es bildet sich Zinkhydroxid, das keine besondere Schutzwirkung zeigt.

Bestimmte Bestandteile der Atmosphäre führen zum Abbau der Schutzschicht und dann zum Abbau der gesamten Zn-Schicht. Deshalb ist die Lebensdauer der Schicht abhängig von der Zusammensetzung der Atmosphäre, s. Abb. 2.

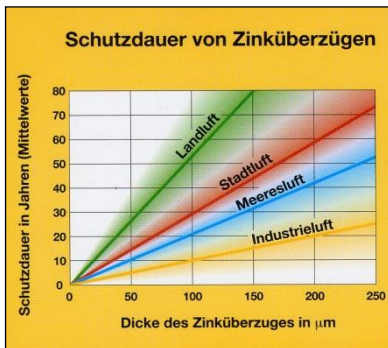


Abb. 49:

Die Schutzdauer von Zn-Überzügen hängt von der vorliegenden Atmosphäre ab. Je höher der Anteil an CO₂, SO₂, NO_x, HCl etc. ist, desto geringer ist die Schutzdauer.

Den Aufbau der Schicht unterhalb der Deckschicht zeigen die Abb. 3 + 4.



Abb. 50:

Schichtaufbau eines feuerverzinkten Stahls. Es bilden sich verschiedene Intermetallische Phasen, s. ZTU-Schaubild (Hofmann, S 112).

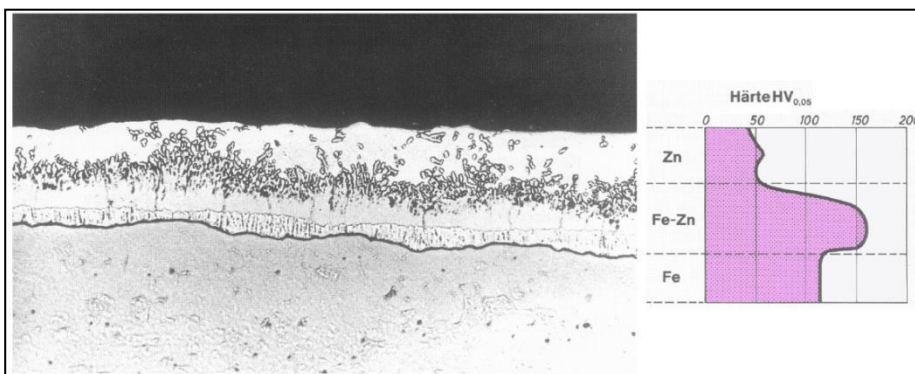


Abb. 51:

Schichtaufbau eines feuerverzinkten Stahls und Härteverlauf in der Zinkschicht

Fe-Zn = Hartzinkschicht (HV S 275 JR =)

Die Reaktionsgeschwindigkeit der Bildung dieser intermetallischer Phasen wird durch den Si + P-Gehalt (0,03 – 0,3 %) beeinflusst, was sich in Schichtdicke und Aussehen widerspiegelt

Die Schichtdicke hängt ebenfalls ab von der Tauchdauer und von der chemischen Zusammensetzung der Stahles.

Beim Feuerverzinken wird das Werkstück nach geeigneter Vorbehandlung der Oberfläche in flüssiges Zinkbad getaucht. Das Zink wird bei 465 °C im Zinkkessel flüssig gehalten.

Anlage von ThyssenKrupp: Jahreskapazität 450000 t.

Schlingenspeicher überbrücken punktuell auftretende Stillstandzeiten in der Linie, z.B. beim Zusammenschweißen der bis zu 1,65 m breiten Bänder, das 2 min dauert. Am Ein- und Auslauf kann die Geschwindigkeit bis 260 m/min betragen; in der Behandlungszone bis 180 m/min.

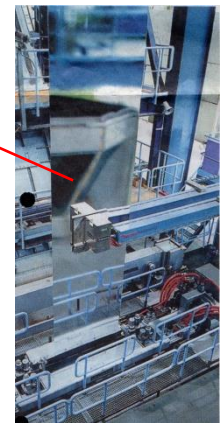
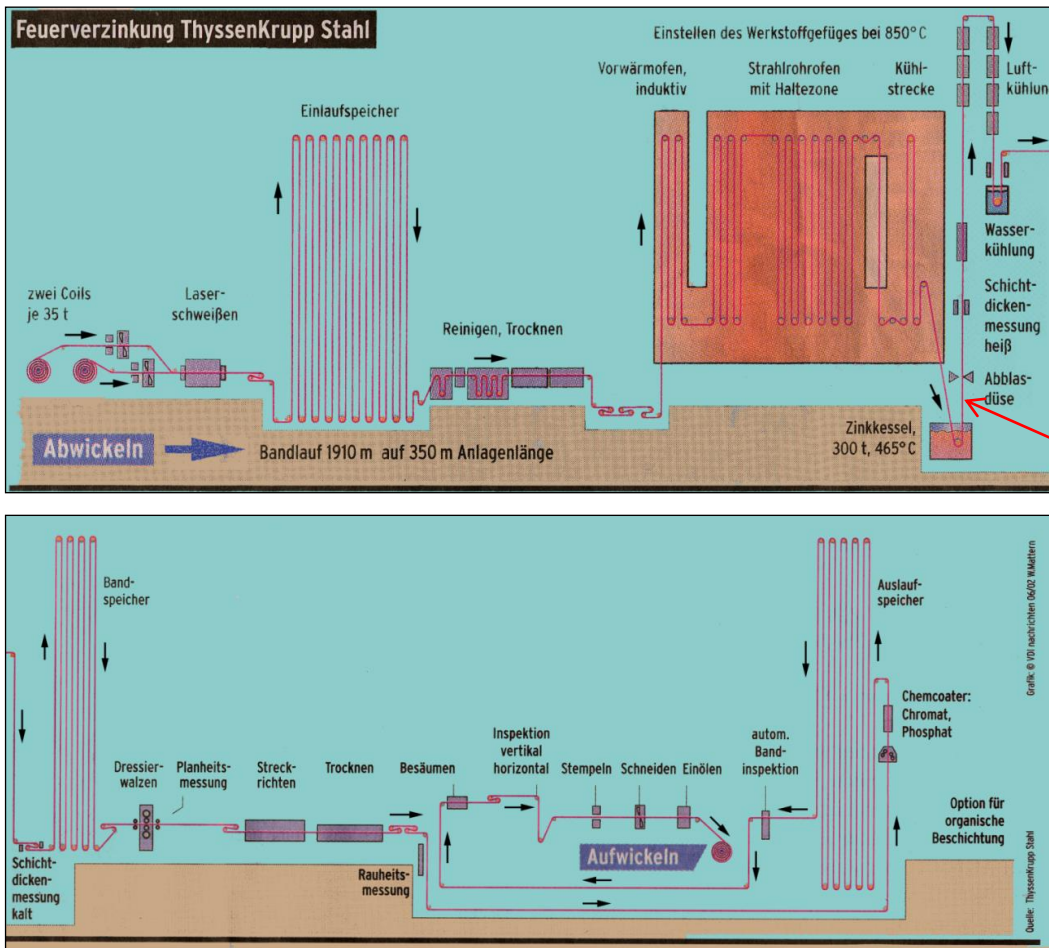


Abb. 52:
Anlage zum Feuerverzinken (Bandverzinken) → s. auch nächste Seite + Video

Artikel aus vdi-n, 2002:

Nur 13 Mitarbeiter pro Schicht fahren die 128 Mio. € teure Anlage in der alten Westfalenhütte in Dortmund. 2001 waren hier die Metallurgie und die Warmbreitbandstraße stillgelegt worden.

Immer leichter sollen die Autos von ThyssenKrupp werden. "Dazu benötigt man immer höherwertiges Blechmaterial", sagt Karl-Ulrich Köhler, Vorstandsvorsitzender von ThyssenKruppStahl (TKS).

Beispiel Blechdicke: Um Gewicht zu sparen, verwenden die Autohersteller für die Außenhaut ihrer Fahrzeuge immer feineres Material. Aktuell sind dies Dicken bis hin zu **0,65 mm** - und bei der Konzeption neuer Modelle arbeiten die Planer bereits mit Blechdicken von nur noch 0,5 mm. Um diesem Trend Rechnung zu tragen, wurde die neue Verzinkungslinie auf die Verarbeitung von Blechen bis hinab zu 0,3 mm ausgelegt. Erste Erprobungen gab es im Juni 2001, und am 29. Oktober wurde das erste Band verzinkt.

Die Hochlaufphase wird bis zum Oktober 2002 dauern. Dann hat ThyssenKrupp mit der neuen, achten Feuerverzinkung eine Jahresgesamtkapazität von **3,8 Mio. t**. Insgesamt betreibt TKS 20 Oberflächen-Veredelungsanlagen, denn, so Karl-Ulrich Köhler: "Die Programmstruktur verschiebt sich mehr und mehr zu Erzeugnissen größerer Verarbeitungstiefe und entsprechend höherer Wertschöpfung."

Je dünner das Stahlblech, desto höher werden die Anforderungen an die Qualität der **Zink-Auflage**, die je nach Wunsch zwischen **3,5 µm und 20 µm dick** sein kann. Bei so wenig "Fleisch" darf der Rost erst gar keine Chance zum Angriff erhalten. "Jede noch so kleine Verunreinigung gefährdet die Qualität der Beschichtung." Um das Eintragen bzw. Aufwirbeln von Schmutz zu vermeiden, gibt es in der eigentlichen Verzinkungslinie keinerlei Fahrzeugverkehr", erläutert Köhler. Erste Überraschung für den Besucher, der mit der landläufigen Vorstellung vom Stahlwerk als schwarzer Hütte durch die Tür kommt, ist eine lichtdurchflutete, farbenfrohe und aufgeräumte Halle mit spiegelblankem Fußboden, auf den jede Hausfrau stolz wäre.

Um einen stabilen Prozess zu gewährleisten, muss die Anlage kontinuierlich durcharbeiten. Deshalb verfügt sie über zwei Einlaufhaspel und eine automatische Schweißstation, um das Bandende jeweils mit dem Anfang des nächsten zu verschweißen. Bislang wurde in solchen Fällen überlappend geschweißt, wodurch eine Fehlstelle im Band entstand. Beim Aufhaspeln am Ende der Beschichtungslinie musste genau diese Stelle wieder herausgeschnitten werden. Um dies zu umgehen, haben wir gewagt, die **Bleche mit Hilfe eines Lasersystems direkt auf Stoß zu schweißen** berichtet Rudolf Schönenberg, der als Hauptbereichsleiter Feinblech/Oberflächenveredelte Produkte der TKS das Dortmunder Projekt antwortete. Die **Naht könne im Karosseriewerk problemlos durch sämtliche Folgeprozesse gefahren werden**. Um den Verfahrensschritt in den Griff zu bekommen, mussten beim Anlagenhersteller **rund 800 Probeschweißungen** durchgeführt werden. Doch die Mühe habe sich gelohnt: "Bereits beim jetzigen Stand der Hochlaufphase kann festgestellt werden, dass die Laserschweißmaschine mit 2,5 kW starkem CO₂-Laser alle Erwartungen übertrifft", zeigt sich Schönenberg zufrieden.

Ein wichtiges Herzstück der Anlage ist ein mehrstufiger Glühofen, in dem **das Band vor dem Verzinken auf 850°C erhitzt wird** (T des Zinkbades ca. 450 °C). Da diese Aufheizung den zweiten Schritt einer **thermomechanischen Behandlung** darstellt, deren Grundlage die vorangegangene **Kaltverformung** im Walzwerk legte, hat sie entscheidenden Einfluss auf die Materialeigenschaften. Eine weitere Besonderheit der neuen Linie sind die ausgeklügelten Maßnahmen zur Sicherung der Oberflächenqualität. Die Zinkschicht erhält nach dem Erkalten mit Hilfe von zwei **Dressierwalzen** eine genau definierte Oberflächenstruktur. Diese ist **entscheidend für den Glanzgrad und damit die optische Qualität der späteren Lackierung**. Einerseits werden die Dressierwalzen mit Hilfe einer Reinigungsanlage ständig von Anhaftungen und Schmutz befreit, um ihr Profil so lange wie möglich einsetzsfähig zu halten. Gleichzeitig wird die Bandrauheit ständig vollflächig online überwacht. Bei Erreichen eines kritischen Abnutzungsstands wird der Arbeitswalzensatz gegen ein neues Paar ausgetauscht.

Stückverzinken:

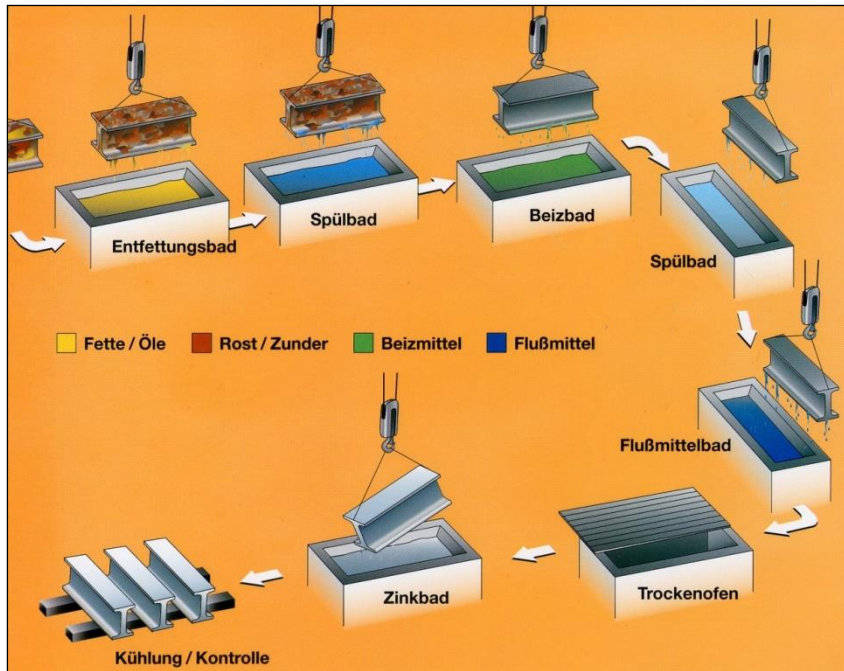


Abb. 53: Vorgehensweise beim Stückverzinken



Abb. 54: Arbeit beim Stückverzinken



Abb. 55: Feuerverzinkungsgerechtes Konstruieren

→ Verzinken von Stahl – was ist zu beachten?

Verzinken: Anwendungsbeispiele

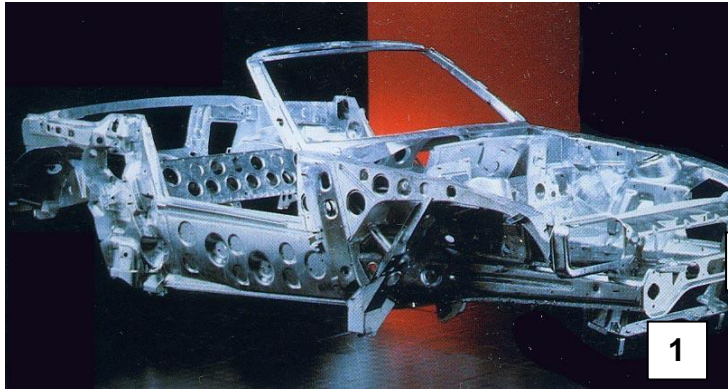


Abb. 56:

Feuerverzinkungen: Anwendungsbeispiele

1 Autokarosserie

1



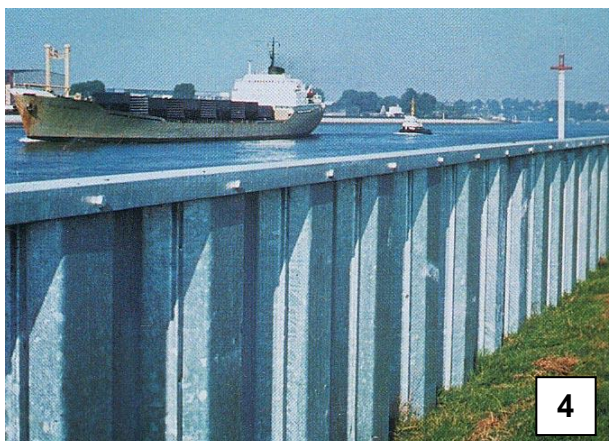
2 Kleinteile in der Montagetechnik

2



3 Müllcontainer

3



4 Schutzgeländer einer Schleusenanlage (Spundwand)

4

Duplex-Systeme:

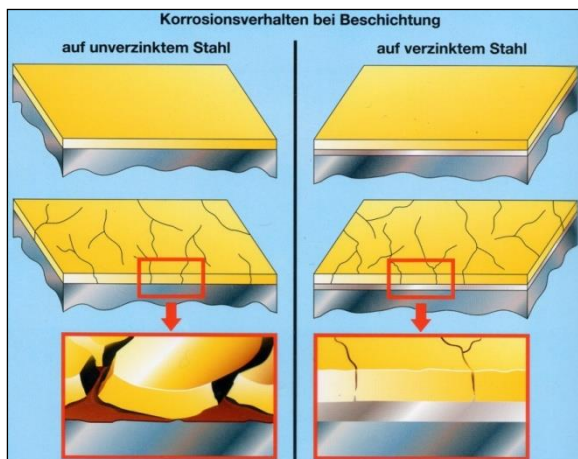


Abb. 57:

Beschichtung (z.B. Kunststoff) direkt auf dem Stahl. Durch Abnutzung, mechanische Beanspruchung (auch durch Druck- und Zugspannungen wegen Temperaturgradienten) und Alterung / Versprödung kommt es zu Rissen, so dass Feuchtigkeit und Biofilme auf die Stahloberfläche gelangen und Korrosion auslösen können

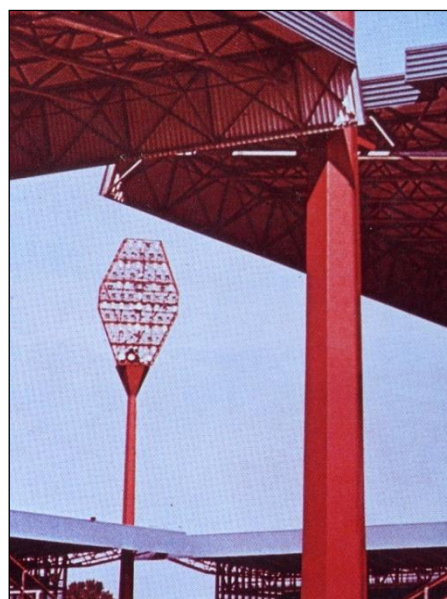
Rechts:

Die Zn-Schicht schützt den Stahl weiterhin



Abb. 58: Anwendungsbeispiele von Duplexbeschichtungen

a) Stahlarkaden am Bahnhofseingang



b) Lichtmast und Stahlkonstruktion im Stadion

→ Video „Verzinken“

2.3.4 Beschichten: "Hartstoffbeschichtungen mit dem PVD-Verfahren*"

Allgemeines:

Physical- und Chemical Vapour Deposition sind Verfahren der Dünnschichttechnologie

PVD- und CVD-Verfahren sind entwickelt worden, um den gesteigerten Oberflächenbeanspruchungen, wie sie heute z. B. durch Korrosion, abrasiven, erosiven oder adhäsiven Verschleiß gegeben sind, zu genügen.

Die dünnen Schichten (μm) sollen die Reibung, die Erwärmung, die Kaltverschweißung und - im Falle von Schneidwerkzeugen - die Schneidkräfte bzw. die Diffusion zwischen Span und Werkzeug verringern. Die Schichtmaterialien sollten daher folgende Eigenschaften haben:

1. geringe Reibung
2. geringe Adhäsion
3. geringe Abrasion
4. hohe chemische Stabilität

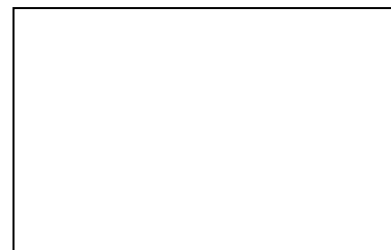
PVD-Verfahren (Physical Vapour-Deposition)

PVD-Prozesse sind atomare Prozesse, in denen das Material, das die Schicht bilden soll, in einem evakuierten Gefäß (10^{-5} Torr bis 10^{-9}), dem Rezipienten, zunächst mit Hilfe einer Verdampfungsvorrichtung verdampft wird. Der Dampf wird durch ein verdünntes Gas oder Plasma linear in Richtung auf das zu beschichtende Werkstücks, das Substrat, transportiert. Dort kondensiert er und bildet die Schicht. PVD-Prozesse laufen bei deutlich niedrigeren Temperaturen (i.A. < 500 °C) und Drücken deutlich unterhalb des Atmosphärendrucks ab. Die Schichten dienen primär dem Verschleiß- und Korrosionsschutz

Vorteile:

Es können thermische empfindlichere Werkstoffe beschichtet werden, z. B. anlaßempfindliche Werkstoffe wie Werkzeug- Kaltarbeits- und Schnellarbeitsstähle ohne Härteverlust und sogar Kunststoffe. Die Ursache dafür ist das zusätzliche, künstlich erzeugte Plasma und die durch die Bogenentladung bewirkte hohe Ionenenergie. Weiterhin tritt nur geringer Verzug auf und es ist keine thermischen Nachbehandlungen nötig. Außerdem sind die Schichtdicken sehr gering (einige μm) so dass auch nur geringe Spannungen in der Schicht auftreten und diese trotz der enormen Härte (z.B. HV > 2000) nicht zum Abplatzen neigt. Entscheidend sind auch der Unterschied der thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Schicht- und Grundwerkstoff sowie die Differenz zwischen Abscheidungs- und Anwendungstemperatur des betreffenden Werkstoffverbunds. Bei geeigneter Vorgehensweise ergeben sich:

- Verlängerungen der Standzeit (im Durchschnitt 100 – 300 %)
- Steigerung der Bearbeitungsgeschwindigkeit um bis zu 100 %
- Einsparung von Rüstzeiten durch weniger Werkzeugwechsel
- Höhere Schnittkraft bei geringerer Leistungsaufnahme
- kaum Schmiermittel nötig
- Beschichtbarkeit thermisch empfindlicher Werkstoffe
- Verbesserte Oberflächenqualität und Maßhaltigkeit der Werkstücke (Verzug↓)
- Gut Haftung der Schicht auch bei rel. niedrigen Temperaturen (200 – 700 °C)
- Gute Korrosions- und Verschleißfestigkeit
- Niedriger Reibungskoeffizient und Neigung↓ zum Kleben und Verschweißen.
- weitgehendes Vermeiden der Bildung von Aufbauschneiden
- Edles Aussehen → dekorative Anwendungen möglich
- Vor dem Beschichten können alle Teile fertigbearbeitet und wärmebehandelt werden



Einsatzgebiete und Anwendungen:

- Maschinenbau (Hartstoffschichten für Bohrer, Fräser, Stanz-, Tiefzieh- und Spritzgußwerkzeuge)
- Automobilindustrie (vom Bolzen bis zum Ventil)
- Hydraulik und Pneumatik
- Textilindustrie (Düsen, Messer oder Greifer)
- optische Interferenzschichten
- Spiegelbeschichtungen
- Dekorative Schichten
- Permeationsschutzschichten auf Verpackungsmaterial
- Elektrisch leitende Filme
- Korrosionsschutzfilme
- Medizintechnik
- Sportartikel etc.

Anwendungsbeispiele sind in den nachfolgenden Abbildungen zu sehen.

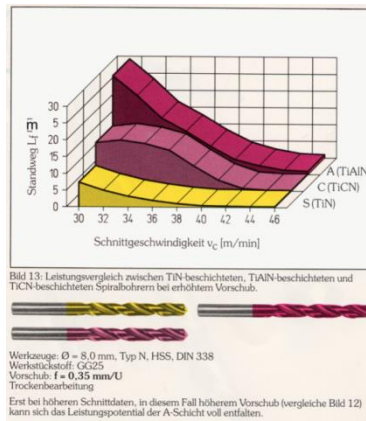
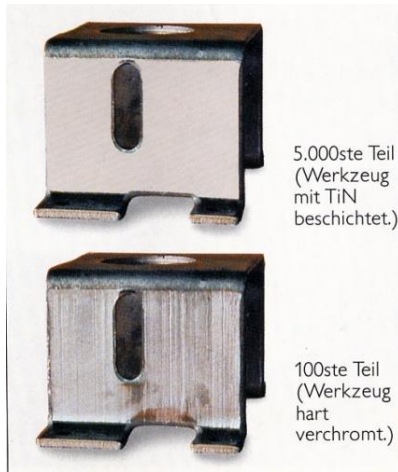


Abb. 59: Standzeiten- und „Leistungsvergleich“ verschiedener Ti Hartstoffbeschichtungen



Abb. 60: TiN-Schichten auf Gegenständen des täglichen Gebrauchs



Abb. 61: TiN-Schichten auf Bohrern und Fräsern

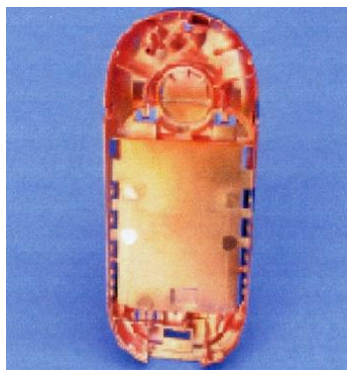


Abb. 62:

PVD-metallisiertes Handygehäuse
 (elektromagnetische Abschirmung)

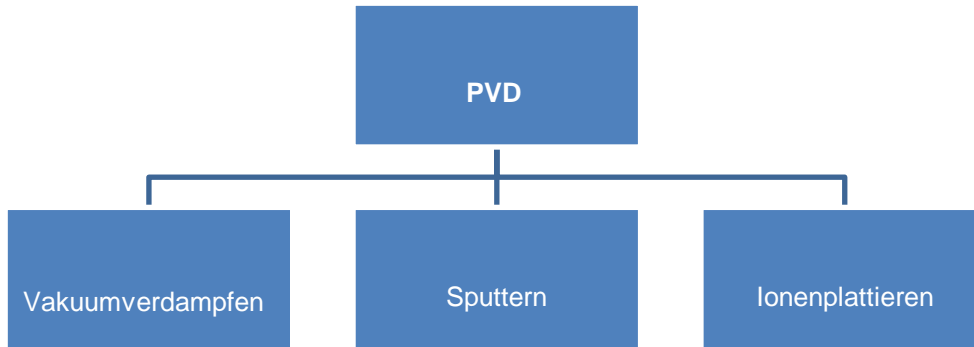


Abb. 63 PVD-metallisierter Reflektor (Autoscheinwerfer)

Von den Stählen werden vorwiegend Kaltarbeits-, Warmarbeits-, und Schnellarbeitsstähle beschichtet. Die Standzeit solcher Stähle kann durch eine TiN oder TiCN oder TiAlN-Schicht von wenigen μm Dicke teilweise um mehrere 100 % verlängert werden bei gleichzeitig verringerten Kosten. Wenn die reibungstechnischen Beanspruchungen weniger streng sind - wie im Falle sehr dünner Schichten, wie sie bei dekorativen Anwendungen zu finden sind - können geringere Beschichtungs-temperaturen (< 400 °C) benutzt werden.

Die verschiedenen PVD-Verfahren:

Heute werden 3 Arten von PVD-Verfahren angewendet, s. Abb.



Vacuumverdampfen und Sputtern werden im Folgenden erläutert.

Beim PVD-Verfahren laufen grundsätzlich drei Teilschritte ab:

- Dampferzeugung (Erzeugung und/oder Synthese der schichtbildenden Teilchen)
- Dampftransport von der Teilchenquelle (Verdampfer) zum Substrat
- Adsorption der Teilchen, Schichtbildung und Schichtwachstum auf dem Substrat



Abb. 64:

PVD-Anlage mit Rezipient und Steuerstand

Das Vakuumaufdampfen

Dies ist die älteste Variante des PVD. Vor über 100 Jahren hat Faraday mit Hilfe des Vakuumaufdampfens erste dünne Oberflächenschichten erzeugt. Das Prinzip des Verfahrens ist in der Abb. 50 dargestellt.

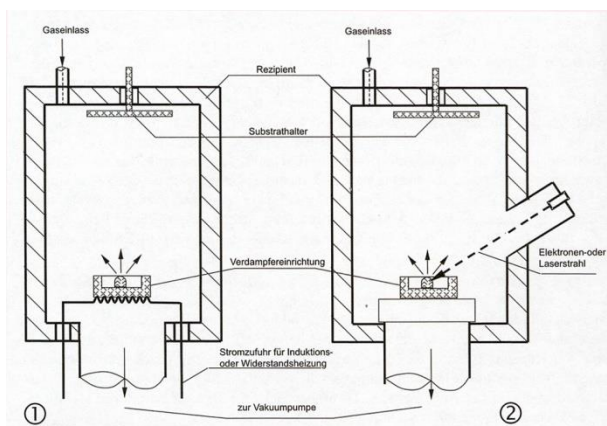


Abb. 65: Vakuumaufdampfanlage

1 thermische Verdampfung

2 Elektronen- bzw. Laser- strahl-Verdampfung

Beim reinen Vakuumaufdampfen wird in einem Rezipienten bei einem Druck von 10^{-3} - 10^{-4} Pa das Beschichtungsmaterial verdampft. Dies geschieht z.B. in einem widerstandsbeheizten Tiegel.

Die Dampfmoleküle haben bei diesem Drücken mittlere freie Weglängen von mehreren Metern. Sie treten deshalb i.a. nicht in Wechselwirkung miteinander und fliegen geradlinig zum Substrat. Da dies erheblich kälter ist als der Dampf, kondensieren die Teilchen und erstarren unter Bildung einer Schicht.

Die Wahl eines geeigneten Tiegelmaterials ist wichtig, damit bei den hohen Verdampfungstemperaturen keine Reaktion zwischen Tiegel- und Verdampfungswerkstoff auftritt. Für die meisten Verdampfungswerkstoffe (außer Al) eignen sich Wolfram-Tiegel.

Hauptmerkmale für das **Vakuumaufdampfen**:

Es können bei relativ hoher Aufdampftrate (z.B. $10^{-3} \text{ g/cm}^2\text{s}$) gleichmäßig dicke Schichten mit ausreichender Haftung erzeugt werden. Die Streufähigkeit, d.h. die Fähigkeit auch komplex geformte Teile gleichmäßig zu beschichten, ist verfahrensbedingt (geradliniger Flug der Teilchen) relativ schlecht. Abhilfe kann eventuell durch ein bewegliches Substrat geschaffen werden.

Das Sputtern

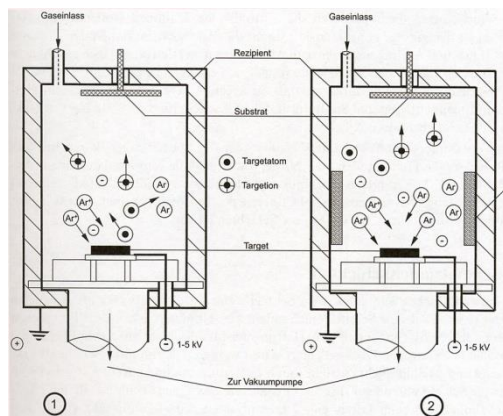


Abb. 66: Sputteranlage

1 Dioden Sputteranlage

2 Sputteranlage mit zusätzlichem Magnetfeld

Die einfachste Version des Sputterns ist das Dioden-Sputtern. Die Abb. 51 zeigt das Prinzip des Verfahrens. Im Unterschied zum Vakuumaufdampfen benötigt man hier ein Prozeßgas, i.a. Argon, und eine Hochspannungsquelle. Nach dem Evakuieren des Rezipienten wird Prozeßgas bis zu einem Druck von $10^{-1} - 1 \text{ Pa}$ eingelassen. Die mittlere freie Weglänge der Teilchen beträgt bei diesem Druck wenige mm. Bei einer Target-Spannung von -1 bis -5 kV wird ein Glimmentladungspasma erzeugt. Das Plasma brennt zwischen dem Target als Kathode und den an Masse liegenden Substrat und Rezipientenwand, die die Anode darstellen. Das Plasma besteht aus Ionen, Elektronen und Neutralen. Die Ar^+ -Ionen werden aufgrund ihrer Ladung zur Kathode hin beschleunigt und schlagen dort beim Aufprall durch Impulsübertragung und Stoßprozesse Atome, Moleküle, Ionen und Cluster aus der Oberfläche heraus. Diese Teilchen fliegen durch den Gasraum und schlagen sich auf dem Substrat schichtbildend nieder.

Da die Beschichtungsraten beim Sputtern sehr gering sind (im Bereich von 1 nm/s) hat man Sputteranlage mit zusätzlichem Magnetfeld entwickelt, s.o., Teil-Abb. 8). Die höheren Beschichtungsraten resultieren daraus, dass der Ionenstrahl durch das Magnetfeld auf das Target konzentriert werden kann. Außerdem wird durch das Magnetfeld die nötige Temperatur von ca. $300 - 500 \text{ }^\circ\text{C}$ beim Diodensputtern auf ca. $100 - 250 \text{ }^\circ\text{C}$ gesenkt, so dass auch thermisch geringer stabile Substrate beschichtet werden können.

Bedingt durch den relativ hohen Gasdruck im Rezipienten erfolgt ein Einbau von Fremdatomen in die Schicht, wodurch die Abscheidung von Reinstschichten nicht möglich ist. Andererseits kann man durch das Einbringen von reaktiven Gasen in den Rezipienten Reaktionsschichten ausbilden, das reaktive Sputtern. Dieser Prozess lässt sich zwischen PVD- und CVD-Verfahren einordnen.

Enthält das Plasma als reaktives Gas O_2 , reagieren die aus dem Metalltarget herausgeschlagenen Metall-Atome und Cluster zum Oxid, im Falle des Titans zu TiO_2 , das sich dann als Schicht ausbildet.

Hauptmerkmale für das **Sputtern**: Bei niedrigen Aufdampfraten ($< 10^{-4} \text{ g/cm}^2\text{s}$) können Schichten

mit guter Haftfähigkeit erzeugt werden, deren Dicke jedoch relativ ungleichmäßig ist. Die Streufähigkeit ist aufgrund des erhöhten Druckes (Wechselwirkung der Teilchen des Beschichtungsmaterials mit dem Prozeßgas, nur geringe mittlere freie Weglänge) besser als beim Vakuumverdampfen.

Ionenplattieren → s. VL B-KOB

Die Abb. 52 stellt den großen Anwendungsbereich von PVD-Schichten tabellarisch dar. Man erkennt, dass sich neben Metallen und Metalllegierungen auch Karbide, Nitride, Oxide und andere Verbindungen, ja sogar Kunststoffe (PTFE) aus der Dampfphase abscheiden lassen. Die Anwendungsziele der verschiedenen Schichten sowie ihre maximale Anwendungstemperatur sind aus der Abb. 66 ebenfalls zu entnehmen.

Schicht	Anwendungsziele							Max. Anwendungstemperatur der Schicht °C
	Korrosionsschutz	Oxidationsschutz	Ver-schleiß-schutz	Gleit-schicht	Haft-grund	Re-paratur-schicht	Andere	
Metalle und Legierungen	Aluminium	●						400
	Titan	●						400
	Chrom			●				450
	Cobalt				●			450
	Kupfer	●			●	●		350
	Silber				●			850
	Cadmium				●			220
	Indium				●			100
	Zinn				●			100
	Gold				●			*
	Blei				●			200
	Cr80-Ni20			●				800
	MCrAlY M=Fe, Co, Ni	●	●					~1000
Carbide	SiC			●				*
	TiC, TiC-TiN			●				400
	CrC Cr ₃ C ₂			●				500
	FeC				●			500
	WC			●				500
Nitride	BN _{hex.}				●			1000
	TiN	●		●				500
Oxide	Al ₂ O ₃			●				*
	PbO				●			600
Andere	PTFE				●			250
	CaF ₂				●			700-1300
	Fe ₂ B	●			●			
	MoS ₂				●			350
	MoSe ₂				●			400
	WS ₂				●			400
	WSe ₂				●			350

Abb. 67:

Anwendungsziele von PVD-Schichten

Die maximale Anwendungstemperatur ist i.a. nicht durch die Schicht sondern durch den Grundwerkstoff begrenzt !“

Näheres s. auf meiner Homepage unter „[Fachaufsätze](#)“.. → Grundlagen zum PVD-Verfahren“
Und im Skript zur VL „B-KOB“, Teil 2: „Oberflächentechnik“

2.3.5 Thermisches Spritzen

Anwendung: primär Korrosionsschutz, (evtl. Gehäuse...)

Material: Metalle (Al, Zn sowie Leg., z.B. AlMg)

Prinzip der Durchführung:

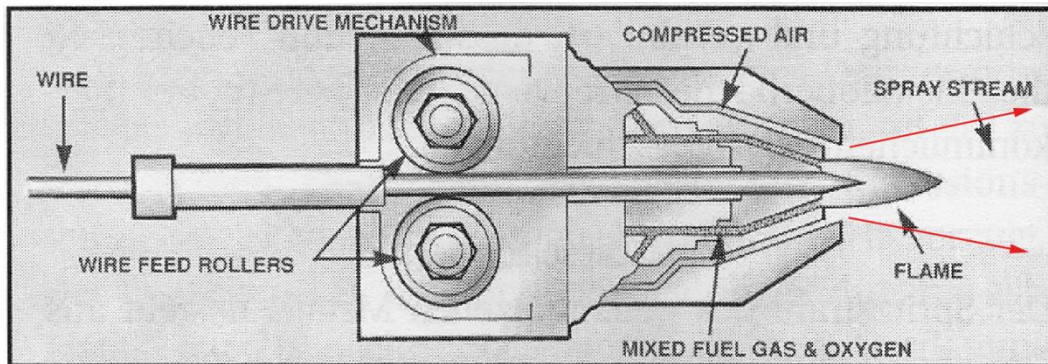


Abb. 68:

O₂-gespeiste Gasflammen-Spritzpistole

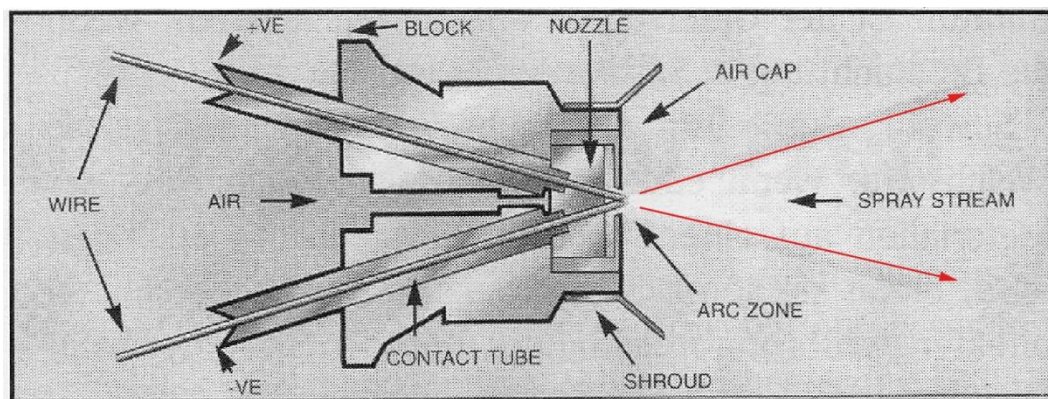


Abb. 69:

Elektrische Lichtbogen-Spritzpistole

Beachte: Spritzabstand nur 100 - 150 mm, vertikal applizieren (Poren...)
Schutzmaßnahmen da Metallstaub + Lärm ⇒ O₂-gespeister Schutzhelm

Oberflächenvorbereitung (ISO 8501-1 + EN 22063):

"Strahlen", z.B. mit Hartgußkies führt zu reiner Oberfläche mit best. Rauigkeit

Schichtbildung: $1\mu\text{m} < \text{Tröpfchen-}\varnothing < 300\mu\text{m} \Rightarrow T \downarrow$ während des Fluges \Rightarrow flüssig + fest auf Oberfläche (kaum $T \uparrow$) \Rightarrow Porenbildung (wird durch Korrosionsprodukte geschlossen). Besser: Verdichtung der Schicht (sofort) mit organischen Werkstoffen (Vinylchlorid, Epoxidharz, PU...)

Wirkprinzip:

Anwendungen:

2.3.6 Beschichten: "Sprühkompaktieren*"

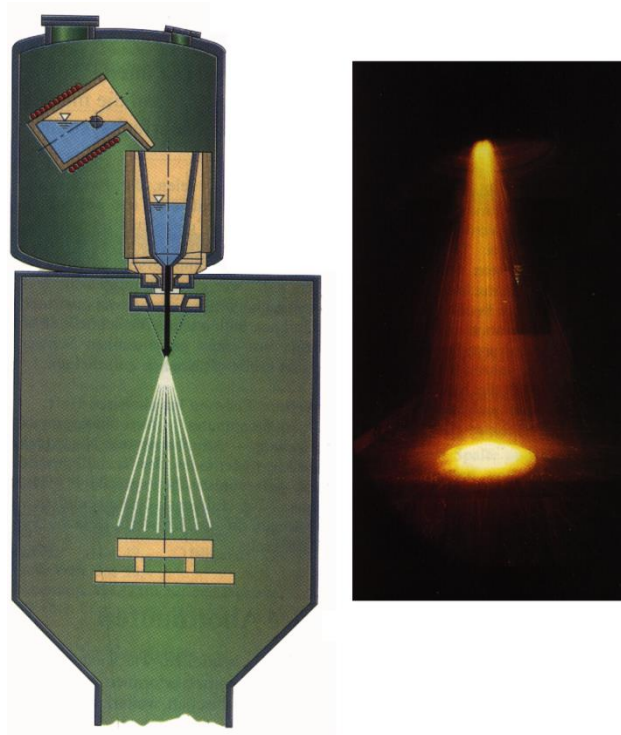


Abb. 70: links: Schema einer Sprühkompaktieranlage mit gekipptem Schmelztiegel, beheiztem Verteiler, zweistufiger Zerstäubungszone (Gasdüse) und Substrat.
rechts: Heißer Tropfenstrom, der auf dem Substrat auftrifft und sich verdichtet.

Sprühkompaktieren kann auch zur Erzeugung von massiven Teilen, z.B. Bolzen, s. Abb. benutzt werden (→ Urformen)

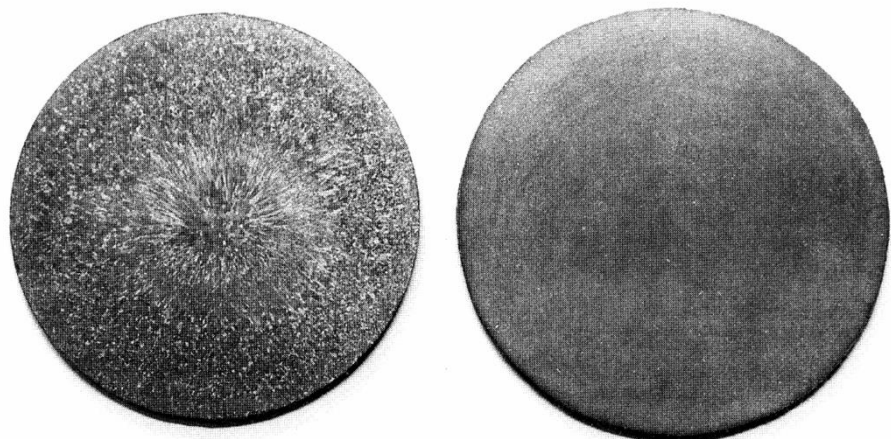
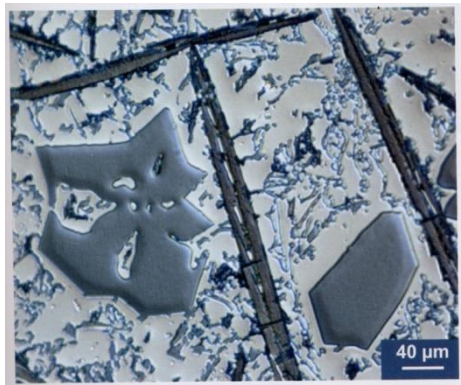


Abb. 71: Homogener Bolzen: a) Gegossen

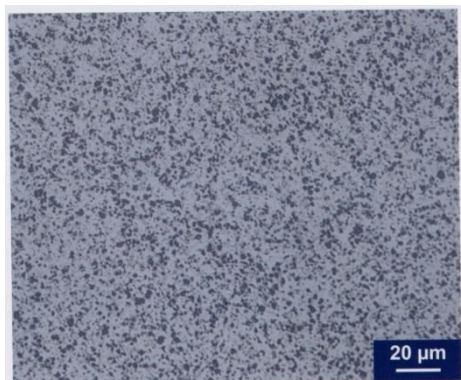
b) Sprühkompaktiert

Abb. 72a,b: Sprühkompaktieren: Vergleich der Gefüge der Legierung AlSi20Fe5Ni2



Gußgefüge mit groben Fe- und Ni-haltigen, plattenförmigen Ausscheidungen (dunkel-grau sowie Primär-Si (hellgrau))

a → beide Phasen wirken als Kerben → Werkstoff glas-spröde, →



Sprühkompaktiertes Gefüge mit homogenen, feinen, globularen Si-Ausscheidungen →

Ursache:

b

Vorgehensweise:

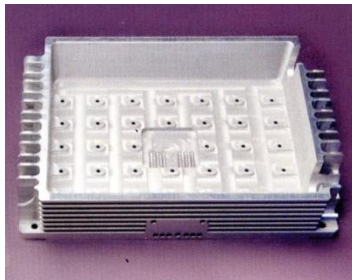
Die Tröpfchen lässt man auf ein sich drehendes Substrat niederschlagen und zieht dieses Substrat sukzessive nach unten ab. Dann wächst im Gegenzug ein bolzenförmiges Gebilde auf, welches ohne weiteres extrudiert werden kann. (sonst Pulverbildung → Heißisostatisches Pressen nötig).

Der Vorgang findet unter Schutzgas statt (N_2). Der gelöste Stickstoff von drei bis fünf Prozent, wird in einem anschließenden Strangpressprozess vollständig eliminiert.

Dadurch ist diese Materialklasse (Sprühkompaktierte Aluminiumlegierungen) in der Lage, anspruchsvolle Leichtbaukonzepte zu realisieren und Stähle bzw. Titanlegierungen zu substituieren



Trägerarm eines Bestückungsautomaten



Gehäuse für Linearantrieb



Kolben und Ventile
AlMg17Si8Cu2 AlSi20Fe5Ni2

Abb. 73: Anwendungsbeispiele (nach Warmumformung)

* Näheres in der VL sowie unter „[Sprühkompaktierte Al-Legierung](#)“ auf meiner homepage sowie und „Spektrum der Wissenschaften“, Nov. 1995, S. 108 ff

Die Beschichtungsverfahren gehören in den Spezialbereich der Oberflächentechnik. Dieser wird im Rahmen der VL „B-KOB“ (Korrosion und Oberflächentechnik) ausführlicher behandelt.

2.4 Stoffeigenschaften ändern → Wärmebehandlungen Übersicht

Beispiel 1: WB von Stahl (s. auch VL B-WTK)

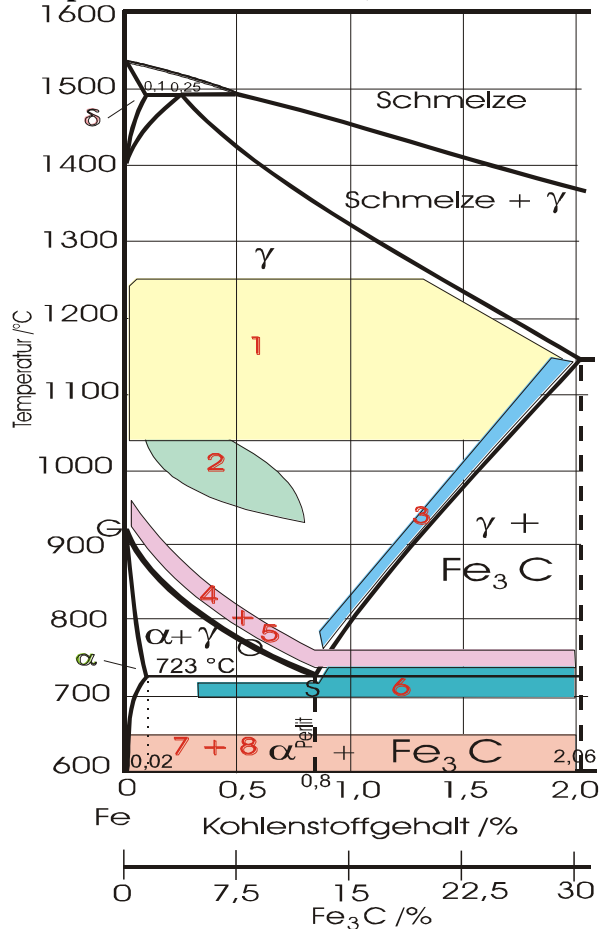


Abb. 74:

T- und c-Bereiche der verschiedenen Wärmebehandlungen im Fe-Fe₃C-Diagramm („Stahlecke“)

- 1:
- 2:
- 3:
- 4:
- 5:
- 6:
- 7:
- 8:

Beispiel 2: Aushärten von Al (s. auch VL B-WTK + Praktikum B-PWF)

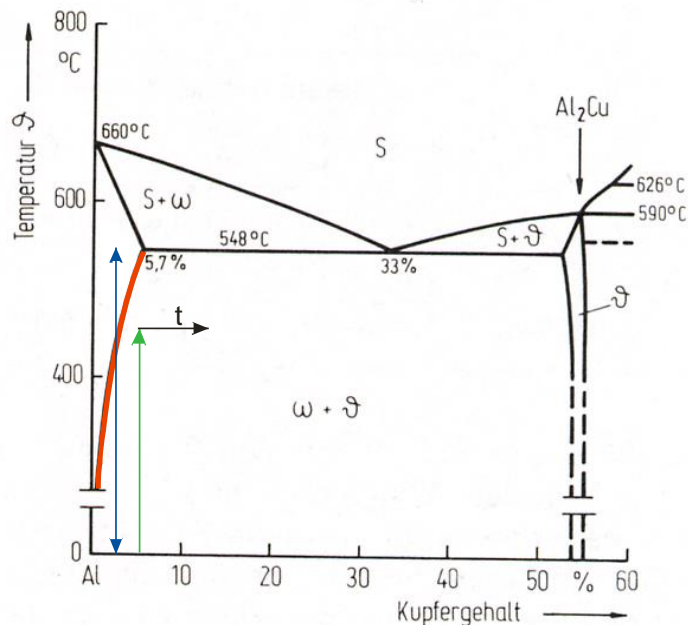


Abb. 75:

Das Aushärten von Al-Legierungen besteht aus 3 Schritten:

-
-
-

Ein ausführliches Beispiel eines Verfahrens des Stoffeigenschaftenänderns in Kombination mit dem Umformen wird in Kap. 3 besprochen

2.5 Verschiedene Möglichkeiten der Fertigung:

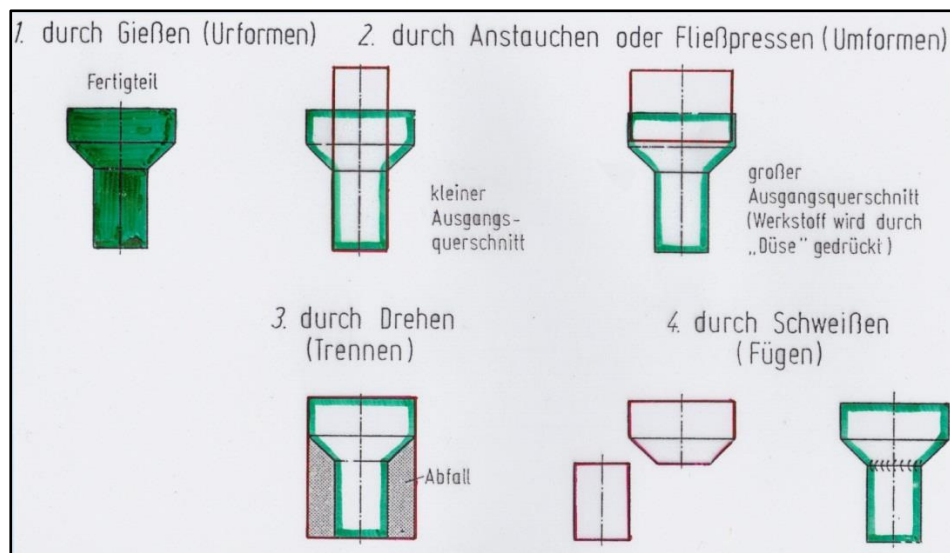


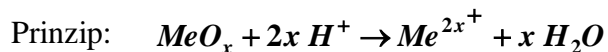
Abb. 76: verschiedene Möglichkeiten der Fertigung

Bei der Fertigung eines Produktes werden i.a. mehrere Fertigungsverfahren nacheinander durchlaufen; diese können durchaus spanend und spanlos sein

→ Beispiel: Karosserieblech, Werkstoff: C-armierter Stahl

Schritt	Vorgang	Verfahren	SL-Gruppe
1	Stahlerzeugung	Hochofen	
2	Kristallisieren	Gießen	
3	Walzen	Warmwalzen	
4	Reinigen...	Beizen*	
5	Walzen	Kaltwalzen	
6	Korrosionsschutz	Verzinken**	
7	Band zerteilen	Abscheren	
8	Karosserie formen	Tiefziehen	
9	Endform herstellen	Schweißen	
10	Oberflächenschutz	Lackieren***	
11	Wärmebehandlung	Aushärten****	

* Beseitigung von Zunder und Verunreinigungen durch Auflösen in mineralischen Säuren.



** Elektrolytisch oder „Feuerverzinken“, s. Folien

*** Vielstufiger Prozeß, s. Folie

→ wichtig bei allen Oberflächenverfahren: Vorbereitung der Oberfläche !

**** neue Werkstoffgruppe: „Bake hardening Steels“.

Diese Stähle sind unlegiert enthalten aber geringe Mengen an ausscheidungshärtenden Legierungselementen, z.B. P. Sind diese Elemente gelöst, ist der Werkstoff gut umformbar. Beim Einbrennen des Lacks (T ca. 170 °C) führt die Ausscheidung bzw. die Wanderung der Zwischengitteratome an die Versetzungen (Alterung) zur Festigkeitssteigerung, z.B. um 100 – 350 N/mm² (2% Kalt-Vor-Verformung → Versetzungen...)

3. Stoffeigenschaften ändern → Anwendung

3.1 Kaltverfestigung (KV), Erholung

Ursache für die KV:

Abb. 77: Erholungsmechanismen bei Metallen

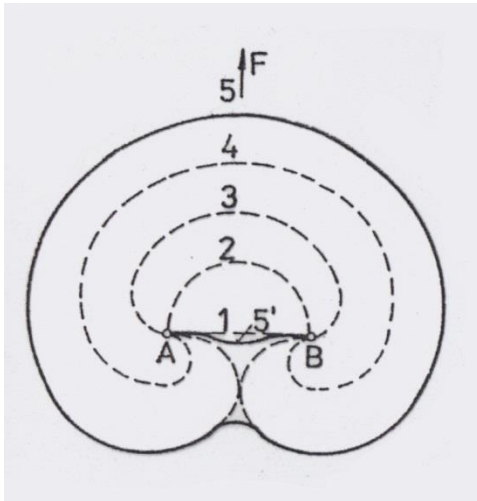


Abb. 78:

Franck-Read-Mechanismus:

- Vervielfältigung der Versetzungen → z.B. 10^6 -fach
- gegenseitige Behinderung
- Erhöhung der zur plastische Verformung nötigen Spannung
- Kaltverfestigung

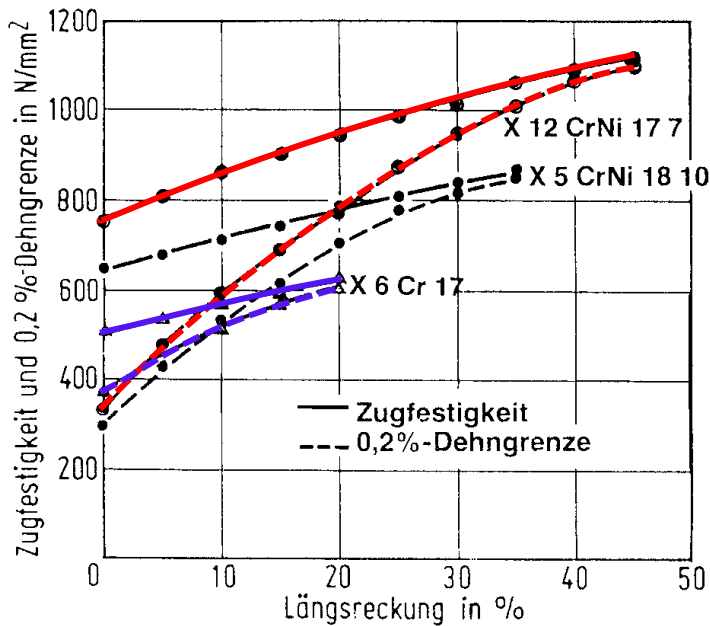
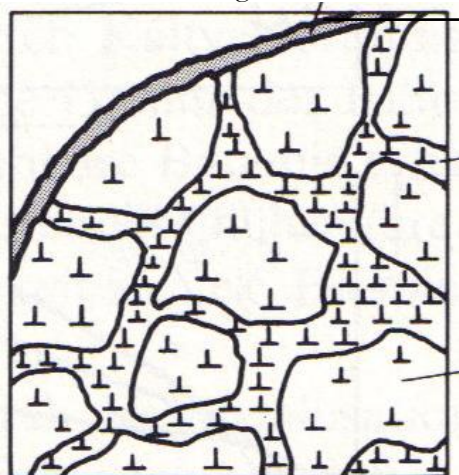


Abb. 79: Auswirkung der KV anhand von σ - ϵ -Kurven verschiedener nichtrostender Stähle



Großwinkel-KG

Hohe \perp - Dichte
z.B. 10^{11} cm^{-2}

Normale \perp - Dichte
z.B. 10^5 cm^{-2}

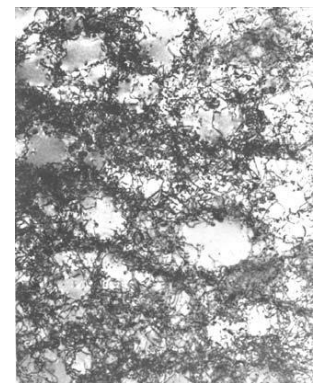


Abb. 80: \perp - Dichteverteilung nach Kaltumformung (schematisch)

Erholung:

Möglichkeiten für das Ausheilen und Umlagern von Gitterfehlern

	Vorher	nachher	
Ausheilen			Zwischengitteratome n
			Versetzungen
Umlagern			Kondensation von Leerstellen
			Bildung von Kleinwinkel-KG Regelmäßige Anordnung führt zu Energieerniedrigung → Polygonisation ()

Abb. 81: Erholungsmechanismen bei Metallen

Anwendung: Rückführung der physikalischen Eigenschaften λ und σ aber: $HV, R_p \approx \text{const.}$

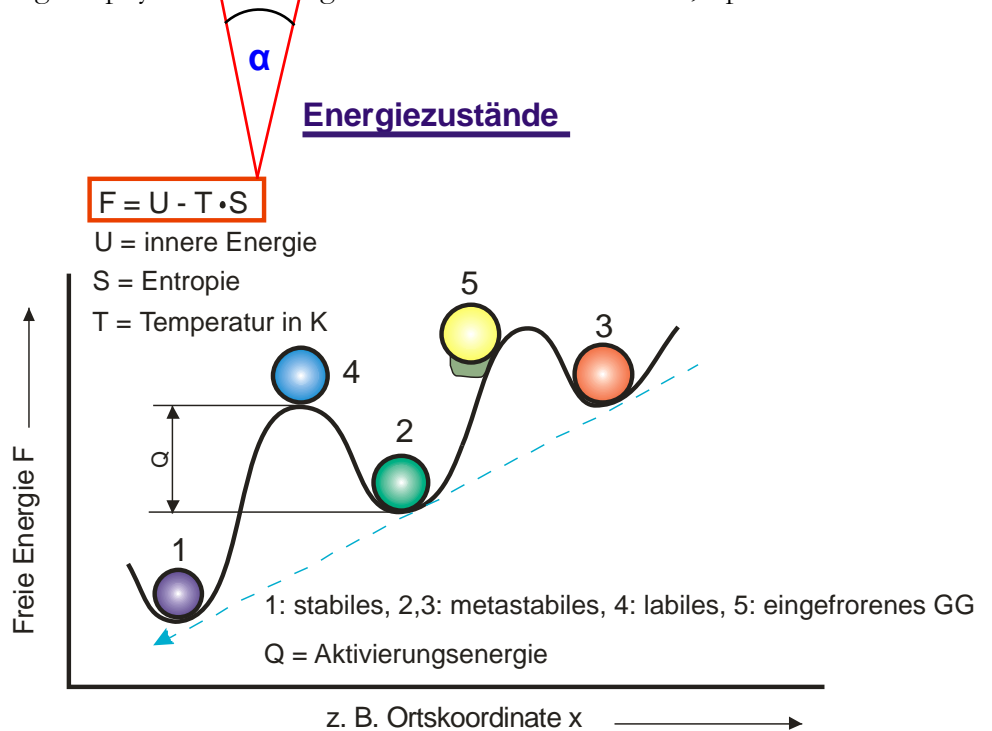


Abb. 82:
Energiezustände

3.2 Rekristallisation → Voraussetzungen

$$\square T > T_{R(\text{ekrist.})}$$

T_R = Rekristallisationstemperatur

T_S = Schmelztemperatur

$$\square \varphi > \varphi_{\text{krit}}$$

aus Zugversuch: $\varepsilon = (\Delta l/l_0) \cdot 100$

→ $\varphi =$

φ = Umformgrad (Verformungsgrad) in [1]

ε = Dehnung in %/100

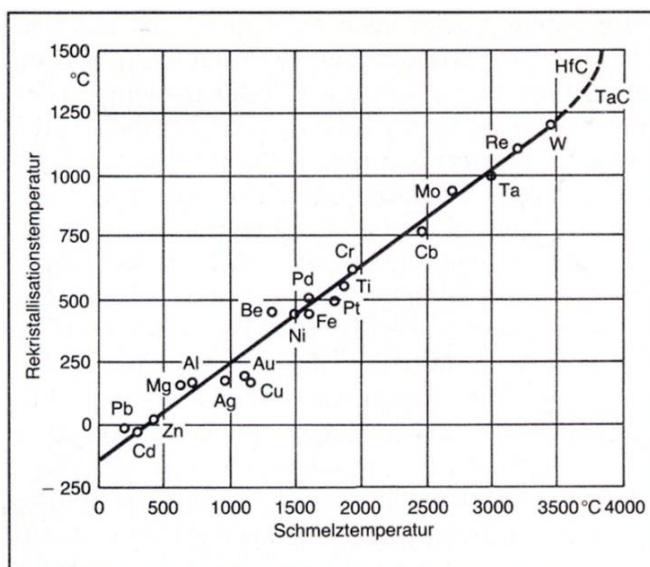


Abb. 83: $T_R = f(T_S)$

Rekristallisation: Diagramme

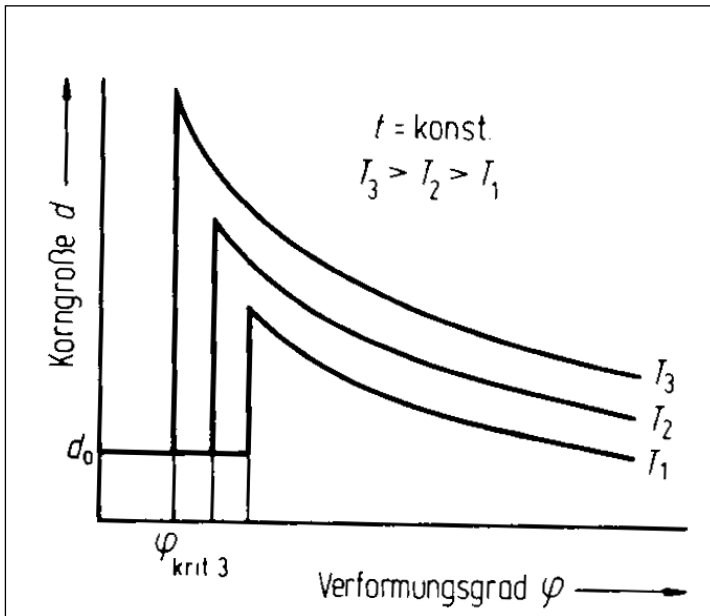
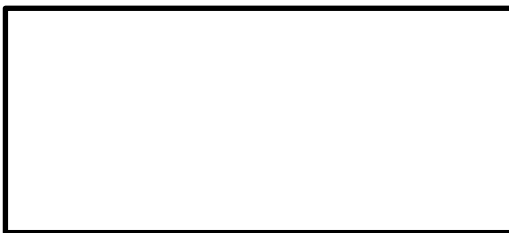


Abb. 84:

Korngröße nach der Rekristallisation = $f(\varphi)$,
oben: schematisch



rechts: Gefüge von Al
als $f(\epsilon)$

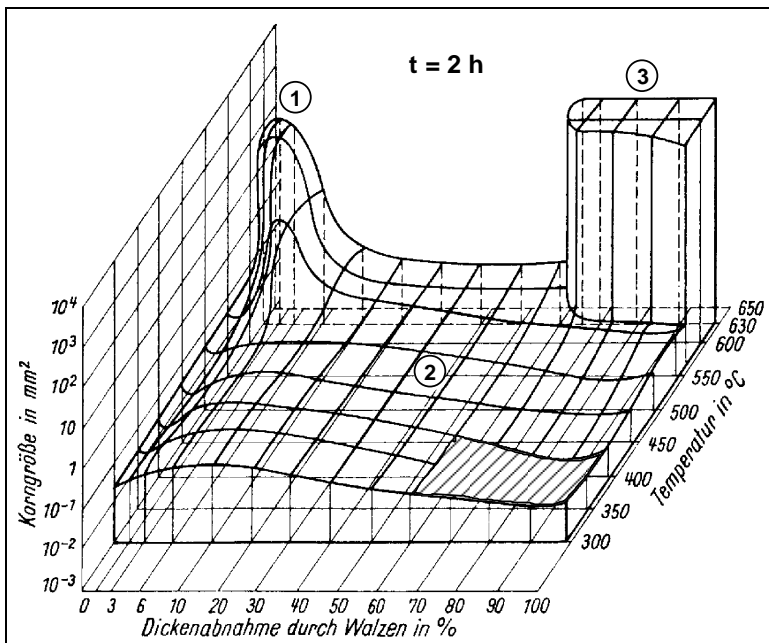
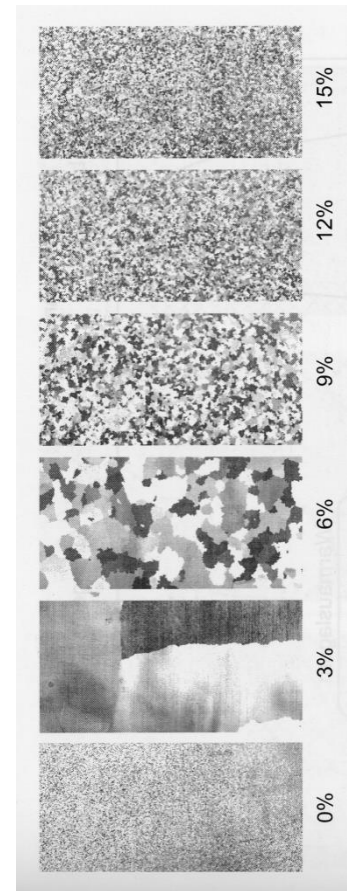


Abb. 85:
3-dim. Rekristallisationsschaubild
für Al99,6 (aus Al-Handbuch)

①

②

③

Rekristallisation: Gefüge

Tiefziehstahl (0,063 % C, 0,053 % N), $V = 500 \times$,

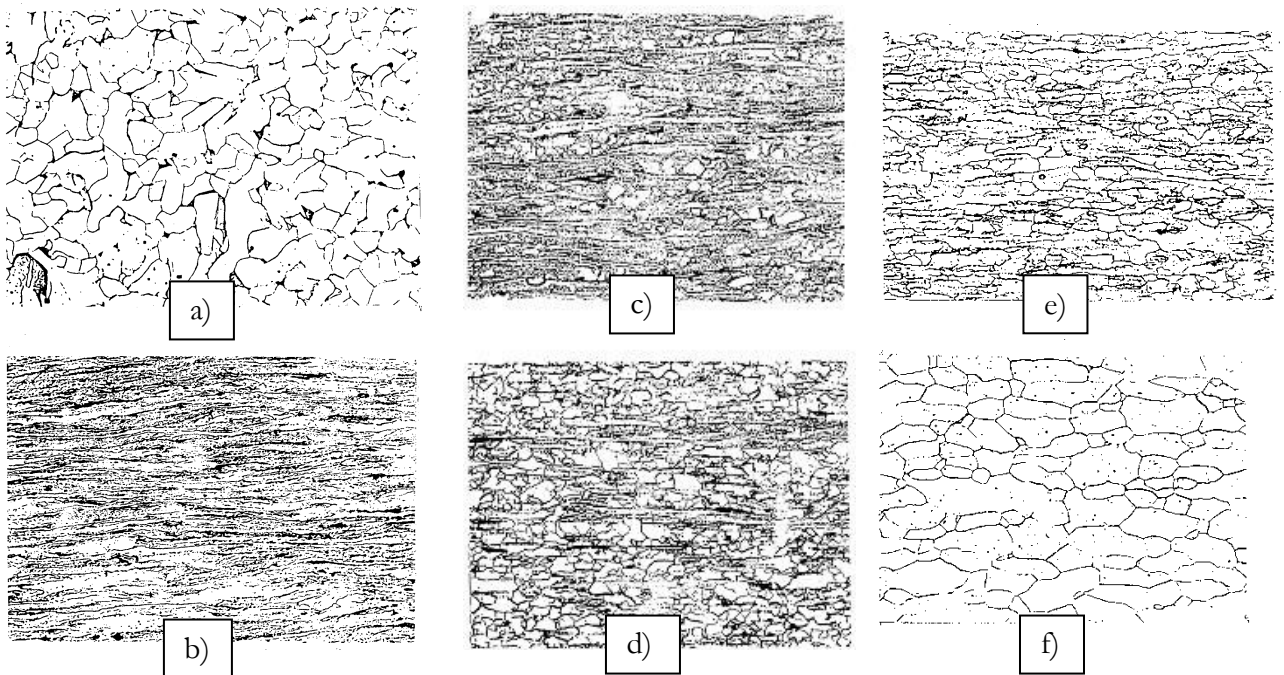


Abb. 86: Gefüge von C-armem Stahl vor, während und nach der Rekristallisation

- a) Ausgangszustand (Warmband)
- b) Kaltband: $\epsilon = 80 \% \Leftrightarrow \varphi = 0,588$
- c) $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = 1 \text{ min}$
- d) $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = 2 \text{ min}$
- e) $T = 600 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = 3,3 \text{ h}$
- f) $T = 700 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = 78 \text{ h}$

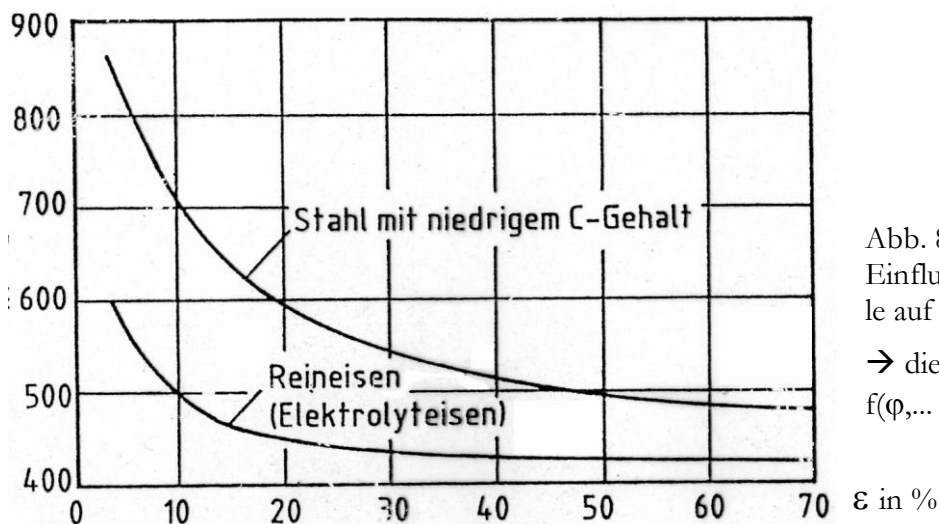


Abb. 87:
Einfluß der Legierungsbestandteile auf die Rekristallisation
→ die Rekristallisations-T ist $f(\varphi, \dots)$

Voraussetzung für die Berechnung der Glühzeit / -t beim Rekristallisieren:

Arrhenius-Gleichung:

$$M(t) = M_0 * e^{-\left(\frac{Q}{R*T}\right)}$$

M =
M₀ =
R =
T =
Q =



t₀ =



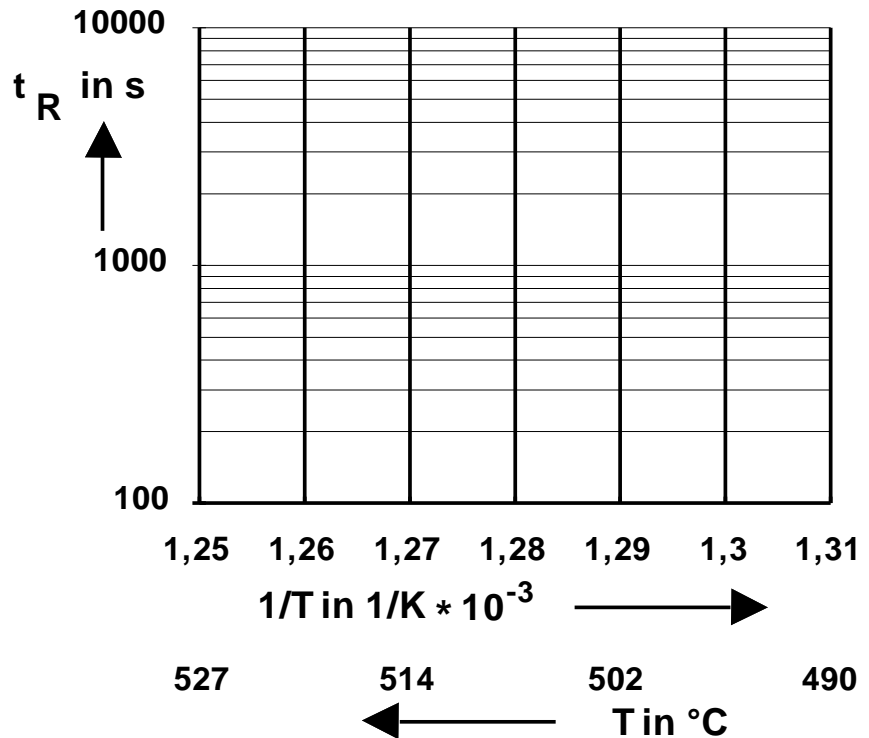
Rekristallisation: Übungsaufgabe

(weitere Aufgaben in der VL)

Bei einer Fertigung durch Kaltumformung ist eine Rekristallisationsglühung zwischen zwei Umformvorgängen durchzuführen. Ihnen steht die Information zur Verfügung, dass bei dem infrage kommenden Werkstoff die primäre Rekristallisation bei 490 °C nach 2000 s und bei 520 °C nach 900 s abgeschlossen ist. Versuche bei 500 °C haben gezeigt, dass die Rekristallisation für den Fertigungsablauf zu lang dauert. Ziel ist eine Reduzierung der Rekristallisationszeit auf 1/4. Um wie viel °C müssen Sie dazu die Temperatur erhöhen ?

Tipp: Die Aufgabe ist rechnerisch (Arrhenius-Gleichung) auf mehreren Wegen und grafisch lösbar. Die grafische Lösung wird bei einer Abweichung < 2% anerkannt.

gegeben: $R = 8,31 \text{ J/Mol K}$



- A 28 °C
- B 39 °C
- C 47 °C
- D 55 °C
- E 66 °C

Rekristallisation: Bestimmung von T_R oder t_r ohne Arrhenius-Gleichung

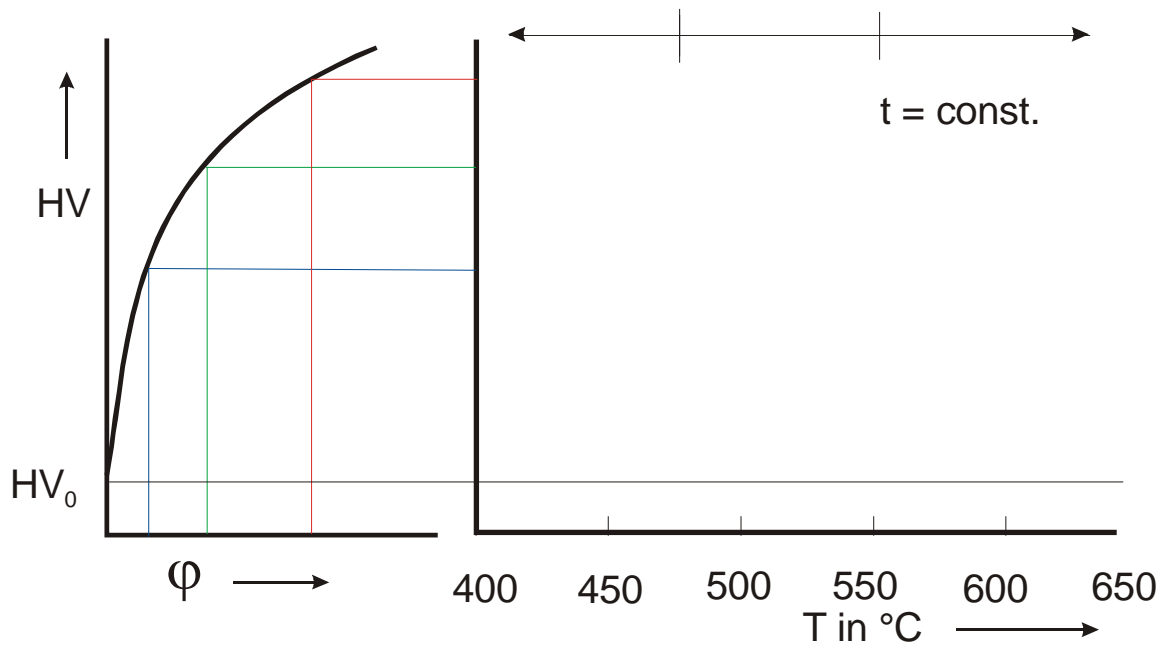


Abb. 88: praktische Ermittlung der Rekristallisationstemperatur

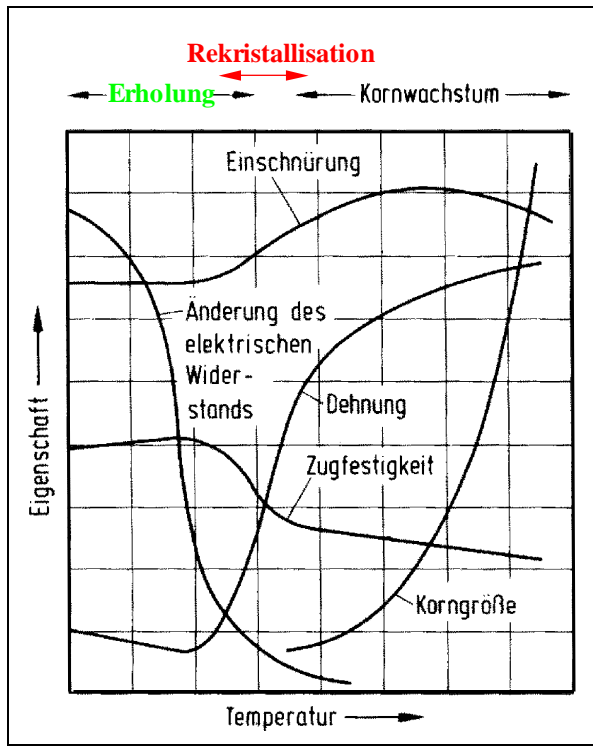


Abb. 89:
Eigenschaftsänderungen als $f(T)$ (schematisch)

4. Grundlagen der Umformtechnik:

4.1: Werkstoffe

□ Stahl

□

□

4.2 Vorteile der Spanlosen Fertigung

4.2.1 Energiebedarf verschiedener Fertigungsverfahren

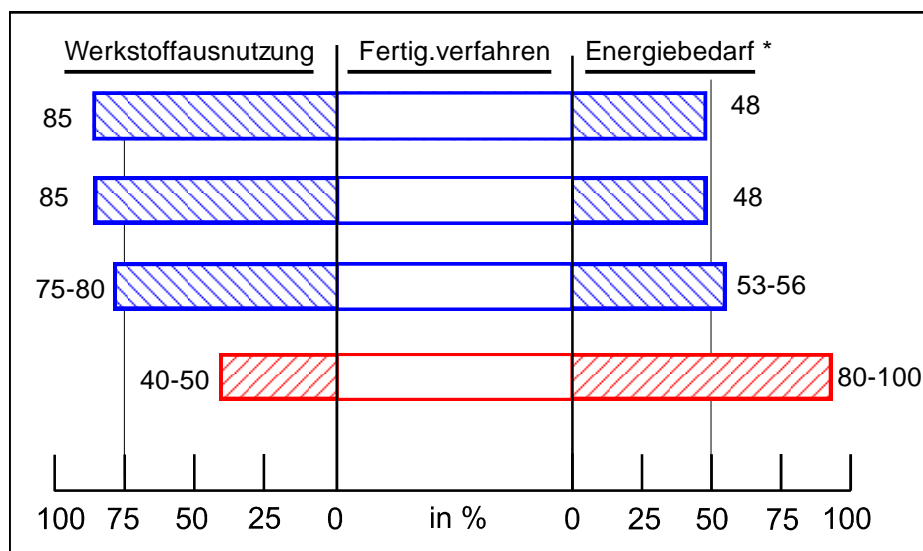


Abb. 90: Energiebedarf verschiedener Fertigungsverfahren unter Berücksichtigung der Werkstoffausnutzung (* je kg Fertigteil)

4.2.2 Faserverlauf

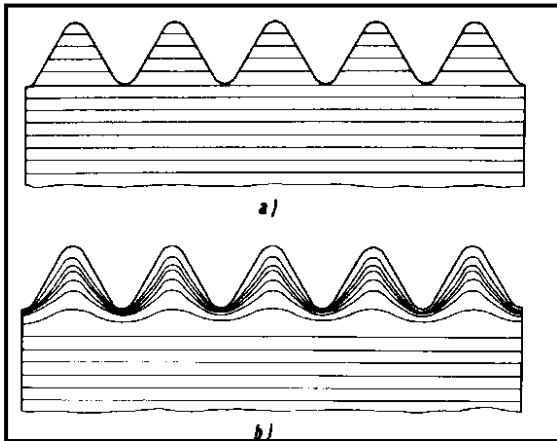


Abb. 91: Faserverlauf im Werkstück

a) mitund

b) mit Gewinde

Faserverlauf nach dem Umformen

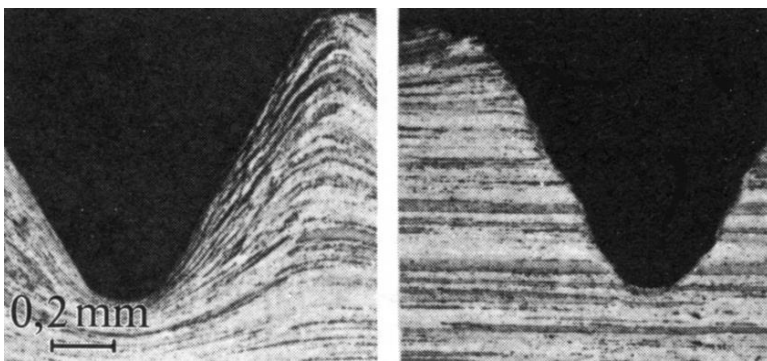


Abb. 92: Günstiger und ungünstiger Faserverlauf im gerollten bzw. geschnittenen Gewinde

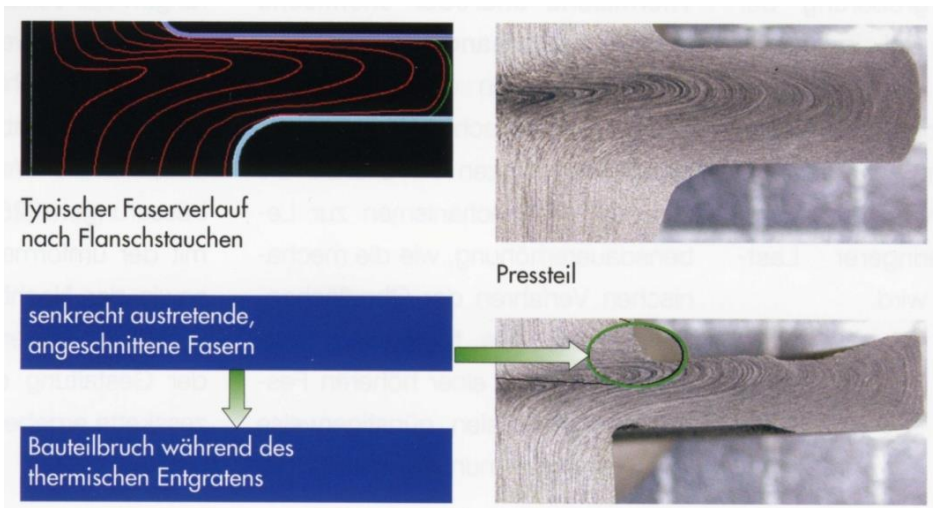
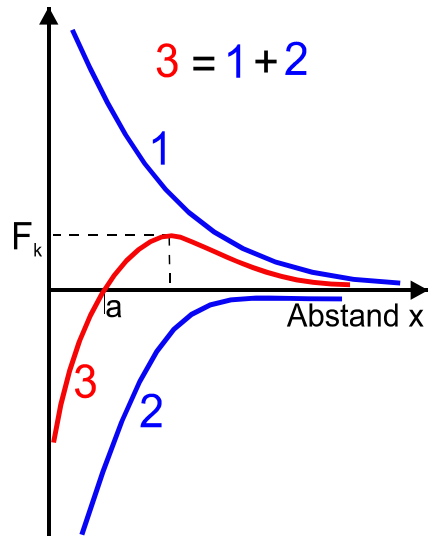


Abb. 93: Bauteilausfall durch ungeeignete Abstimmung des umgeformten Faserverlaufs mit der nachfolgenden Zerspanungsoperation

→ **Vorteile** der spanlosen Fertigung gegenüber der spanenden Fertigung:

4.3 Der Verformungsmechanismus der Metalle

4.3.1 Der Gitteraufbau der Metalle

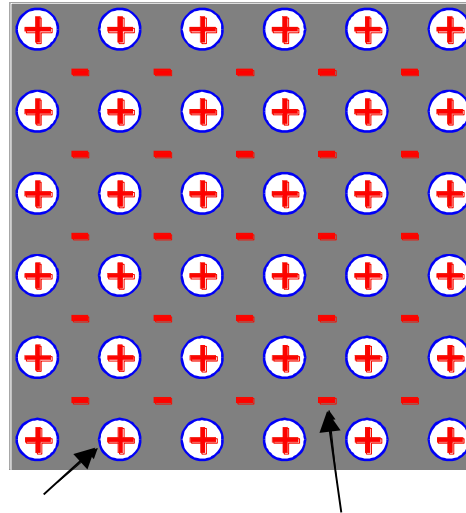


1: Anziehung: $F \approx$

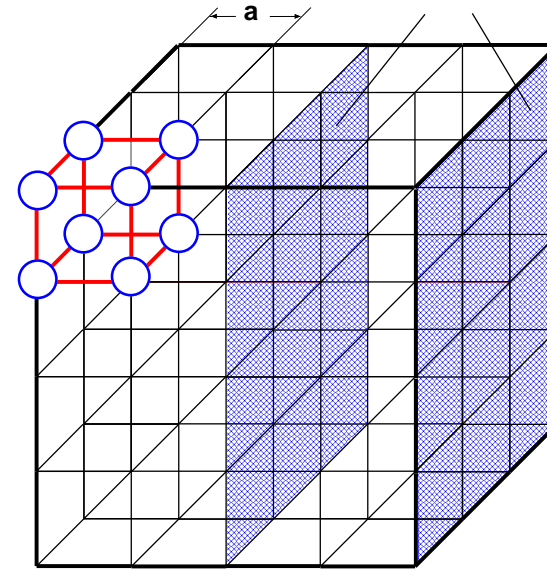
2: Abstoßung: $F \approx$

Abb. 94: Gitteraufbau der Metalle

a: Kräfte zwischen den Atomrümpfen



b: Atomarer Aufbau (schematisch)



a =

c: resultierender Gitteraufbau



Raumgitterformen (Modifikationen) des Eisens

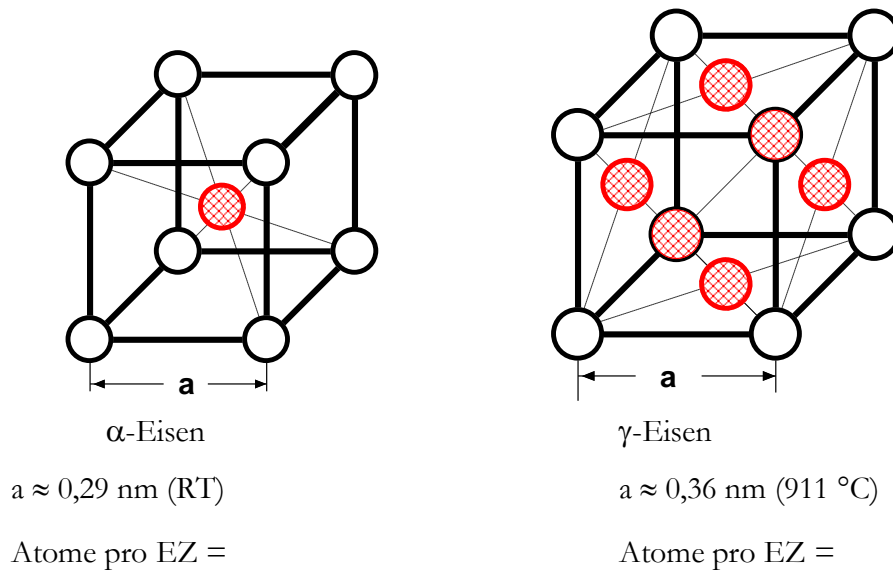


Abb. 95: Raumgitterformen (Modifikationen) des Eisens

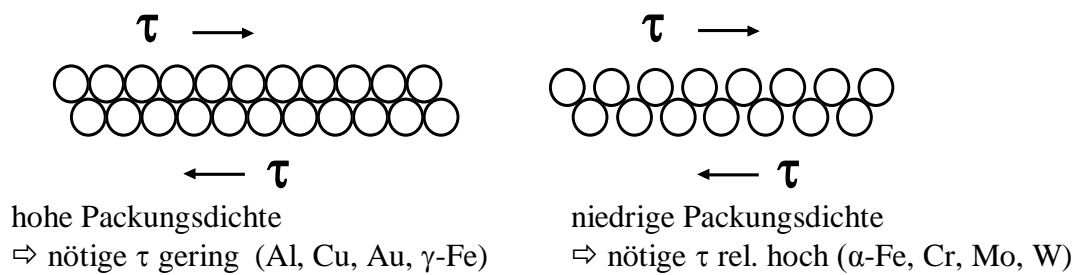


Abb. 96: Gleitbewegung auf Ebenen verschiedener Packungsdichte (Prinzip)

4.3.2 Verformungsmechanismus bei Metallen: Wirkung der Versetzungen

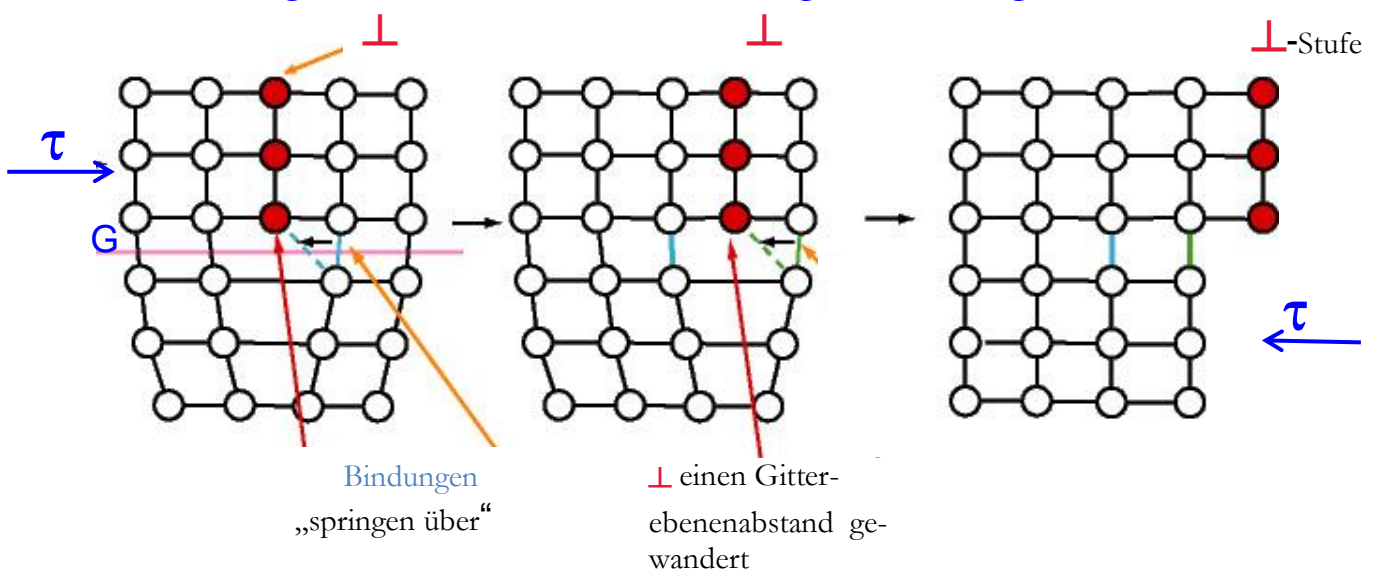


Abb. 97: Gitterfehler: Ebene Darstellung einer (Stufen-)Versetzung

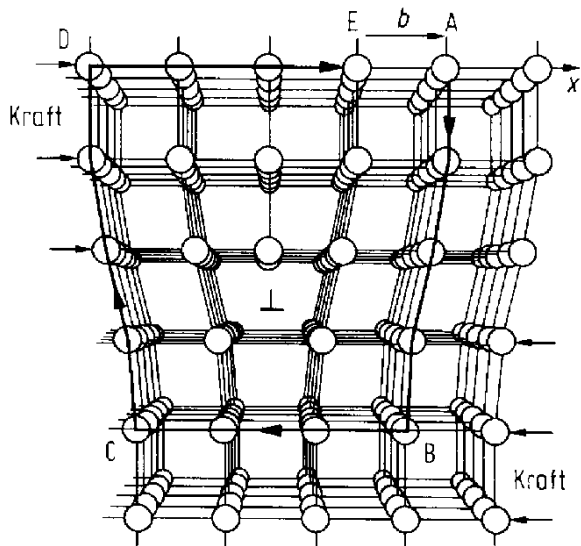


Abb. 98:
 Gitterfehler: (Stufen-)Versetzung
 → Burgersumlauf
 b =

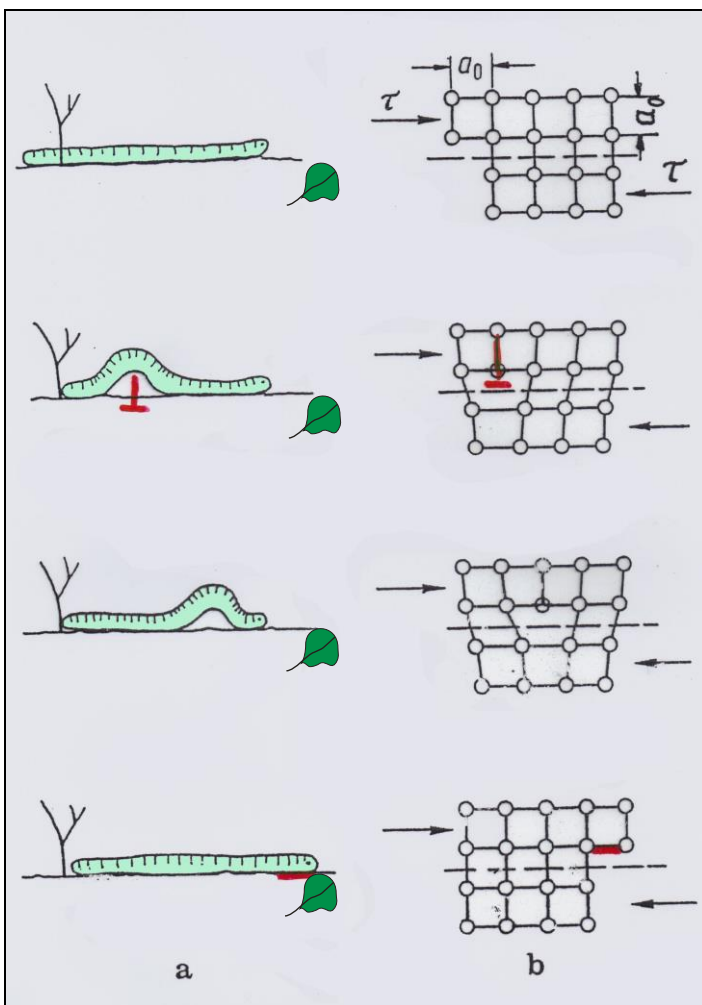


Abb. 99:
 Wurm „Willi“ als Analogon zur Versetzungs-
 bewegung

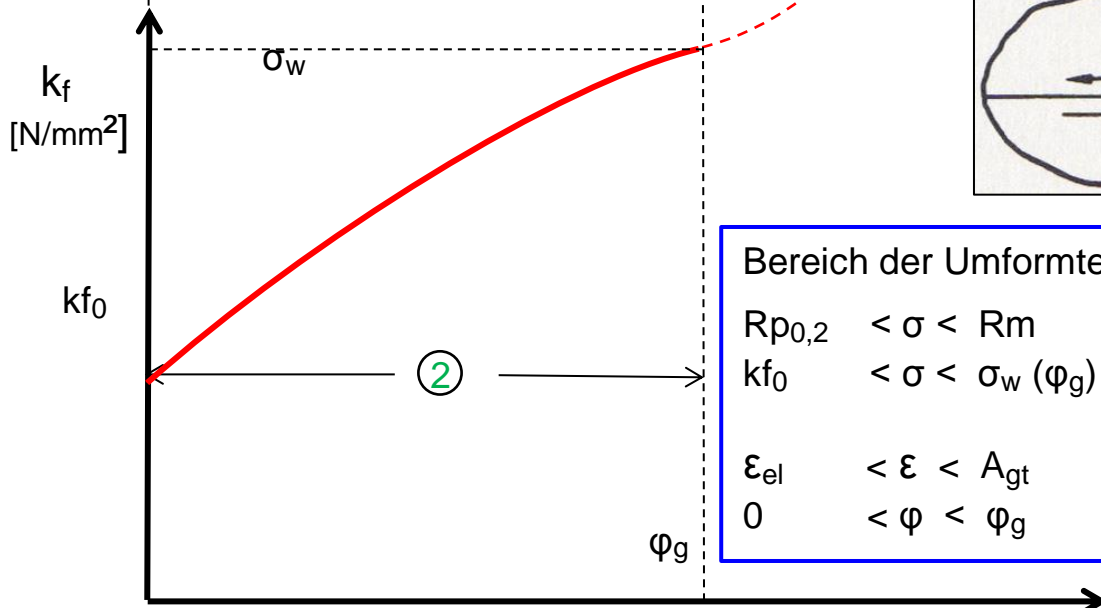
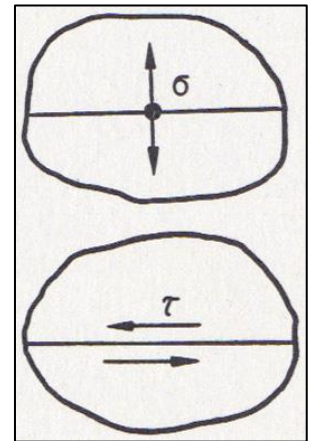
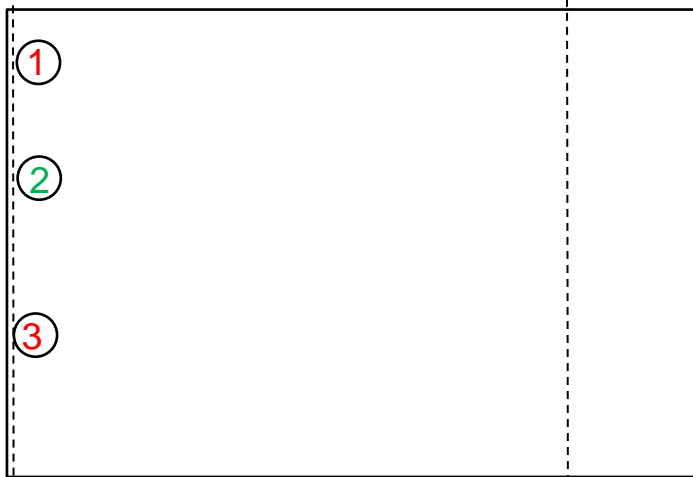
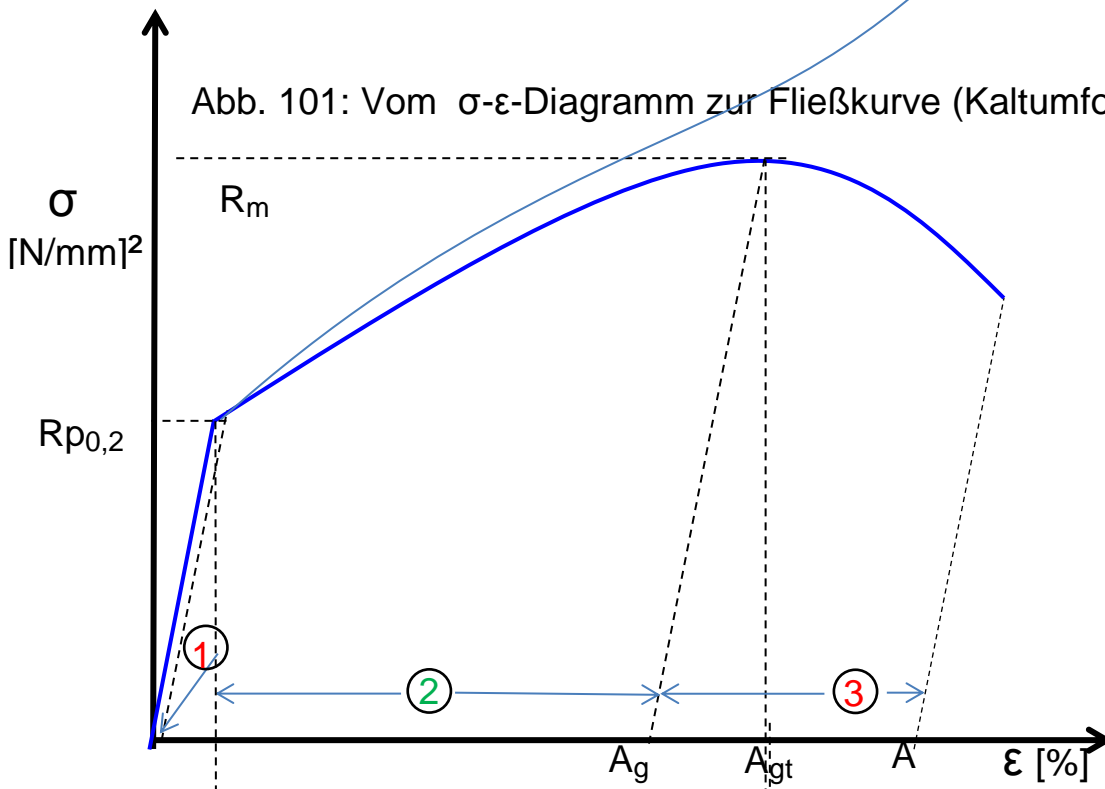
Weiteres Analogon: Teppichfalte...

4.4 Umformtechnik und Spannungs-Dehnungs-Diagramm



Abb. 100: \Leftrightarrow die nominelle und die „wahre“ σ - ε -Kurve

Abb. 101: Vom σ - ϵ -Diagramm zur Fließkurve (Kaltumformung)



Bereich der Umformtechnik:

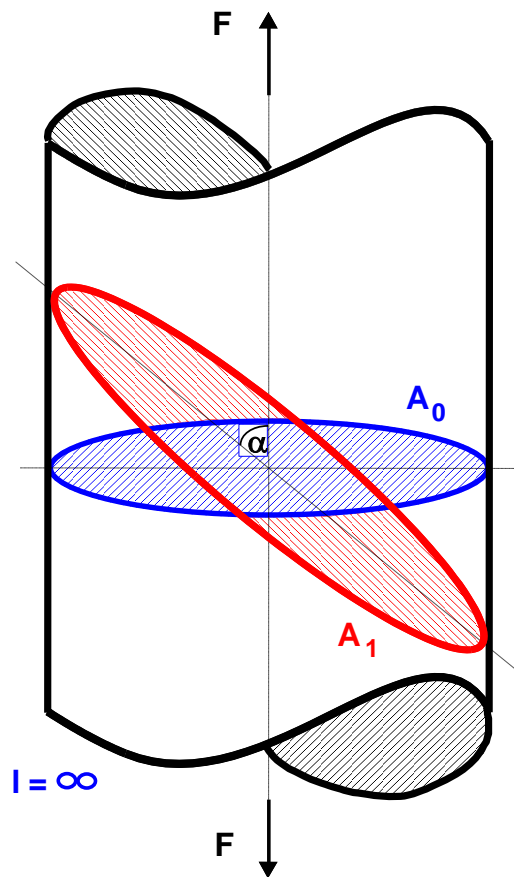
$R_{p0,2}$	$< \sigma < R_m$
k_{f0}	$< \sigma < \sigma_w (\varphi_g)$
ϵ_{el}	$< \epsilon < A_{gt}$
0	$< \varphi < \varphi_g$

Fließkurve $\rightarrow k_f = f(\varphi)$

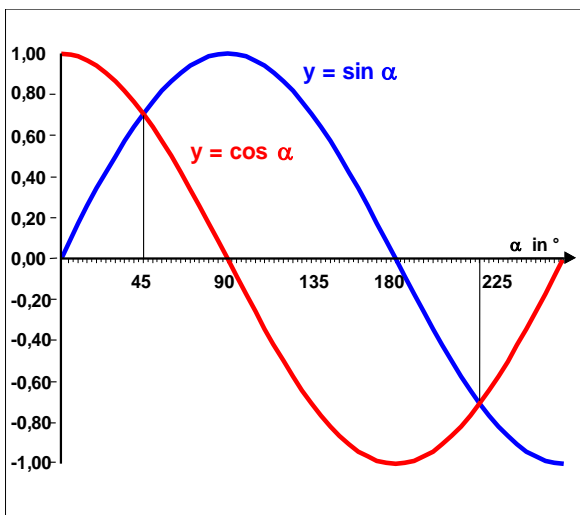
φ [1]

4.5 Wirkung von Spannungen

4.5.1 Schmidtsches Schubspannungsgesetz:



$$\alpha = 90 \mid \alpha = 0^\circ \mid 0^\circ < \alpha < 90^\circ$$



Beim Umformen von Metallen sind die wirksamen Spannungen immer _____ !

Abb. 102: zur Ableitung des Schmidtschen Schubspannungsgesetzes

4.5.2 Festigkeitshypothesen (2-achsig)

τ -Hypothese nach Tresca:

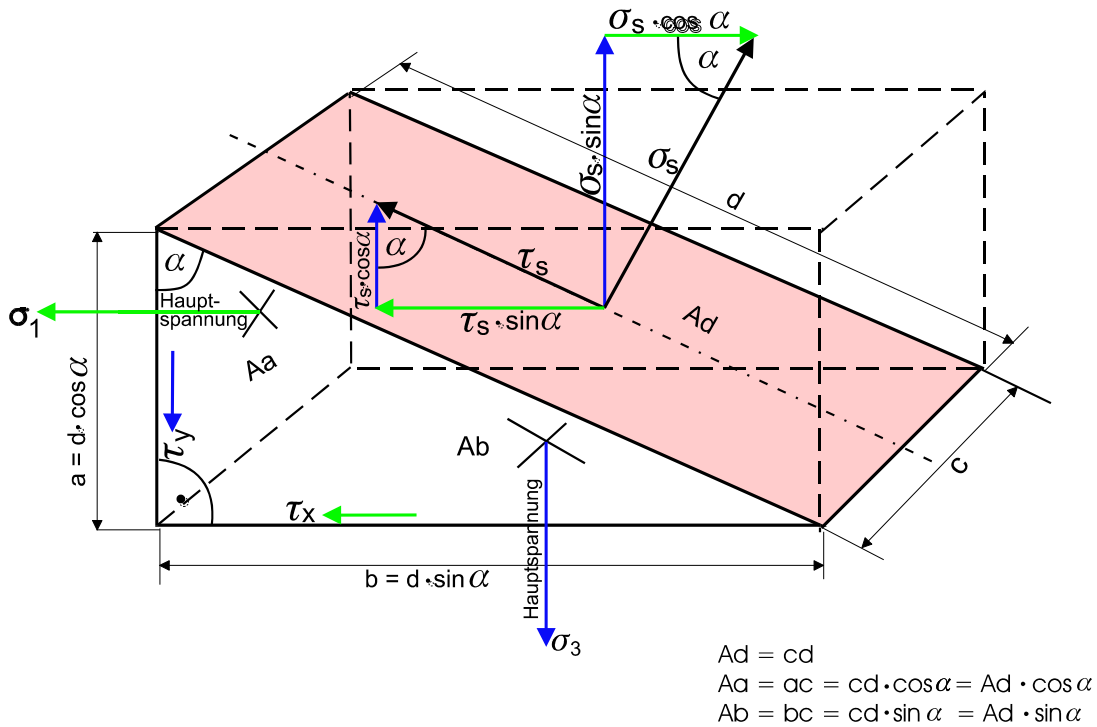


Abb. 103: Kräfte beim Umformen zwischen ebenen Bahnen

Kräftegleichgewicht: $\tau_s = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cdot \sin 2\alpha + \cos 2\alpha \dots \Rightarrow \dots$

Mohrscher Spannungskreis:

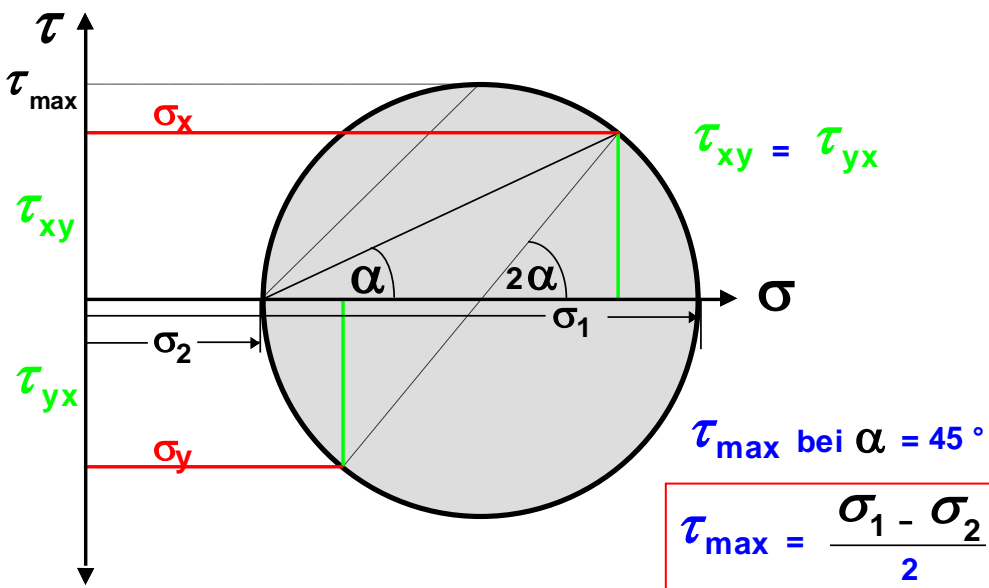


Abb. 104: Zum Mohrschen Spannungskreis

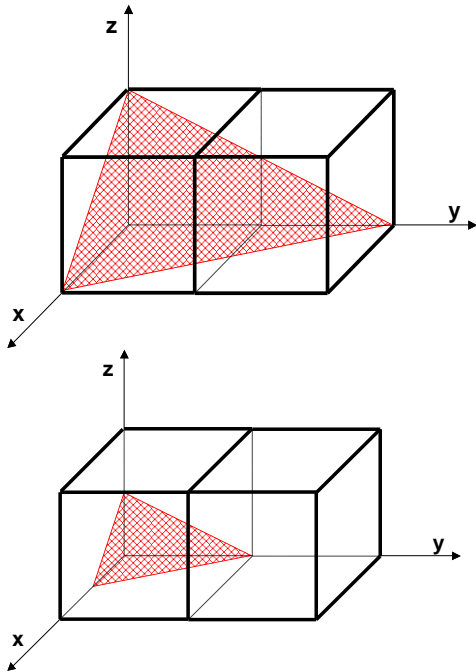
→ Vergleichsspannung

4.6 Miller'sche Indizes

Gleitsysteme und kritische Schubspannung einiger Metalle:

Struktur	Metall	Gleitsystem	τ_{krit} in N/mm ²
kfz	Cu (99,999%)	(111) [110]	0,64
kfz	Ag (99,99%)	(111) [110]	0,47
kfz	Ni (99,8%)	(111) [110]	5,69
krz	α -Fe (99,96%)	(110) [111]	27,47
krz	Mo	(211) [110]	49,05
hdP	Zn (99,999%)	(0001) [2110]	0,18
hdP	Mg (99,96%)	(0001) [2110]	0,76
hdP	Ti (99,99%)	(1010) [2110]	13,73

Gitterebenen:



Gitterrichtungen:

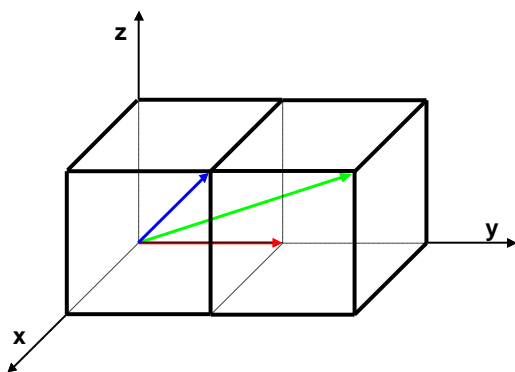


Abb. 105: Ermittlung der Millerschen Indizes von Gitterebenen und Richtungen

Abb. 106: Wichtigste Ebenen in kubischen Kristallen

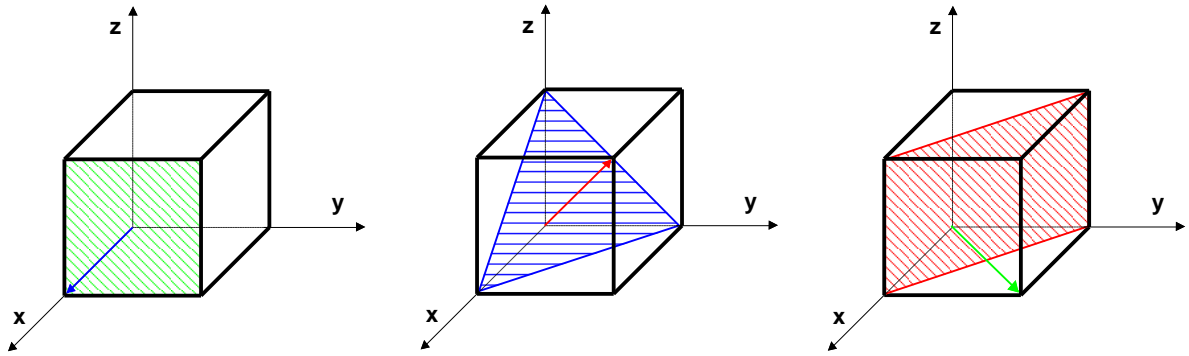
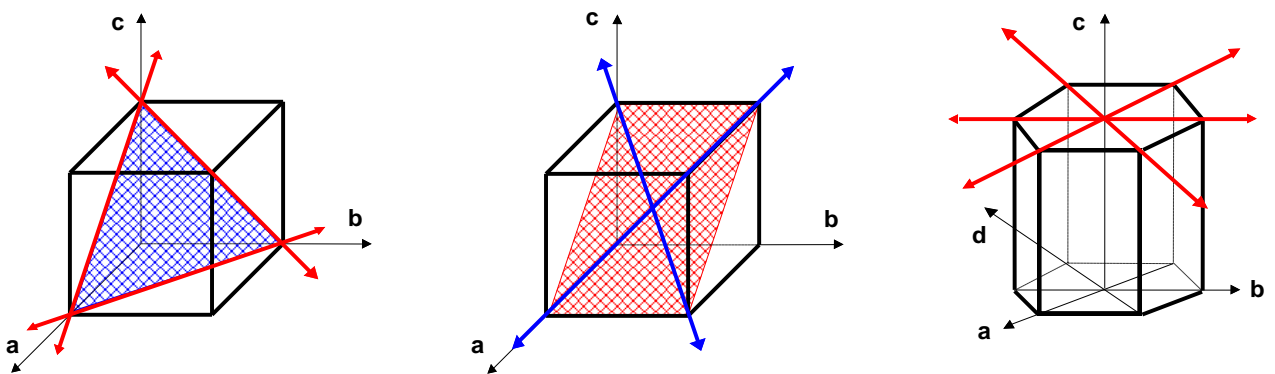


Abb. 107: Gleitsysteme technischer Metalle



Gitterebenen:

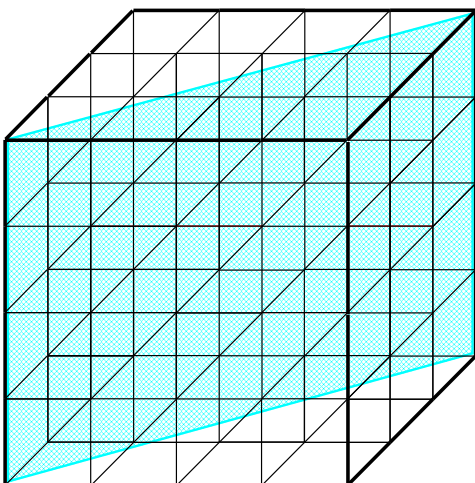


Abb. 108: Übung zu den Millerschen Indizes

4.7 Gitterbaufehler

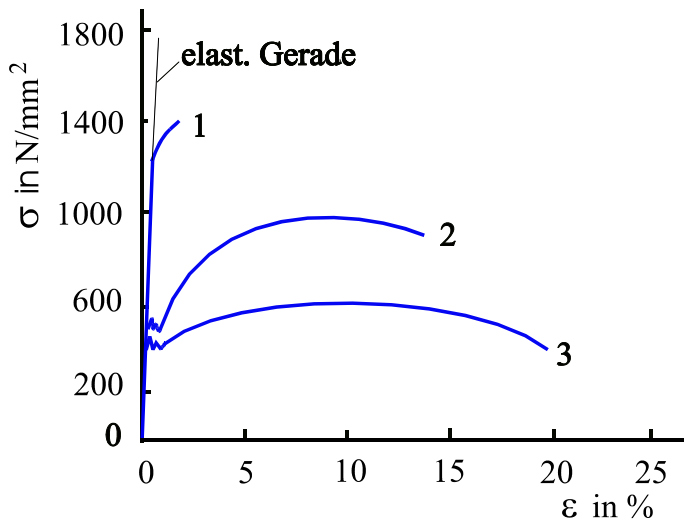


Abb. 109:

σ - ε -Diagramm (s auch Kap. „Mechanische Eigenschaften) von

1:

2:

3:

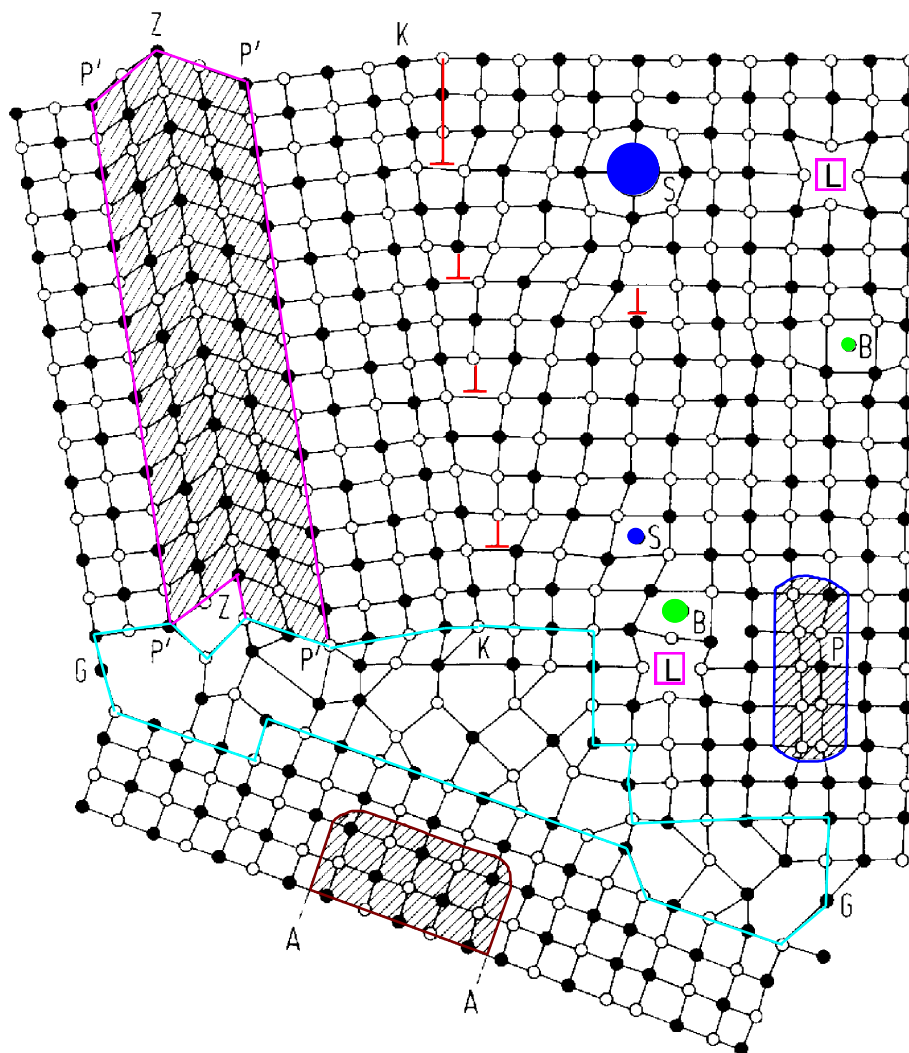


Abb. 110: Gitterfehler: schematische Übersicht

Es bedeuten:

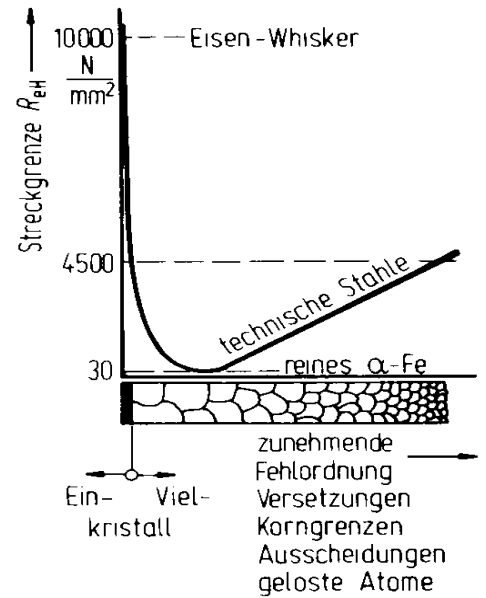


Abb. 111: Gitterfehler und Streckgrenze von Stählen

Zum Thema Gitterfehler empfehle ich den Aufsatz „[Gitterfehler in Metallen](#)“ auf meiner Homepage

Gitterbaufehler (GB)

5. Umformtechnik

5.1 Kenngrößen der Formänderung

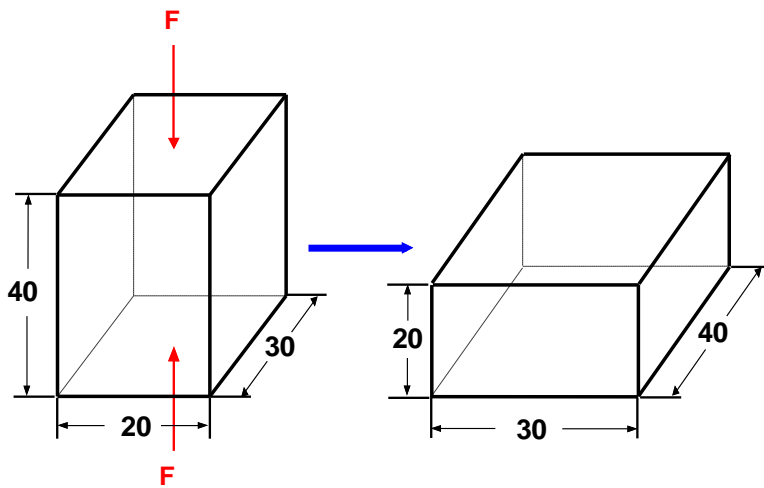


Abb. 112:
Kenngrößen der Formänderung

vor **nach** dem Umformen (schematisch)

$h_0 = 40 \text{ mm}, l_0 = 20 \text{ mm}, b_0 = 30 \text{ mm}$ $h_1 = 20 \text{ mm}, l_1 = 30 \text{ mm}, b_1 = 40 \text{ mm}$

1. $V = \text{const.} (V_1 = V_2)?$

$$\frac{h_1 \cdot l_1 \cdot b_1}{h_0 \cdot l_0 \cdot b_0} = \frac{20 \text{ mm} \cdot 30 \text{ mm} \cdot 40 \text{ mm}}{40 \text{ mm} \cdot 20 \text{ mm} \cdot 30 \text{ mm}} = 1$$

2. absolute Formänderung:

$$\Delta b = \quad = \quad \text{mm}$$

3. bezogene Formänderung:

$$\varepsilon_b = \quad =$$

4. Formänderungsverhältnis:

$$\frac{l_1}{l_0} = \quad =$$

5. logarithmiertes Formänderungsverhältnis 

$$\varphi_h = \dots = |\dots\dots\dots|$$

6. Volumenkonstanz

$$\varphi_h + \varphi_b + \varphi_l = -0,693 + 0,287 + 0,406 = 0$$

→ die Summe der Umformgrade ist 0 !

Jede Umformzone hat 3 Umformgrade. Der Umformgrad der Hauptumformrichtung hat von den genannten Umformgraden den größten Betrag und wird _____ genannt.



Er kann aus der Hauptumformrichtung φ_1 oder aus den Nebenumformrichtungen entsprechend _____ berechnet werden.

Nur der Hauptumformgrad ist bei der Berechnung von Kraft- und Arbeitsbedarf (Fließkurve) zu berücksichtigen.

Warum wird in der Umformtechnik φ gebraucht und nicht ε ?

ε = nominelle Dehnung $\rightarrow \sigma - \varepsilon$ - Diagramm

φ = wahre Dehnung $\rightarrow k_f - \varphi$ - Diagramm (Fließkurve)

Beispiel:

$l_0 = 10\text{mm}, l_1 = 11\text{mm}, l_2 = 12\text{mm}, l_3 = 13\text{mm}$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%$$

$$\varphi = \ln \frac{l_1}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon)$$

$\varepsilon_1 = \frac{1}{10} \cdot 100\% = 10\%$	$\varphi_1 = \ln \frac{11}{10} = 0,0953$
$\varepsilon_2 = \frac{1}{11} \cdot 100\% = 9,09\%$	$\varphi_2 = \ln \frac{12}{11} = 0,0870$
$\varepsilon_3 = \frac{1}{12} \cdot 100\% = 8,33\%$	$\varphi_3 = \ln \frac{13}{12} = 0,0800$
-----	-----
$\Sigma \varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 27,4242 \%$	$\Sigma \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0,262364$
$\varepsilon_{ges} = \frac{3}{10} \cdot 100\% = 30 \% !!!$	$\varphi_{ges} = \ln \frac{13}{10} = 0,262364$

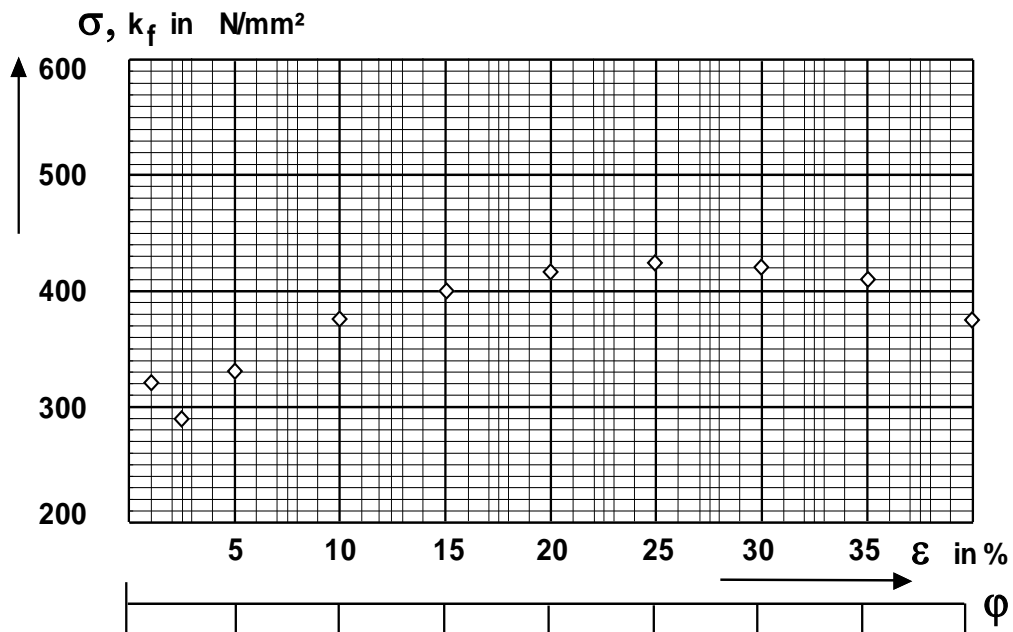
d.h. $\varepsilon_{ges} \neq \sum_1^n \varepsilon_n$

und

$$\varphi_{ges} = \sum_1^n \varphi_n$$

\Rightarrow Wenn man φ verwendet, können die Beträge mehrerer aufeinander folgender Umformschritte addiert werden !

5.2 σ - ϵ - Diagramm und Fließkurve ($T < T_R$)



ϵ %	σ N/mm ²	k_f N/mm ²
2,5		
5		
10		
15		
20		
25		
30		

ϵ %	φ 1
2,5	
5	
10	
15	
20	
25	
30	

$K_f =$

$\varphi =$

Abb. 113: Ermittlung einer Fließkurve aus einer Spannungs-Dehnungs-Kurve

5.3 Linearisierung der Fließkurve nach Reihle/Ludwik für $T < T_R$:

5.3.1 Übung zur Linearisierung der Fließkurve nach Reihle/Ludwik:

$$k_f = c \cdot \varphi^n$$

$$n = \tan \alpha = \frac{\Delta \log k_f}{\Delta \log \varphi} = 0,$$

$$\varphi = 1 \rightarrow c = \quad \Rightarrow \quad k_f =$$

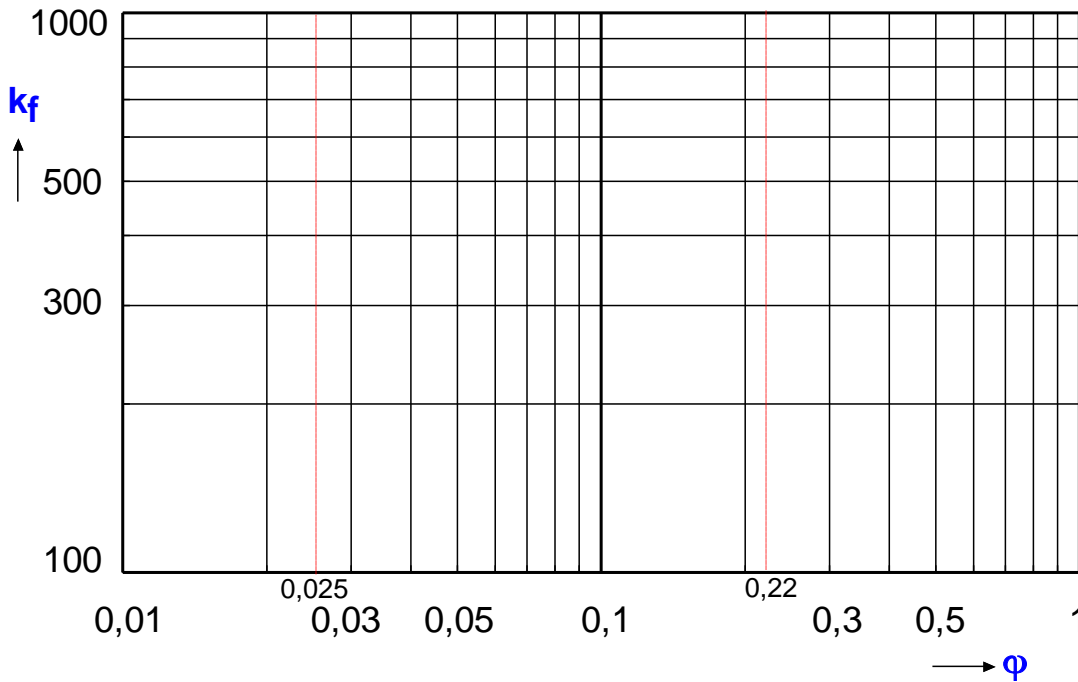


Abb. 114: Fließkurve nach Reihle (Ermittlung von c und n)

Umformtechnische Kennwerte einiger Metalle (Formel von Reihle)

Nr.	Werkstoff	Werkstoff-Nr.	K_f ($\varphi = 0$) N/mm ²	K_f ($\varphi = 0,1$) N/mm ²	K_f ($\varphi = 1,0$) N/mm ²	$K_f = c \cdot \varphi^n$ N/mm ²
1	Al 99,5	3.0255	20...60	60...90	120...140	$135 \cdot \varphi^{0,2553}$
2	AlMn	3.0515	40...90	120...160	180...230	$205 \cdot \varphi^{0,1656}$
3	AlMg5	3.3555	110...180	270...300	420...520	$470 \cdot \varphi^{0,2173}$
4	AlMgSi0,5	3.3206	65...145	150...180	200...250	$225 \cdot \varphi^{0,1347}$
5	CuZn15	2.0240	132	290	590	$590 \cdot \varphi^{0,2951}$
6	CuZn28	2.0261	145	300	720	$720 \cdot \varphi^{0,3689}$
7	UQSt 36-2	1.0204	170...200	300...370	580...660	$620 \cdot \varphi^{0,2687}$
8	QSt 32-2	1.0303	220	330...420	620...730	$675 \cdot \varphi^{0,2570}$
9	Ck 10	1.1121	220...225	330...450	640...740	
10	Cq 35	1.1172	370	540	848	$848 \cdot \varphi^{0,1817}$
11	15 Cr 3	1.7015	230...280	480...600	680...790	$735 \cdot \varphi^{0,1354}$

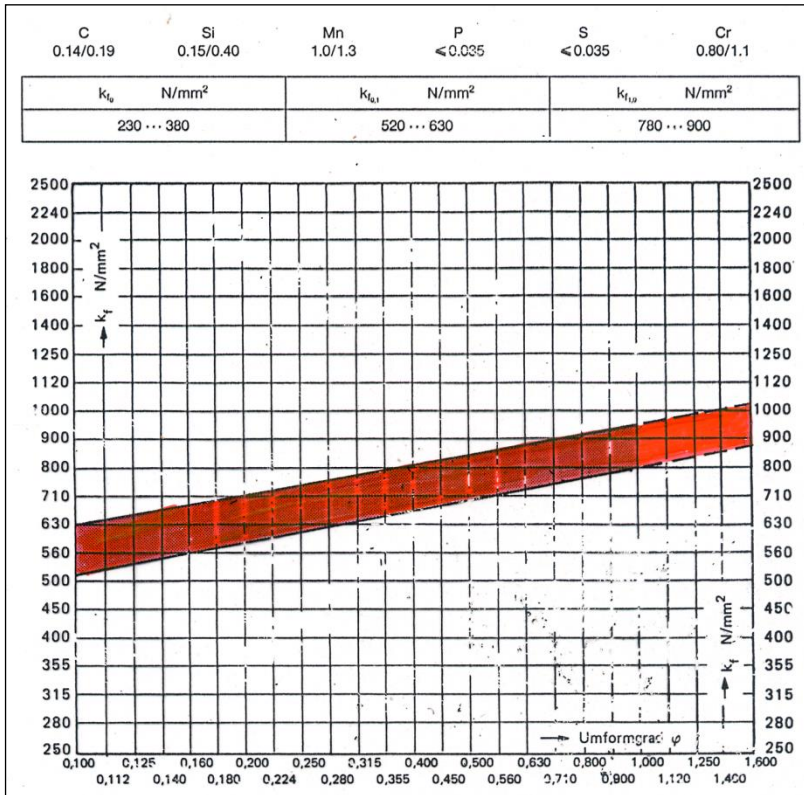


Abb. 115:

Linearisierte Fließkurve für
16 MnCr 5 mit Streubereich
(DIN 1627 / 17210)

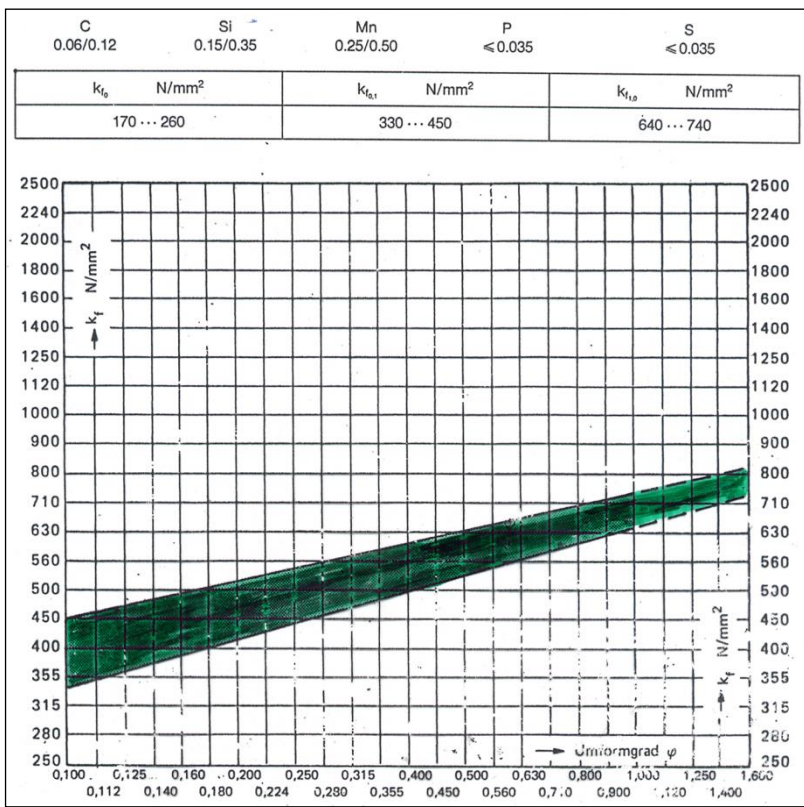


Abb. 116:

Linearisierte Fließkurve für
Ck 10 mit Streubereich
(DIN 1627 / 17210)

Ursachen für den Streubereich:

-
-
-

5.4 Umformverfahren bei verschiedenen Temperaturen

(Charakterisierung, Vor- u. Nachteile)

Kaltumformung:

(Lauwarmumformen):

Halbwarmumformen:

Warmumformung

Superplastizität:

Thixoforming:

5.4.1 Lauwarmumformung

Bisher (2010) fand eine Einteilung der Massivumformverfahren in Bezug auf die Rohteiltemperatur vor der ersten Umformstufe in Kalt-, Halbwarm- und Warmumformung statt. Der Temperaturbereich zwischen Kalt- und Halbwarmumformung wird neuerdings auch als „Lauwarmumformung“ bezeichnet und rückt sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus industrieller Sicht in den Fokus des Interesses.

Verfahren der Kaltmassivumformung von Stahl ermöglichen, meistens in Grenzen eines gewissen Teile- und Werkstoffspektrums, eine net-shape-Fertigung – die Herstellung von Bauteilen mit einbaufertigen Funktionsflächen – oder zumindest eine near-net-shape-Fertigung mit nur geringem Aufwand an spanender Nacharbeit. Grenzen des Kaltfließpressens bestehen bei der Fertigung von immer komplexer werdenden Bauteilen mit höchsten Qualitätsanforderungen. Das Umformvermögen mancher Werkstoffe reicht für die Herstellung solcher Bauteile durch Kaltumformung nicht aus oder die Werkzeugbelastungen werden so hoch, dass geringe Werkzeugstandzeiten solche Verfahren aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht sinnvoll erscheinen lassen.

Auf der Suche nach Lösungen zur wirtschaftlichen Herstellung von Massivumformteilen mit hohen Qualitätsanforderungen wird neuerdings verstärkt auch der Ansatz verfolgt, im Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und industriell angewandter Halbwarmumformung fließzupressen. Von besonderem Interesse sind für Stahlwerkstoffe Temperaturen unter und oberhalb des so wohl werkstoff- als auch temperatur- und umformgeschwindigkeitsabhängigen Blausprödigkeitsbereichs. Bei diesen Temperaturen umgeformte Werkstoffe zeichnen sich, verglichen mit der Kaltumformung, durch ein höheres Duktilitätsvermögen und niedrigere Fließspannungen aus (Bild 1). Die Industrie erhofft sich durch die Umformung bei diesen Temperaturen die Herstellbarkeit von Werkstücken mit annähernd gleichbleibender Genauigkeit und Oberflächenqualität wie bei der Kaltumformung, jedoch bei erweiterten Möglichkeiten der Formgebung durch Erhöhung des Umformvermögens und bei höheren Werkzeugstandzeiten durch niedrigere Prozesskräfte.

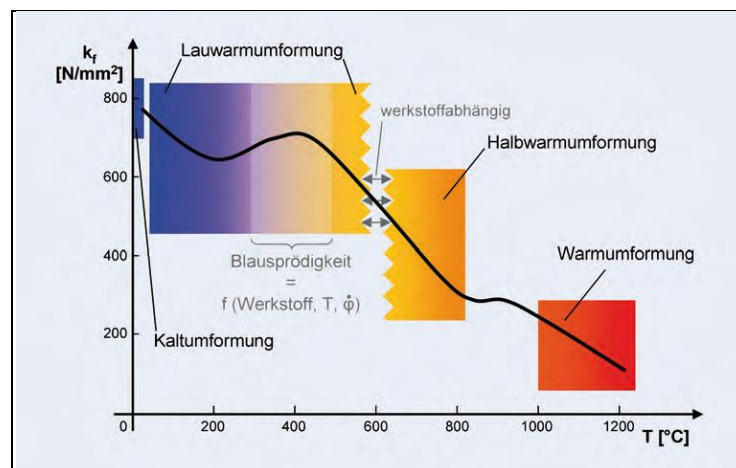


Abb. 117: $K_f = f(T)$ für ferritische Stähle sowie T-Bereiche der Umformverfahren

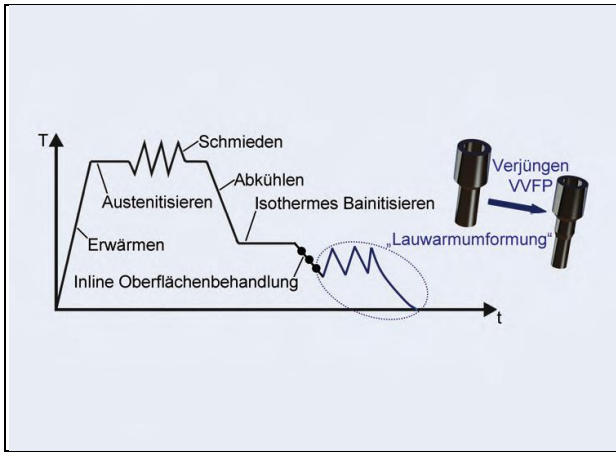


Abb. 118: Ressourceneffiziente Prozesskette zur Herstellung von Hochleistungsbauteilen



Abb. 119: Kugelnabe und Trisphär, hergestellt in geschlossenen Werkzeugen als Beispiele für lau warm umgeformte Bauteile

Zum Thema s. auch „[Lauwarmumformung.pdf](#)“

Blausprödigkeit:

Blausprödigkeit bezeichnet das Verhalten gehärteter Stähle, bei Anlasstemperaturen zwischen 200 und 350°C an Zähigkeit zu verlieren. Bei Verformung der Stähle in diesem Temperaturbereich besteht die Gefahr des sogenannten Blaubruchs, da sich die Bruchfläche blau färbt (Anlassfarbe).

Ursache hierfür ist

- A) die Ausscheidung von Zementit (Fe_3C) aus dem Martensit (Stahllexikon)
- B) Ausscheidung von C und N auf den Korngrenzen (Wikipedia)
- C) Wanderung von N an die Versetzungen (s. Praktikum „Kerbschlagbiege...“)

Durch Zugabe von Si kann die Blausprödigkeit zu höheren Anlasstemperaturen verschoben werden.

5.4.2 Halbwarmumformung

Unter der Bezeichnung "Halbwarmumformung" versteht man in der Theorie einen Umformvorgang, vor dem das Werkstück soweit angewärmt wird, dass die Fließspannung insgesamt deutlich abgesenkt wird, aber immer noch eine bleibende Verfestigung eintritt. Diese Definition bedeutet, dass die Umformung unterhalb der Rekristallisationstemperatur durchgeführt wird. In der Praxis wird der Begriff "halbwarm" auch für Temperaturen angewendet, die über dieser liegen und bezeichnet damit Umformen (von Stahl) im Temperaturbereich von 600 bis etwa 900°C. Die Untergrenze ist dabei durch die Blausprödigkeit gegeben, während die Obergrenze durch eine verstärkte Zunderbildung gesetzt ist.

Erst in den 70-er Jahren wurde die Halbwarmumformung in industrielle Anwendungen eingeführt. Mittlerweile hat sich für die Halbwarmumformung ein bestimmtes Produktspektrum herauskristallisiert. Das Ziel der Halbwarmumformung ist, die Vorteile des Kaltfließpressens mit denen der Warmmassivumformung zu verbinden. Durch die erweiterten Formgebungsmöglichkeiten gegenüber der Kaltmassivumformung einerseits sowie durch die höheren Genauigkeiten gegenüber den Warmumformverfahren andererseits lässt sich das Teilespektrum der Halbwarmumformung wie folgt definieren: Vorwiegend rotations-symmetrische Bauteile, ähnlich den Kaltfließpressteilen, aber aus höher legierten Werkstoffen, die nicht oder nur eingeschränkt kaltumformbar sind. Daneben können aber auch Bau-teile, die bisher durch Kaltfließpressen hergestellt wurden und die Zwischenglühoperationen benötigten, bei einer gewissen Toleranzaufweitung durch Halbwarmumformung rationeller hergestellt werden.

Da die Fließspannung im erwähnten Temperaturbereich immer noch etwa zwei bis dreimal so hoch ist wie bei üblichen Warmumformtemperaturen, ist die Werkzeugbeanspruchung ebenfalls entsprechend höher. Das bedeutet, dass die Werkzeugtechnik sich ebenfalls an der der Kaltumformung orientieren muss: Die Werkzeuge müssen vorgespannt sein und an Hohlkehlen und bruchgefährdeten Stellen geteilt werden. Auch hieraus ergibt sich, dass das Formenspektrum dem des Kaltfließpressens ähnlicher ist als dem der Warmmassivumformung.

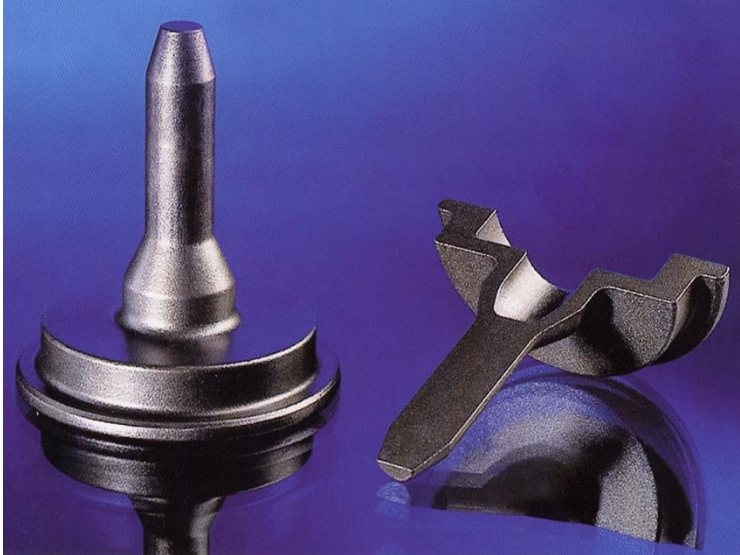


Abb. 120: Durch Halbwarmumformung hergestellte Mittenwelle

Aus „Kaltmassivumformung, Präzision in großen Serien“ von der Infostelle „Industrieverband Massivumformung“

Verfahrenskombination: Halbwarm - / Kaltmassivumformung

Wie aus den vorstehenden Abschnitten ersichtlich, hat jedes der verschiedenen Umformverfahren spezifische Eigenschaften. Da die Präzisionsumformung von Stahl eine immer größere Bedeutung erlangt, insbesondere für den Automobilssektor, ist die Weiterentwicklung der Herstellungsverfahren Kalt- und Halbwarmumformung sowie deren Kombinationen von größter Bedeutung. Insbesondere die Kombination verschiedener Umformverfahren zur Nutzung der jeweiligen Technologiepotenziale, wie z. B. das hohe Umformvermögen bei der Halbwarmumformung und die hohe Genauigkeit der Kaltmassivumformung, hat sich in jüngster Vergangenheit stark entwickelt.

Durch eine Kombination vom Halbwarm- mit dem Kaltmassivumformen lassen sich immer dann wirtschaftlich Werkstücke herstellen, wenn zum Einen bestimmte Maße mit einer hohen Genauigkeit hergestellt werden müssen, zum Andern aber die Umformung so groß ist, dass beim Kaltpressen mindestens einmal eine Zwischenglühoperation eingeschaltet werden muss. Die Prozessfolge entspricht im Wesentlichen einer Aneinanderreihung der Prozessschritte. Nach der Halbwarmumformung müssen die Werkstücke lediglich gestrahlt und erneut beschichtet werden.

Die im Bild 2 abgebildeten Tripodenwellen für Gleichlauf-Schiebegelenke sind aus dem Werkstoff Cf 53, der nur begrenzt kalt umformbar ist, gefertigt. Nach einer Halbwarmumformung werden die Rohlinge beschichtet und kalt abgestreckt. So lassen sich Rollenlaufbahnbreiten in der Innenkontur herstellen, die eine Toleranz von $\pm 0,03$ mm aufweisen, so dass innen keine spanende Nacharbeit mehr nötig ist. Nach dem Induktionshärten müssen diese hoch präzisen Bauteile eine Laufbahntoleranz von $\pm 0,05$ mm aufweisen. Eventuelle Härteverzüge werden bereits vorgehalten.

Auch das in Bild 14 dargestellte Gelenkwelle wird aus dem induktivhärtenden Stahl Cf 53 hergestellt. Gleichzeitig werden aber sehr hohe Anforderungen an die Maß- und Formtoleranzen gestellt, um die sehr aufwändige spanende Endbearbeitung in den Laufbahnen zu beschränken. Da diese Toleranzen durch eine Warmmassivumformung nicht erreichbar sind und der Umformgrad für eine reine Kaltmassivumformung viel zu groß ist, werden diese Bauteile durch eine Kombination von Halbwarmfließpressen und anschließendem Kaltkalibrieren hergestellt. Während der Halbwarmoperationen wird der Zapfen mit einer Durchmesser-toleranz von 0,3 mm in mehreren Stufen bei ca. 850°C umgeformt. Die Durchmesser der kaltgepressten Kugellaufbahnen auf der Innenseite der Gelenkwellen erreichen eine Genauigkeit von $\pm 0,1$ mm. Nach dem Härten müssen die Kugellaufbahnen nur noch auf Fertigmaß bearbeitet werden.

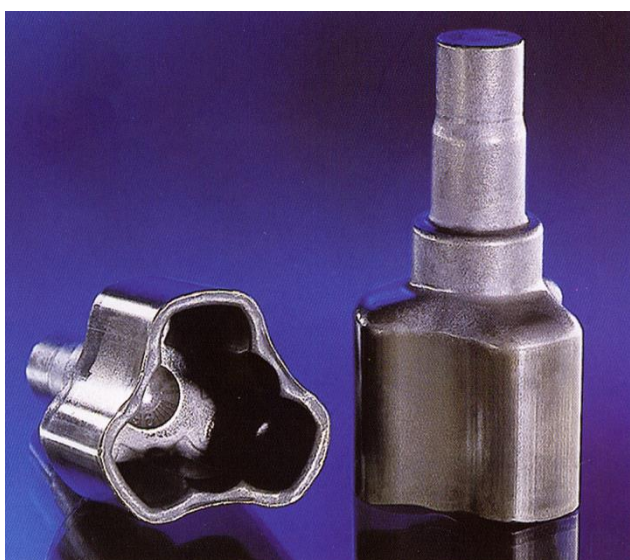


Abb. 121: Durch die Kombination aus Halbwarm- und Kaltmassivumformung hergestellte Tripodenwelle

Aus „[Kaltmassivumformung, Präzision in großen Serien](#)“ von der Infostelle „Industrieverband Massivumformung“, s. auch Halbwarmumformung bietet für bestimmte Werkstoffe Vorteile von Kalt- und Warmumformung, z.B.

Vergleich Warm-, Halbwarm- und Kaltumformung (*VDW-Studie von 1991)

$\Rightarrow k_f \approx k_f/2$ und $\Rightarrow \varphi \approx 2\varphi$ gegenüber Kaltumformung

Werkstoffe: Cf 45, Cf 53, Cf 60 nur HW
 34 Cr 4, 41 Cr 4 u.a. HW
 25 CrMo 4, 34 CrMo 4, 42 CrMo 4 u.a. HW

Umform-T: ca.: 600 - 900 °C

Umformung	Warm	Halbwarm	Kalt
Werkstückgewichte	0,05 - 1500 kg	0,001 - 50 kg	0,01 - 30 kg
Genauigkeit	IT 13 - 16	IT 11 - 14	IT 8 - 11
Oberflächengüte	> 50 - 100 μm	> 30 μm	> 10 μm
Fließspannung (k_f)	$\approx 20 - 30 \%$	$\approx 30 - 50 \%$	100 %
Umformvermögen	$\varphi \leq 6$	$\varphi \leq 4$	$\varphi \leq 1,6$
Umformkosten*	bis 113 %	100 %	bis 147 %
Spanende Nacharbeit	hoch	gering	sehr gering

Ergänzendes zu den Themen „Halbwarmumformen“ und „Vergleich von Kalt- und Halbwarmmassivumformung“ finden Sie auf meiner Homepage unter: „[Halbwarmumformung](#)“ und „[Kaltmassivumformung](#)“.

5.4.3 Superplastizität (S.)

Unter **S.** ist das Auftreten einer außergewöhnlich starken plastischen Verformung ohne Einschnürung oder Bruch zu verstehen. Während die metallischen Werkstoffe im Zugversuch normalerweise bei Dehnungen von weit weniger als 100 % zu Bruch gehen, liegen beim superplastischen Verhalten Dehnungen von mehreren hundert oder sogar tausend Prozent vor, s. Graphik. (Au: A_5 ca. 60 %).

Vorteile:

- großer Umformgrad
- Erhöhung
- Reduzierung

Nachteile: → s. Voraussetzungen



Abb. 122:
Dehnbarkeit eines superplastischen Stahls

Voraussetzungen:

-
-
-

Sie wurde sowohl bei einphasigen als auch bei mehrphasigen Werkstoffen beobachtet, wobei im letztgenannten Fall die Phasen etwa in gleicher Menge vorliegen müssen. Daher bauen viele superplastische Legierungen auf eutektischen oder eutektoiden Systemen aus zwei Komponenten mit annähernd gleicher Schmelztemperatur auf.

Mechanismes:

Die atomistischen Mechanismen der **S.** sind noch nicht völlig geklärt. In Frage kommen drei Möglichkeiten, die aber wahrscheinlich miteinander kombiniert werden müssen:

-
-
-

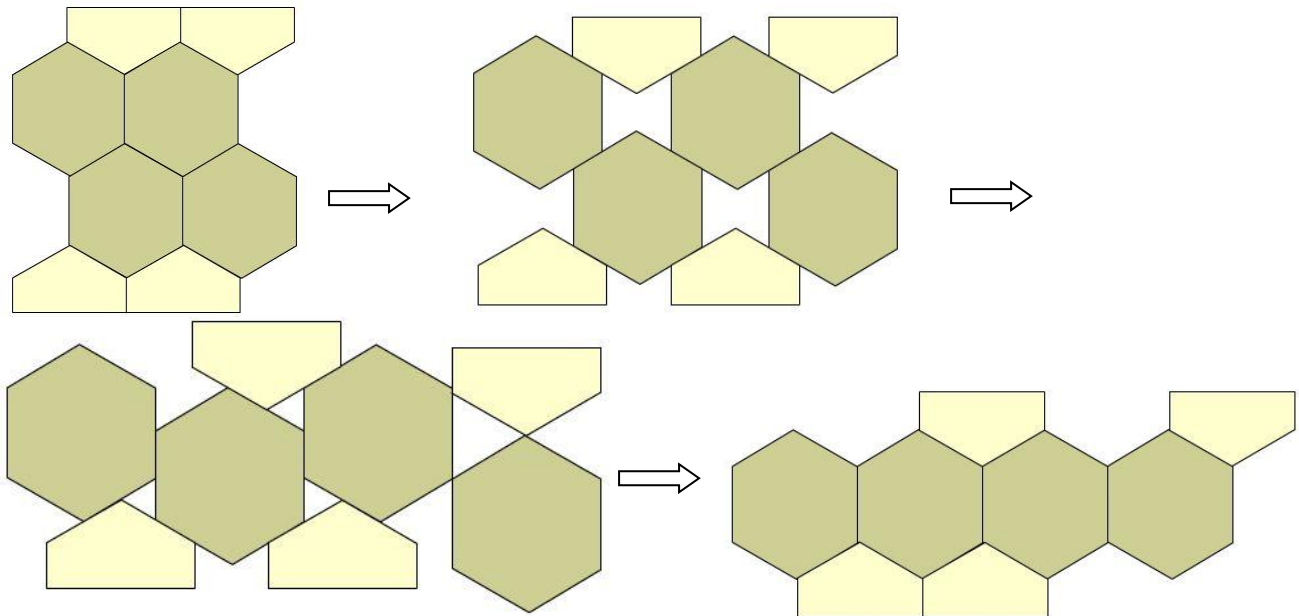


Abb. 123: Prinzip der Korngrößenwanderung (Korngrößenengleiten)

Die ständig wachsende Zahl superplastischer Legierungen läßt vermuten, daß **S.** ein allgemeiner Werkstoffzustand ist, in den sich alle Legierungen durch eine geeignete Kombination von Gefügestand und Verformungsbedingungen bringen lassen. Heute (2009) werden auch Mg- und Ti- Werkstoffe superplastisch verarbeitet

Es hat sich bisher insbesondere eine Al-Zn-Legierung bewährt, die zu je etwa 50% aus kfz und hdP Mischkristallen in feinkristalliner Form (Mikroduplexgefüge) besteht; aber auch feinkristalline $\alpha + \beta$ -Messing-, $\alpha + \beta$ -Titan und $\alpha + \gamma$ -Eisenlegierungen sind superplastisch verformbar.

Auch die Fähigkeit keramischer Stoffe, sich bei niedrigen Druckspannungen unter gleichzeitiger Phasenumwandlung plastisch verformen zu lassen, wird zu den Erscheinungen der **S.** gezählt.

In der Regel ist das Kriechen der Werkstoffe ein schädlicher Vorgang, der über längere Zeiträume zu Formänderung oder Rissbildung und folglich Versagen eines Bauteiles führen kann.

Absichtlich herbeigeführt wird eine zeitabhängige Verformung beim Warmumformen, speziell beim **superplastischen** Umformen. Man strebt dabei ein mechanisches Verhalten entsprechend den viskos fließenden Flüssigkeiten an. Der Werkstoff soll ohne einzuschnüren sehr hohe Verformungsgrade erlauben und durch Fertigungsverfahren, die dem Glasblasen ähnlich sind, verarbeitbar sein. Es hat sich bisher insbesondere eine Al-Zn-Legierung bewährt, die zu je etwa 50% aus kfz und hdP Mischkristallen in feinkristalliner Form (Mikroduplexgefüge) besteht; aber auch feinkristalline $\alpha + \beta$ -Messing-, $\alpha + \beta$ -Titan- und $\alpha + \gamma$ -Eisenlegierungen sind superplastisch verformbar. Im makroskopischen Verformungsverhalten dient zur Kennzeichnung der Eignung einer Legierung für diesen Prozeß der Dehnungsraten-Empfindlichkeit-Exponent m :

$$m = \frac{d \ln \sigma}{d \ln \dot{\varphi}}$$

der $m = 1$ für quasi viskoses Fließen erreicht und für superplastische Legierungen $m > 0,6$ betragen sollte.



Abb. 124:
Beispiel für superplastische Umformung von Ti:
Zahnriemenscheibe aus TiAl6V4

Superplastizität : Metalle so dehnbar wie Gummi

(passender Artikel aus vdi-nachrichten, 2006 → S. bei **Stahl**)

Gummibänder lassen sich weit in die Länge ziehen, ohne zu zerreißen. Das weiß jedes Kind. Dass auch Stähle so dehnbar sind, dürfte verblüffen. So ist es den Werkstoffkundlern am Max-Planck-Institut für Eisenforschung in den vergangenen Jahren gelungen, Stähle herzustellen, die sich bis zu 1000 (!) Prozent dehnen lassen, ohne zu brechen. Anders als beim Gummiband ist diese Verformung freilich bleibend - plastisch, wie Experten sagen. Diese so genannte Superplastizität ist auf sehr feine und gleichmäßige Körnchen, so genannte Kristallite, im Stahl zurückzuführen. Mikroskopische Analysen der Stähle ergaben, dass sich unter bestimmten Temperaturen und Umformbedingungen gleichmäßig rundliche Kristallite in Mikrometergröße bilden. Dehnt man den Stahl, gleiten und rotieren die Kristallite leicht aneinander vorbei. Wären sie lang gestreckt, würden sie sich eher blockieren.

Auch hier spielen wieder verschiedene Gefügebestandteile im Stahl eine Rolle - etwa Austenite oder Karbide - besonders feste Metall-Kohlenstoffverbindungen. Denn die Gleitbewegung spielt sich vor allem an den Grenzen dieser Gefüge ab. Bislang ist die Düsseldorfer Arbeitsgruppe weltweit die einzige, die in der Lage ist, besonders feste superplastisch dehnbare Stähle für den Leichtbau zu erzeugen. Denn das typische Kristallgefüge stellt sich nur bei ganz bestimmten Herstellungsprozessen und Legierungen (Metallmischungen) ein. So werden die superplastischen Stähle beispielsweise bei nur etwa 700 bis 800 Grad Celsius verarbeitet und zu Bauteilen geformt; für gewöhnlich schmiedet man bei etwa 1050 bis 1150 Grad Celsius. Darüber hinaus wird der superplastische Stahl etwas langsamer in seine Endform gepresst beziehungsweise geschmiedet. Nur so kommen die superplastischen Verformungsmechanismen voll zum Tragen. Superplastische Stähle lassen sich beispielsweise zu Getriebeteilen wie Ritzeln schmieden. Ihr Vorteil: Da sie sich so stark dehnen, können sie leichter in Form gebracht werden. Die Umformwerkzeuge verschleißten dadurch weniger schnell. Das gleiche gilt für die Nachbearbeitung an Dreh- oder Fräsmaschinen. Ein weiterer Vorzug: Dank der niedrigen Bearbeitungstemperatur lässt sich Energie sparen. Bislang nutzen Hersteller die superplastischen Stähle vor allem für den Bau von Maschinen. Inzwischen zeigen aber auch die Automobilkonzerne Interesse an dem reißfesten Hightech-Material.

Weiteres Beispiel: Al-Werkstoff:

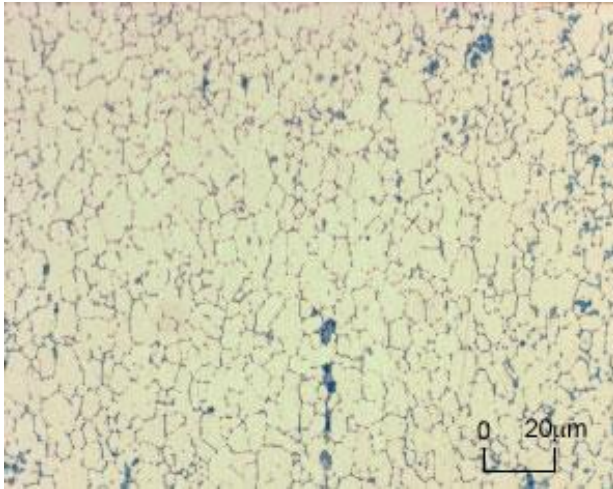


Abb. 125:

Mikrogefüge mit feiner Körnung.

Werkstoff: EN AW-5083

Lösungsglühen für 15 Minuten bei einer Temperatur von 525°C mit anschließendem Wasserabschrecken und Aushärten für 24 Stunden bei 150°C wurde als bevorzugte Behandlung für die Metallographie verwendet. Die Probe wurde mechanisch poliert und mit Graf-Sergeant-Reagenz geätzt (15,5 cm³ HNO₃, 0,5 cm³ HF, 3g Cr₂O₃ und 84 cm³ Wasser).

Um die feine Korngröße bei der superplastischen Umformtemperatur für die Dauer der superplastischen Umformung zu erhalten, muss eine zweite Phase an den Korngrenzen vorhanden sein. Aus diesem Grunde basieren viele superplastische Werkstoffe auf Eutektoiden (z. B. Fe-C), Eutektika (z. B. Al-Cu), oder Monotektoiden (z. B. Zn-Al).

Diese Werkstoffe können thermomechanisch bearbeitet werden, um feine zweiphasigen Gefügen herzustellen.

Viele Aluminiumlegierungen werden durch den Zusatz einer kleinen Menge Zirkon superplastisch. Es entsteht eine sehr feine Verteilung von ZrAl₃, die das Kornwachstum während der Rekristallisation einer stark verformten Matrix verhindert.

Die Festigkeit der Zweitphase sollte in der Regel die gleiche Größenordnung wie die der Matrix aufweisen. Ist die Zweitphase deutlich härter als die Matrix, kann Hohlrumbildung an der Partikel/Matrix-Grenzfläche stattfinden. In Anwesenheit einer Verteilung von feinen aber harten Partikeln kann Hohlrumbildung in der Nähe der Partikel während des superplastischen Fließens durch diverse Erholungsmechanismen verhindert werden.

Weiterführendes:

aus Internet → „Nema“ oder bei

Vollertsen, F. und S. Vogler: Werkstoffeigenschaften und Mikrostruktur. München-Wien 1989 oder bei Hornbogen: „Werkstoffe“

Thixotropie ist die Eigenschaft von Fluiden, unter der Wirkung einer Scherbeanspruchung eine zeitabhängige (geringere) Viskosität aufzuweisen.

5.4.4 Thixo-Schmieden (als Sonderfall der Warmumformung)

ist Schmieden

Vorteil des Verfahrens:

Grundlage

der Thixoforming-Verfahren sind die Viskositätseigenschaften bestimmter Legierungen im Temperaturbereich zwischen Solidus- und Liquidustemperatur. Die werkstoffseitigen Voraussetzungen gehen aus der folgenden Abb.1 hervor.

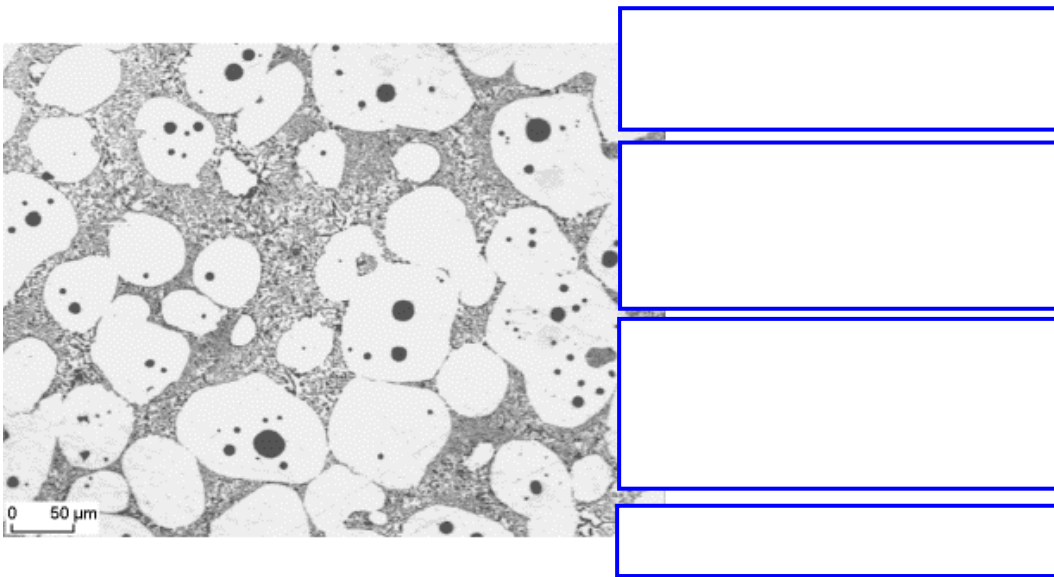


Abb. 126:
Idealer Werkstoff für das Thixoforming

Es lassen sich nur solche Werkstoffe verarbeiten, die nach der Wiedererwärmung aus einem feinkörnigen, globularen Festphasenskelett, eingebettet in eine schmelzflüssige Matrix bestehen, s. Abb. 119. Der Anteil der flüssigen Phase soll % betragen.

Anhand des ZSD-Diagramms der entsprechenden Legierung können hierzu erste Aussagen getroffen werden, s. Abb. 120:

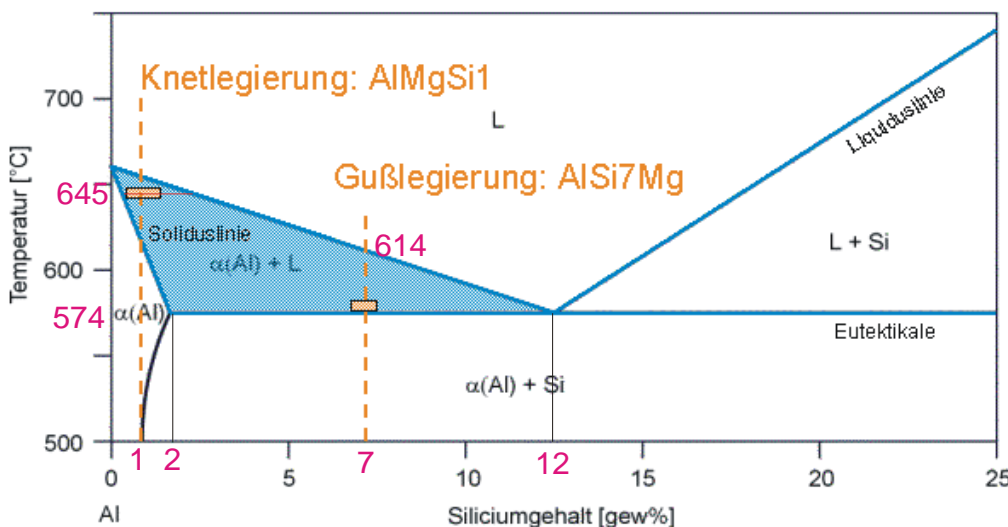


Abb. 127:
Zustandsdiagramm Al-Si

Beispiele:

Über die Beziehung der Hebelarme lassen sich für den Gleichgewichtszustand die Phasenanteile bei bestimmten Temperaturen bestimmen. Die Legierung AlSi7Mg (A356 / A375) verfügt über einen Anteil von ca. % eutektischer Phase. Diese schmilzt bei einer festen Temperatur von ca. 574°C. Die dann noch festen primären Aluminiummischkristalle schmelzen dann im Temperaturbereich von 574-614°C.

Die Legierung AlMgSi1 (AA 6082) hingegen besitzt keine eutektischen Phasenanteile. Der Werkstoff besteht bei Raumtemperatur vollständig aus Alpha-Mischkristallen.

Um den geeigneten Werkstoffzustand zu erreichen, ist oft (vor allem bei Al-Legierungen) eine spezielle Behandlung des Vormaterials notwendig, z.B.:

- elektromagnetisch Rühren beim Strangguss (MHD = Magnetohydrodyn.)
- chemische Kornfeinung
- Thermomechanische Behandlung (ZTU)
- mechanisches Rühren beim Strangguss
- Einleitung von Ultraschallschwingungen
- Pulvermetallurgie (PM)mechanisches Rühren beim Strangguss

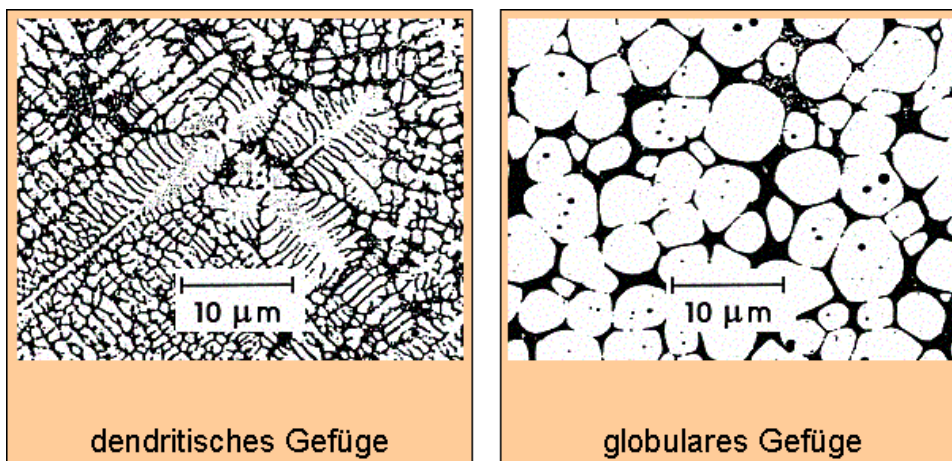


Abb. 127a), b):
Gefügevergleich

128a) konventionell erstarrter
Werkstoff

(dendritisch =)

127b) elektromagnetisch gerührt
Strangguss erstarrt

(globular =)

Weiterhin ist das Aufheizen vor dem Umformvorgang von entscheidender Bedeutung. Einen typischen Verlauf der WB vor dem Thixoschmieden zeigt die nächste Abb. Die Erwärmung wird meist induktiv durchgeführt.

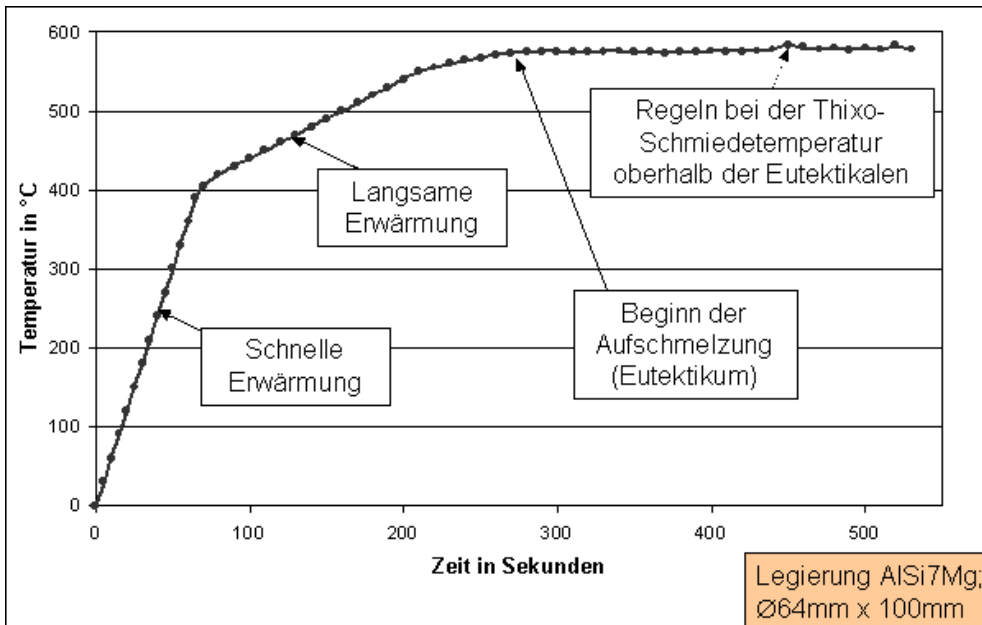


Abb. 129:
WB vor dem Thixoschmieden

Geeignete Werkstoffe bestehen am Ende der Erwärmung aus einem Festphasenskelett, eingebettet in eine schmelzflüssige Matrix, s. Abb. 69 + 122b. Das bedeutet, dass die noch festen globular eingeförmten Kristalle mit benachbarten Kristallen an kleinen Stellen verbunden sind (Contiguität). Dadurch besitzt das erwärmte Rohteil eine noch ausreichende Formstabilität um die Form zu behalten. Dies verhindert durch den, im Vergleich mit vollständig flüssigen Metallen, deutlich geringeren Wärmeübergangskoeffizient zum Behälter bzw. zur Auflage und zum Werkzeug das vorzeitige Erstarren des Rohteils. Wird das Rohteil umgeförm, d.h. kommt es zu einer Scherbeanspruchung, so brechen diese Verbindungen zwischen den festen Gefügebestandteilen auf, so dass die Fließspannung bzw. die Viskosität stark abnehmen. Es kommt zu einer Fließbewegung einzelner oder auch mehrerer noch zusammenhängender Körner in der schmelzflüssigen Matrix. Dies ermöglicht die Realisierung großer Formänderungen und die Herstellung geometrisch komplexer Werkstücke.

Es sind Al-, Cu- und Fe-Legierungen durch Thixoschmieden verarbeitbar! Einige Beispiele zeigen die nachfolgenden Gefügebilder.

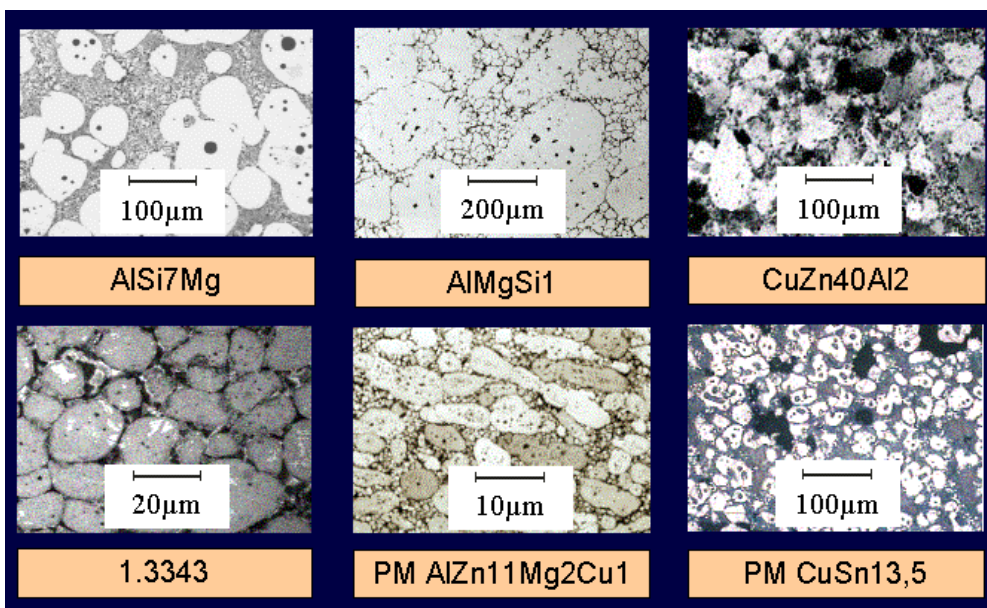


Abb. 130:
1.3343 = S 6-5-2
(WoMoVCo)

Das Verfahren des Thixo-Schmiedens lässt sich in vier Teilschritte unterteilen:

1. Vormaterial-Herstellung → s.o.
2. Wiedererwärmung → s.o.
3. Umformung → s.u.
4. Wärmebehandlung der Bauteile

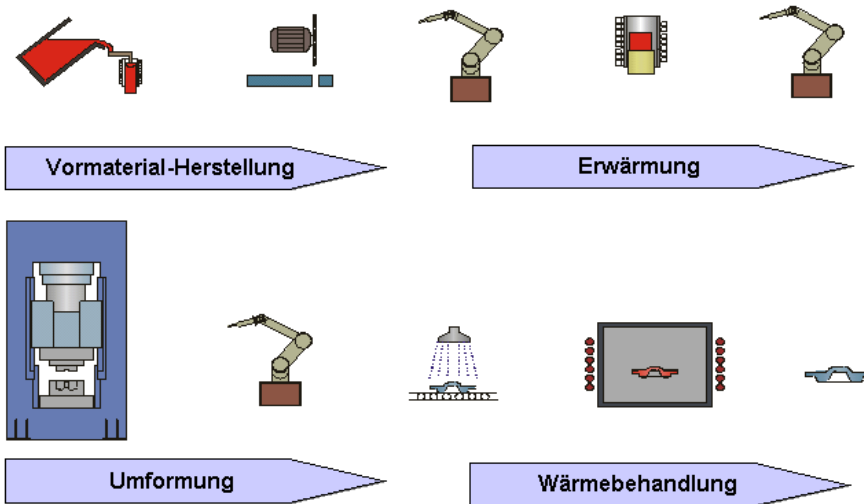


Abb. 131: Die 4 Verfahrensschritte beim Thixoschmieden

Thixo-Schmieden unterscheidet vom Thixo-Gießen hauptsächlich durch die eingesetzten Formgebungsmaschinen mit entsprechend anderen Werkzeugkonzepten. So wird das Thixo-Schmieden auf hydraulischen Hochgeschwindigkeitspressen durchgeführt, wohingegen das Thixo-Gießen auf leicht modifizierten Druckgussmaschinen durchgeführt wird. Während die auf Temperaturen oberhalb der Solidustemperatur erwärmten Rohteile (Slurries) beim Thixo-Gießen in die Gießkammer eingelegt werden, werden Sie beim Thixo-Schmieden grundsätzlich direkt in die untere Formhälfte eingelegt.

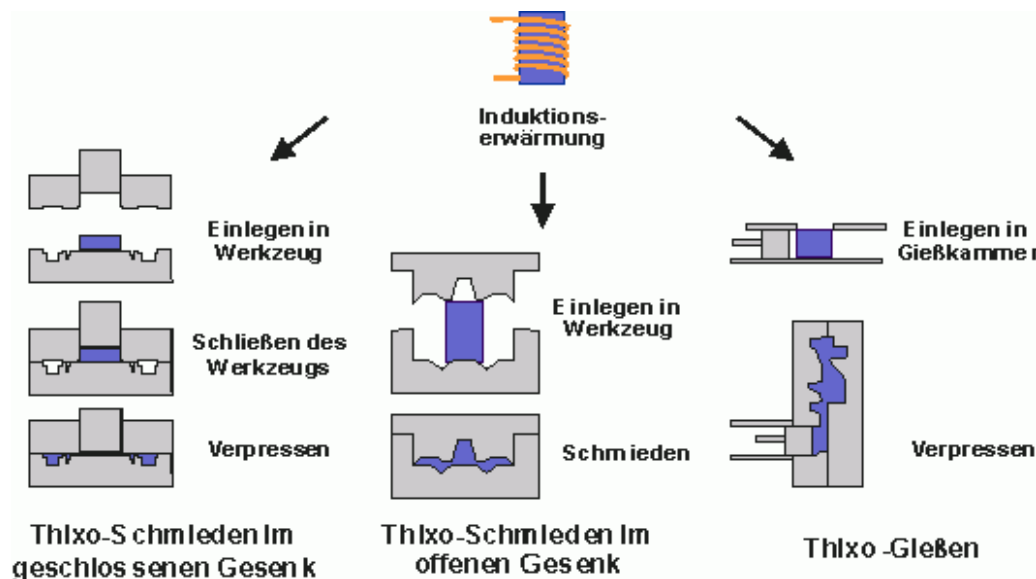


Abb. 132:
Vergleich
Thixo-Schmieden
mit Thixo-Gießen

Daher sind beim Thixo-Schmieden im Vergleich zum Thixo-Gießen deutlich kürzere Fließwege des Werkstoffs zu verzeichnen. Dies ermöglicht die Umformung von Werkstoffen mit höheren Festphasenanteilen.

Beispiele:

Die Abb. 127 - 129 zeigen Beispiele von thixogeformten Werkstoffen bzgl. Gefüge und Endprodukt.

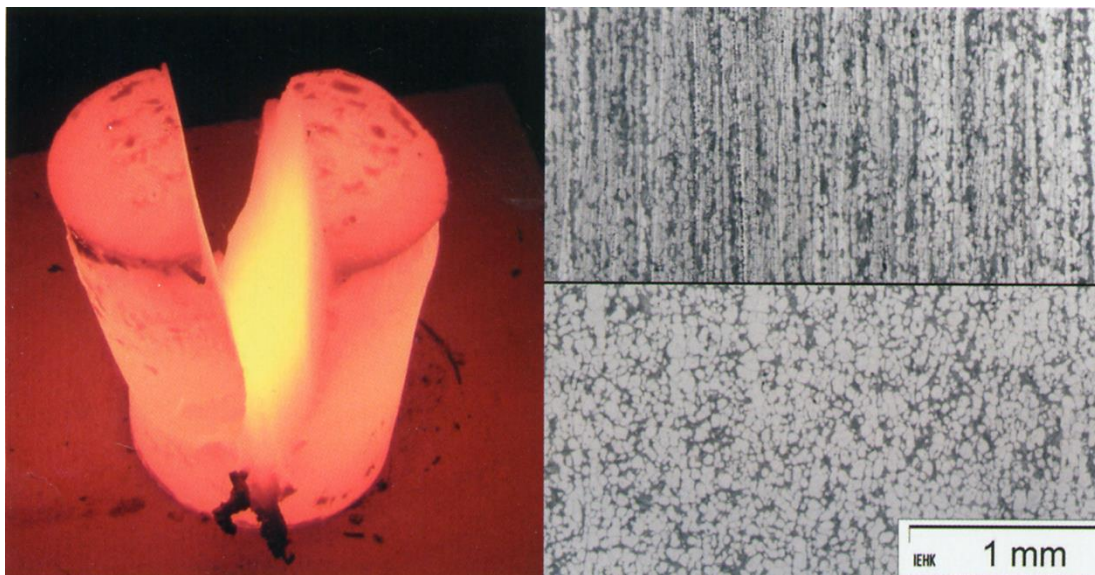


Abb. 133:

Mit dem Messer von Hand geschnittener Stahlbolzen aus X210CrW12 (links) zelliges (rechts oben) und gewünschtes Gefüge (rechts unten) nach angepasster Erwärmung)



Abb. 134:

Thixogegossenes Messer und Impeller aus X210CrW12



Abb. 135

Pumpengehäuse aus 100Cr6

zur Thematik „Thixoforming“ s. auch die Aufsätze “ [Thixotropie](#)“ und „[Thixotropie 1](#)“ auf meiner Homepage

5.4.5 Thixo-Spritzgießen

Ist eigentlich ein Urformverfahren. Gegenüber den klassischen Druckgussverfahren ergibt sich der Vorteil, dass einerseits die Verarbeitungstemperaturen deutlich niedriger ausfallen und somit die Belastung für das Werkzeug geringer sind, andererseits durch den bereits beim Gießen vorhandenen Festphasenanteil die Erstarrungsschrumpfung deutlich geringer ausfällt. Die im Thixospritzgießen hergestellten Bauteile weisen dadurch eine gute Maßhaltigkeit auf. Vorwiegend werden Mg- und Al-Legierungen verarbeitet.

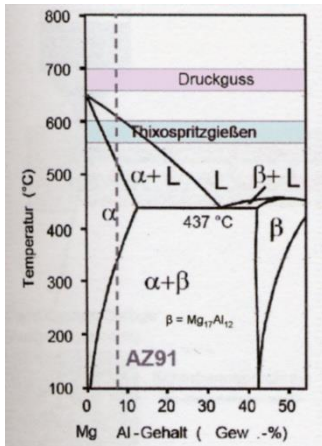


Abb. 136
ZSD Mg-Al,
Beispiellegie-
rung AZ91

Anteil der fes-
ten Phase zwi-
schen 0 und 40
%



Abb. 137
Elektronikbau-
teile aus AZ91

Die zum Thixospritzgießen verwendeten Anlagen sind jenen zum Spritzgießen von Kunststoffen sehr ähnlich. Das Metallgranulat wird unter Schutzgasatmosphäre in einem Trichter der Plastifiziereinheit zugeführt. Die Förderschnecke befördert den Werkstoff hin zur Schnecken spitze. Dabei wird das Granulat bis knapp unter die Liquidustemperatur erhitzt und angeschmolzen. Durch die Drehbewegung der Schnecke wird der Werkstoff ausserdem sehr stark geschert. Dadurch wird die ursprünglich dendritische Kornstruktur aufgebrochen. Es bildet sich ein globulares Gefüge mit geringer Viskosität. Diese wird durch eine diskontinuierliche Hubbewegung der Gießeinheit in die Werkzeugform gespritzt. Anders als beim Druckgießen wird die Form nicht durch einen Strahl gefüllt, sondern es bildet sich ein Quellstrom vergleichbar zur Formfüllung im Spritzgießen mit Kunststoffen aus, s. Abb.

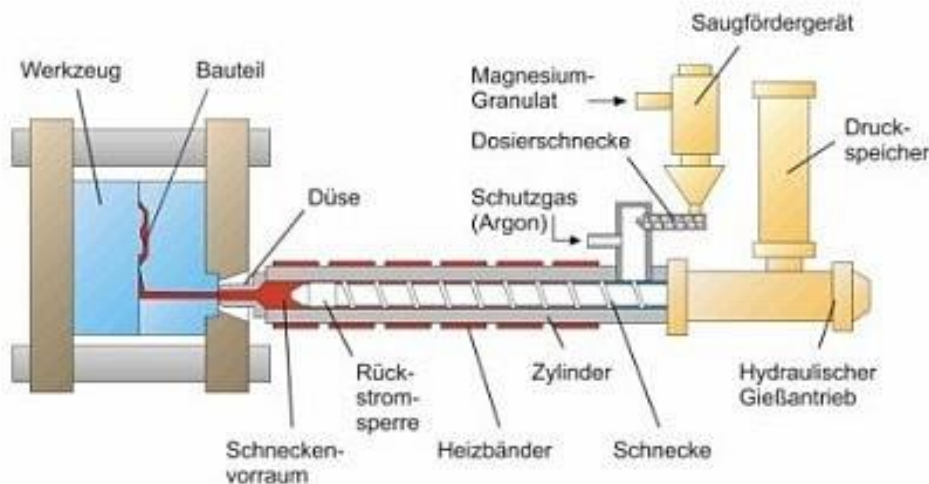
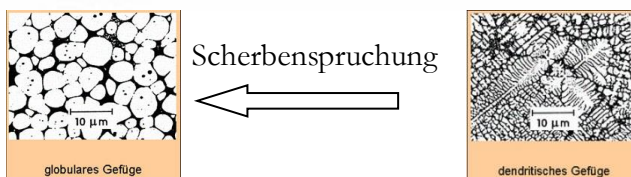


Abb. 138
Anlage zum Thixos-
pritzgießen sowie Ge-
fügeveränderung



5.5 Fließkurven bei Kalt- und Warmumformung

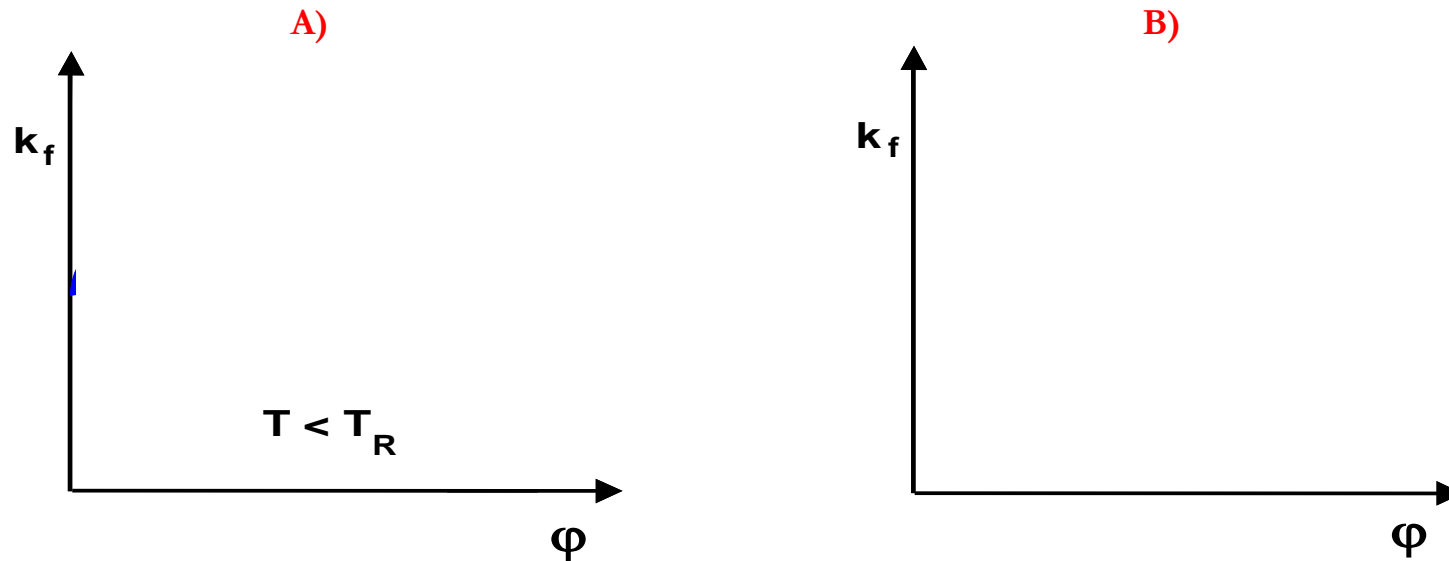


Abb. 139: Typischer Verlauf von Fließkurven bei der Kalt- und Warmumformung

A) Kaltumformung ($T < T_R$): \Rightarrow

B) Warmumformung ($T \gg T_R$): \Rightarrow

\Rightarrow

.

Umformgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$

$d\varphi_h$, die differentielle Änderung des Umformgrades, ist definiert als die differentielle Höhenänderung dh bezogen auf die momentane Höhe h :

$$d\varphi_h = \frac{dh}{h}$$

$$\varphi_h = \int_{h_0}^{h_1} \frac{dh}{h} = \ln h_1 - \ln h_0 = \ln \frac{h_1}{h_0}$$

$$\dot{\varphi}_h = \frac{d\varphi_h}{dt} = \frac{dh/h}{dt} = \frac{1}{h} \cdot \frac{dh}{dt}$$

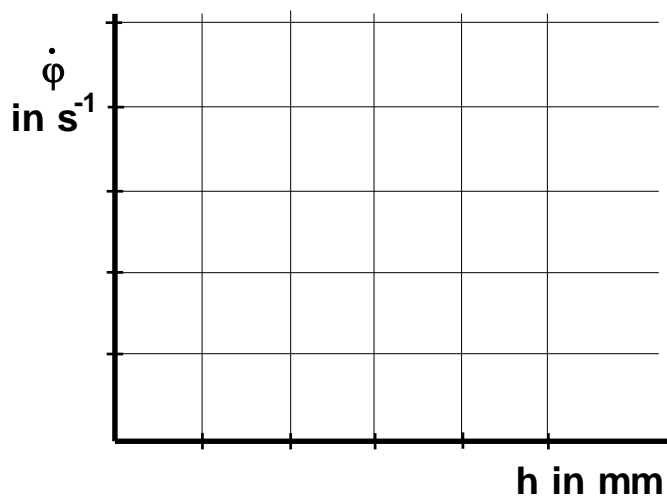


mit:

Beispiel:

Ein Bolzen wird auf einer Presse mit $v = 200 \text{ mm/s}$ von $h_0 = 50 \text{ mm}$ auf $h_1 = 20 \text{ mm}$ warm gestaucht.

Berechne $\dot{\varphi}_A$ und $\dot{\varphi}_E$



$$\dot{\varphi}_A =$$

$$\dot{\varphi}_{40} =$$

$$\dot{\varphi}_{30} =$$

$$\dot{\varphi}_E =$$

Abb. 140: Übung zur Umformgeschwindigkeit

Maschinen	Umformgeschwindigkeiten $\dot{\varphi}$ s^{-1}
Stauchmaschinen	400 ... 1200
Oberdruckhämmer	50 ... 200
Kurbelpressen	10 ... 20
Hydraulische Pressen	0,5 ... 5

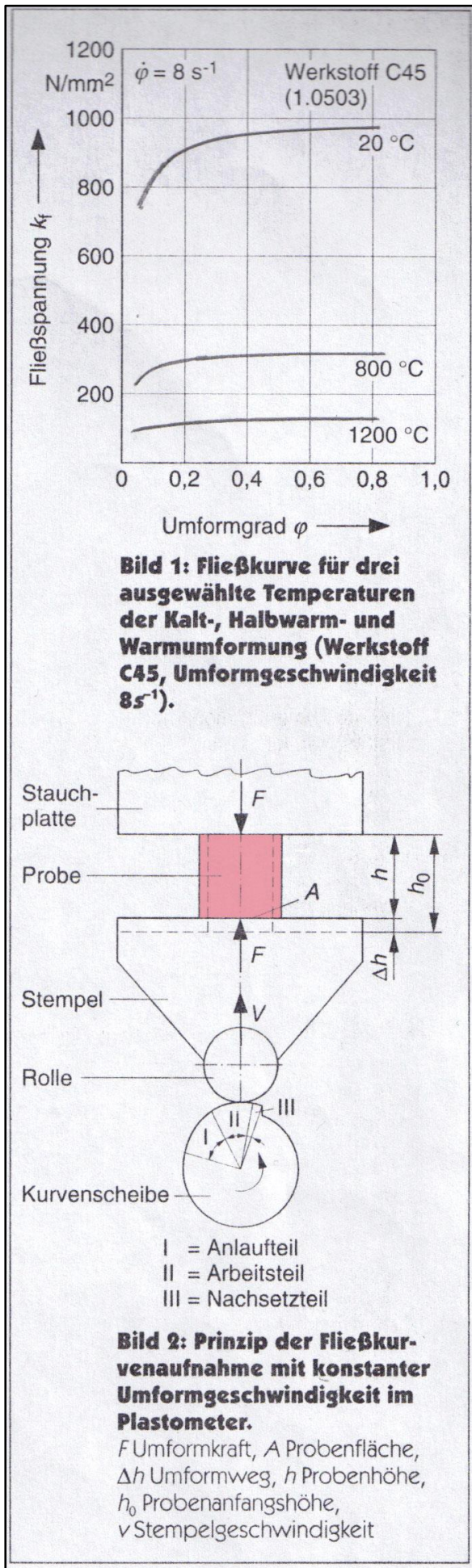


Abb. 141:

$F_k = f(I)$ und FK-Aufnahme

Oben:

F_k von C45 als $f(I)$ bei $\dot{\phi} = \text{const.}$

Unten:

Prinzip der FK- Aufnahme bei $\dot{\phi} = \text{const.}$ im Plastometer

Beispiele für reale Fließkurven (FK)

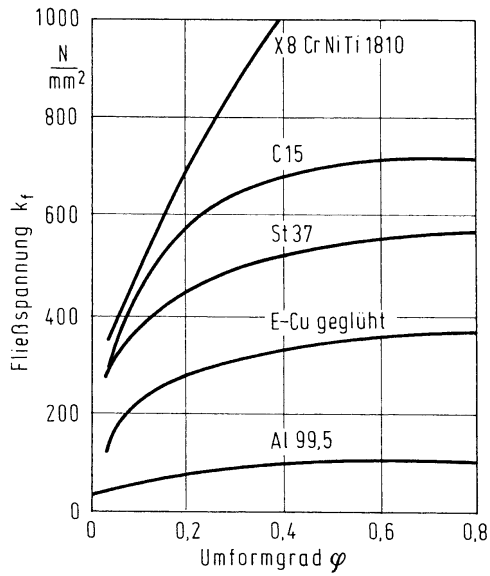


Abb. 142: Kaltumformung: FK verschiedener Metalle

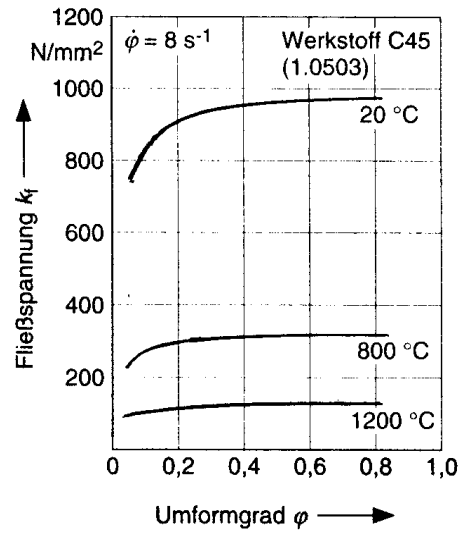


Abb. 143: FK von C45 als $f(T)$; Beispiele für die Kalt-, Halbwarm- und Warmumformung

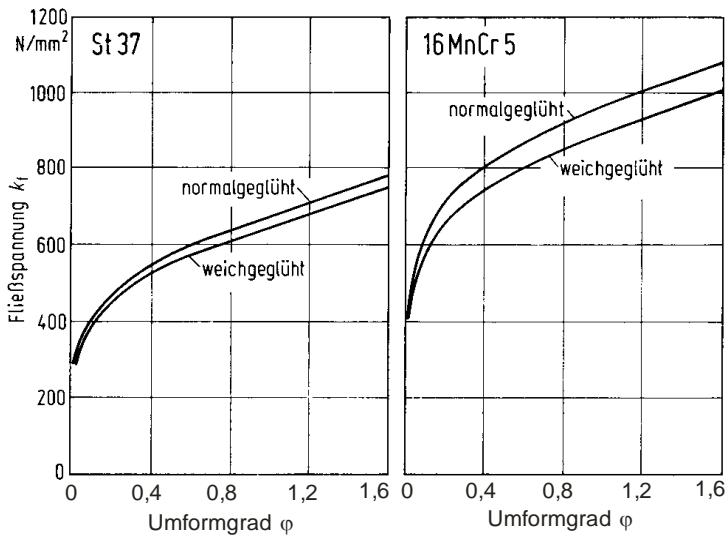


Abb. 144: Kaltumformung: FK eines unlegierten und eines niedrig legierten Stahles als $f(WB)$

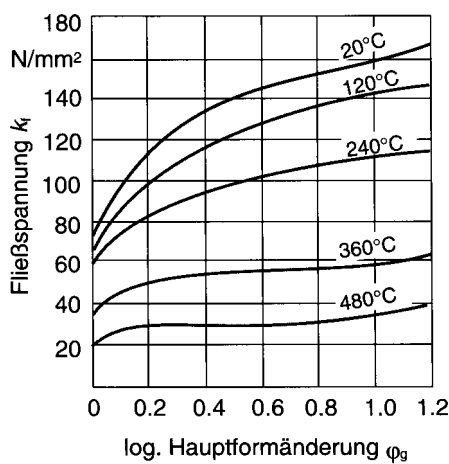
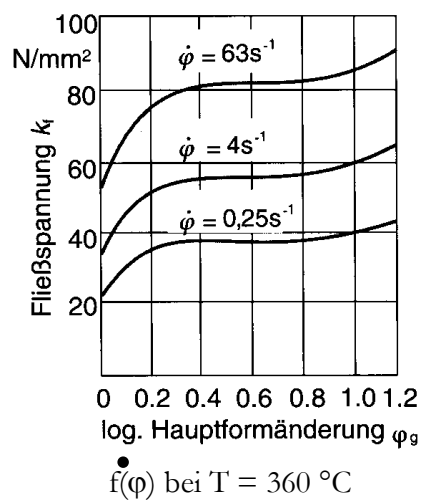


Abb. 145: Al 99,5: FK als $f(T)$ und



+ lineare FK nach Ludwik..(s. auch Abb. 114, 115)

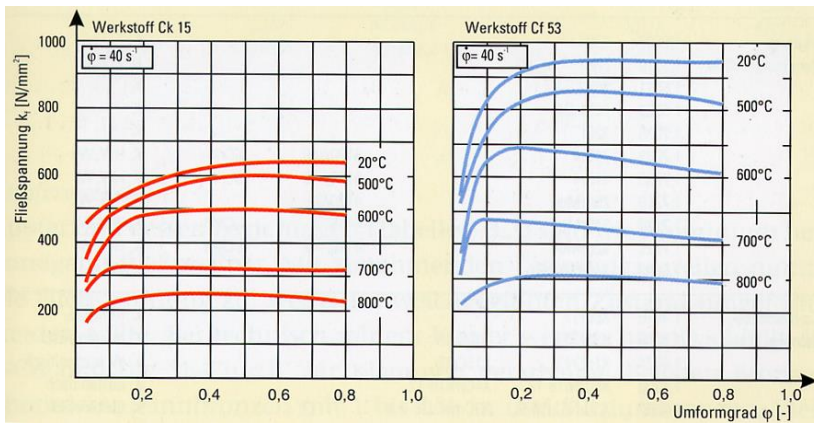


Abb. 146:
FK von Ck 15 und Cf 53 als $f(T)$
bei $(\dot{\phi}) = \text{const.}$

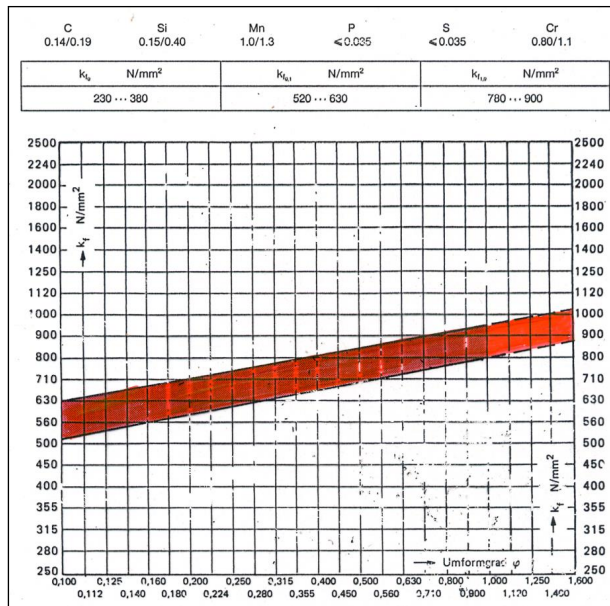


Abb. 147:
Linearisierte Fließkurve für
16 MnCr 5 mit Streubereich
(DIN 1627 / 17210)

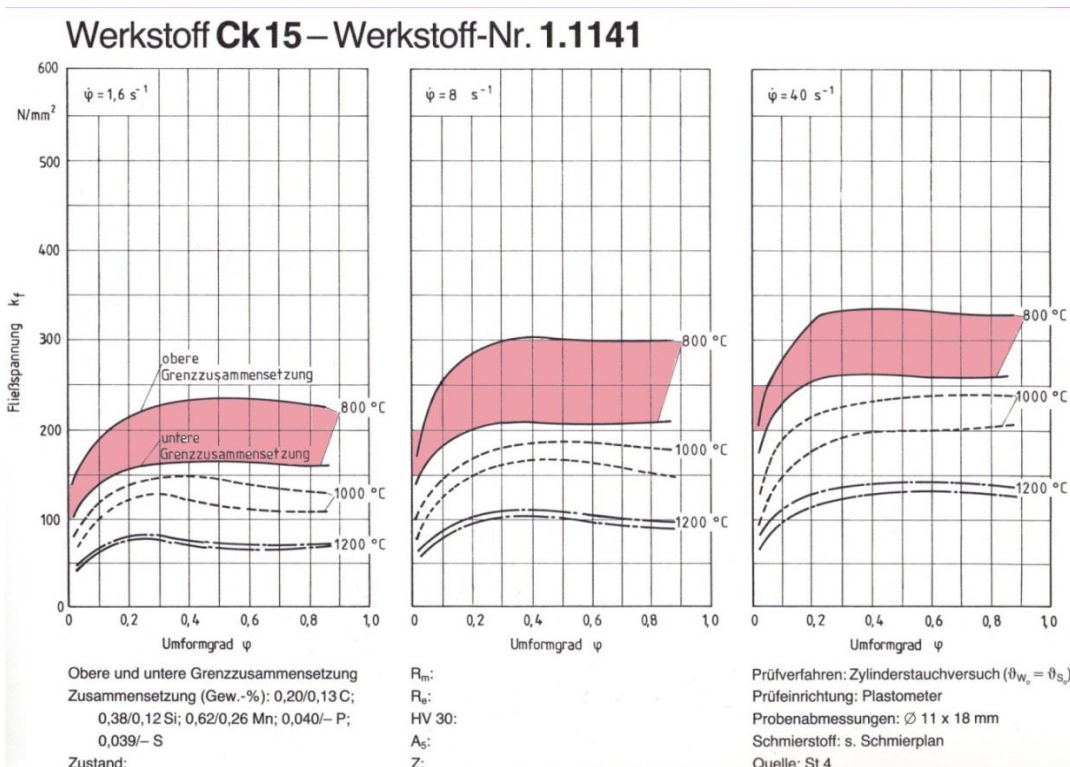


Abb. 148: Fließkurven von Ck15 als $f(T, \dot{\phi})$

Fließkurven = $f(\varrho, \dot{\varphi}, T, \text{Werkstoff})$

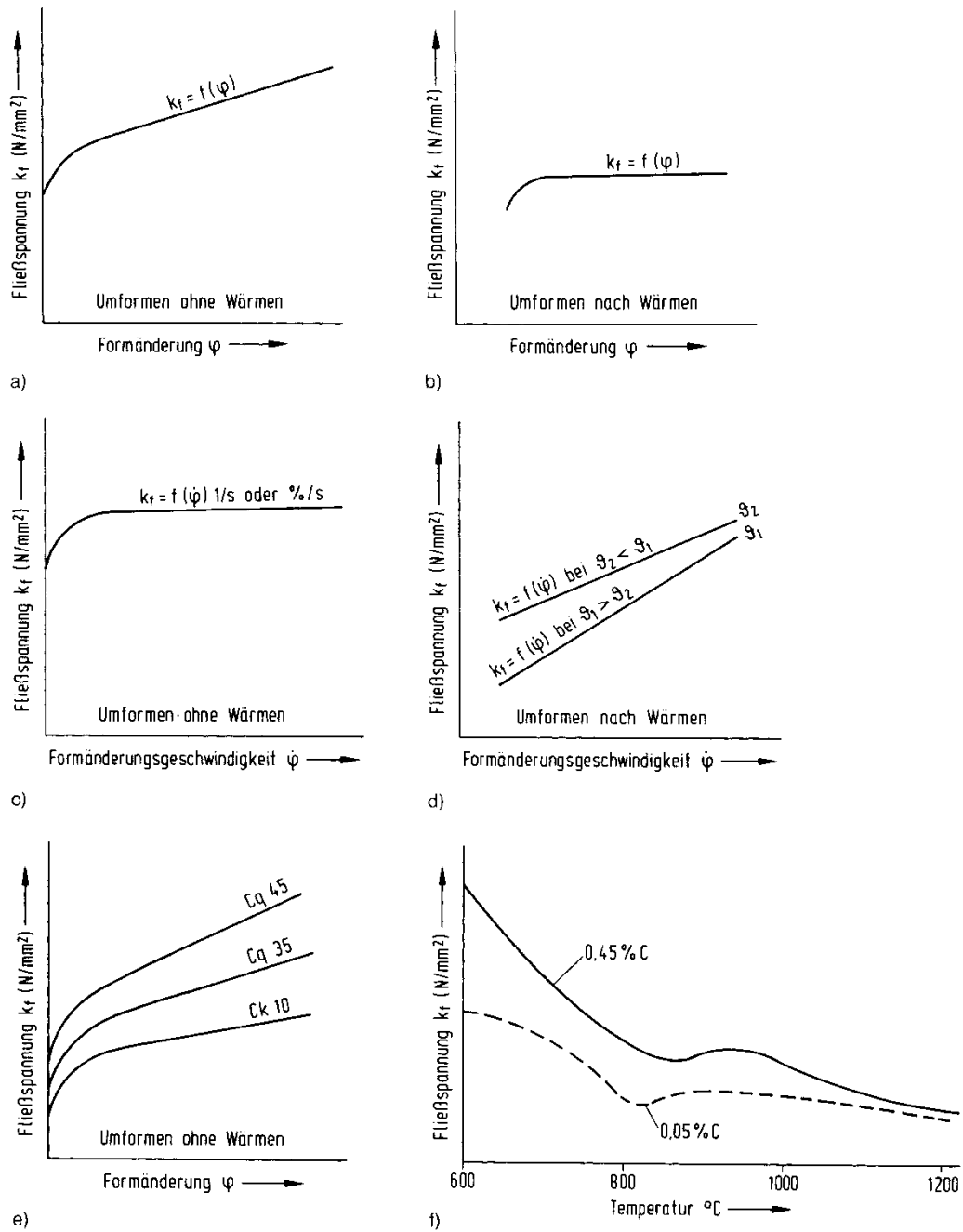


Bild 2.5 Verändern der Fließspannung durch:
 a) Formänderung bei Raumtemperatur
 b) Formänderung mit ausreichender Rekristallisationsgeschwindigkeit
 c/d) Formänderungsgeschwindigkeit
 e) unterschiedliche Legierung bzw. chemische Werkstoffbestandteile
 f) Umgebungstemperatur = Glüh­temperatur

Abb. 149: Einfluss verschiedener Parameter auf die Fließkurve

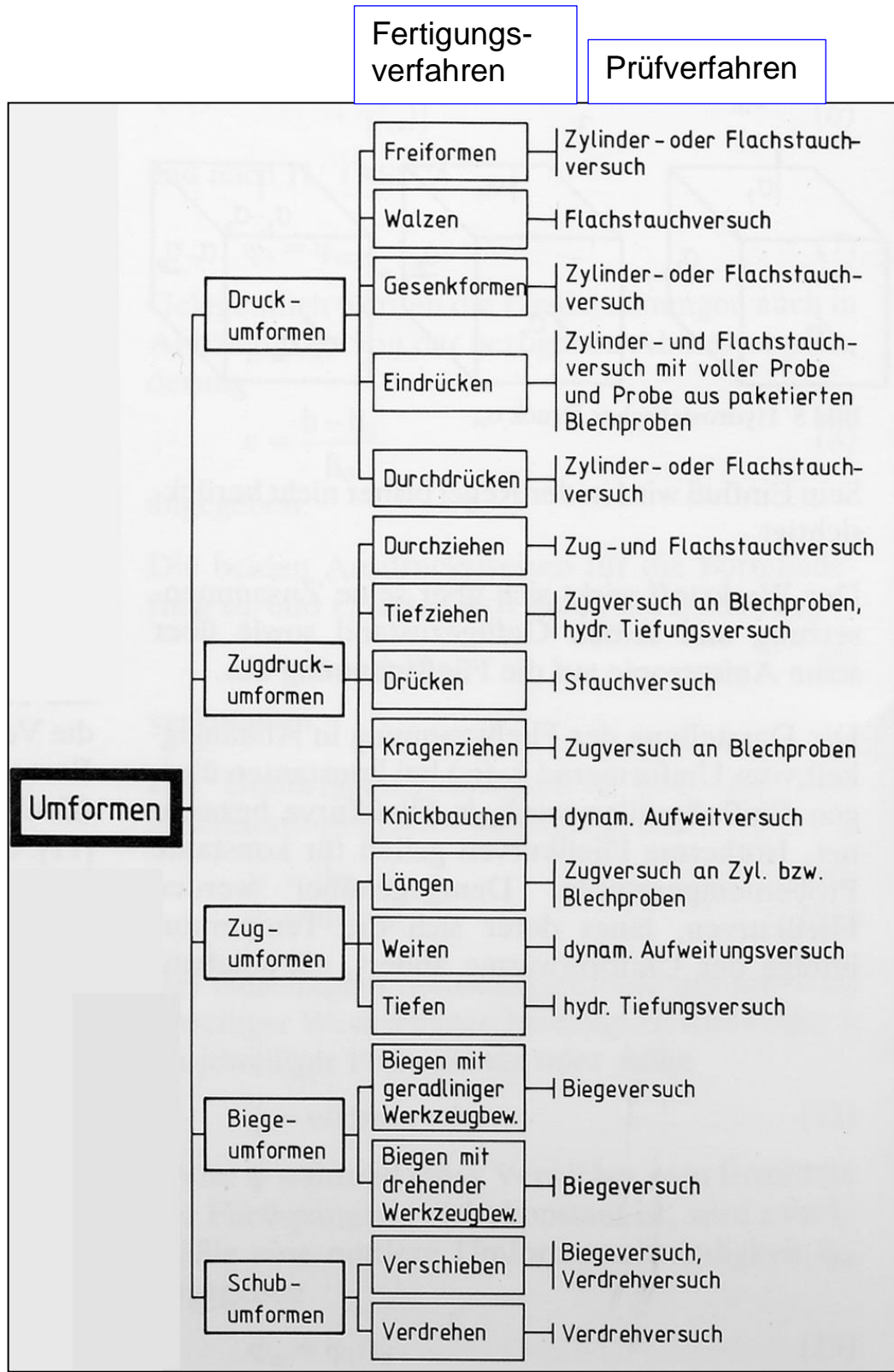


Abb. 150: Fließkurvenermittlung: Empfohlenen Prüfverfahren zum jeweiligen Fertigungsverfahren (aus: FK-Atlas)

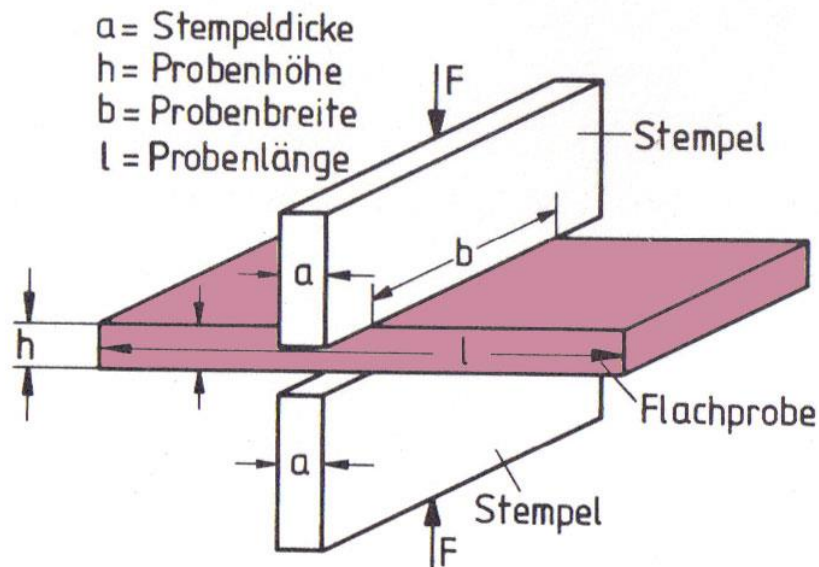


Abb. 151: Flachstauchversuch

Voraussetzungen: $b/h > 6$ (ebener Formänderungszustand)
 $a/h = 1$ ($a < 3\text{mm}$)
 „gute Schmierung“

Mit dem Flachstauchversuch sind hohe Umformgrade ($\varphi \approx 2$) und hohe Umformgeschwindigkeiten ($\dot{\varphi} \approx 10^3 \text{ s}^{-1}$) zu erreichen.

Die so ermittelten Fließkurven liegen höher als die im Zugversuch ermittelten wegen der Reibung an den Wirkflächen.



Abb. 152:

Anforderungen an Schmiermittel in der Umformtechnik

z.B. Öle, Fette, Graphit, Glas, Teflon

Informationen zu Fließkurven finden Sie:

VDI-RiLi 3200, Blatt 2, Fließkurvenatlas

→ Stähle

VDI-RiLi 3200, Blatt 3

→ NE-Metalle

Zur Thematik „Fließkurven“ und deren Bestimmung gibt der „Fließkurvenatlas“ von E. Doege et al. umfassend Auskunft. S. auch Aufsatz unter dem Titel „[Fließkurve](#)“ auf meiner Homepage abrufbar.

Fließkurvenaufnahme → Problematiken

Fließkurven (FK) sind auch die Basis von Umformsimulationen mit FEM-Verfahren, wie sie vor allem bei der Massivumformung (z.B. beim Schmieden) durchgeführt werden. Ihre mangelnde Genauigkeit führte zur Produktion von Ausschuss.

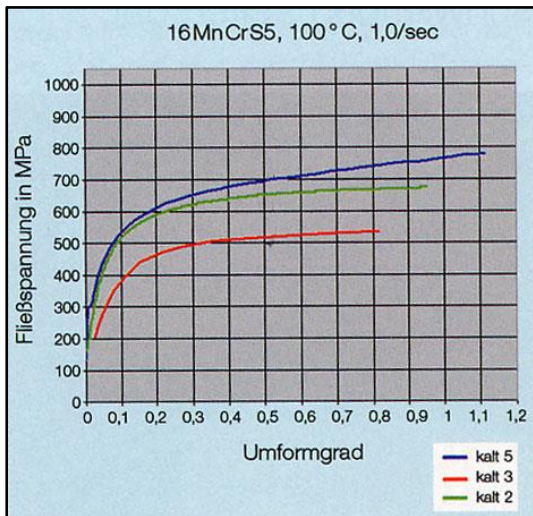


Abb. 153:

Vergleich von FK ohne Richtlinie →
Abweichung bis 40 % ! (bei derselben Charge)

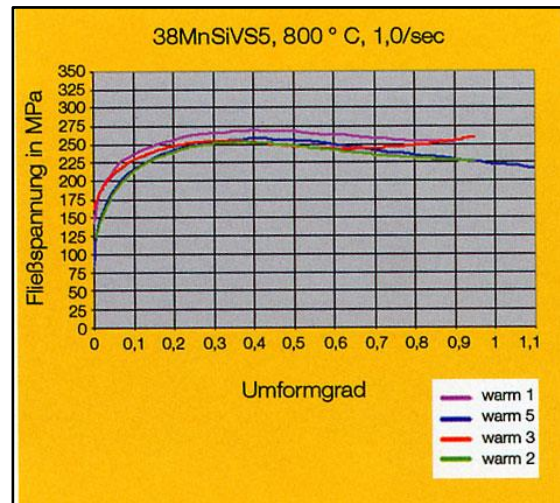


Abb. 154:

Vergleich von FK nach Richtlinie →
Abweichung bis 10 % !!! (bei derselben Charge)

2009 wurden Richtlinien zur Aufnahme von FK erarbeitet. Nach Vereinheitlichung von

- Probenform
- Probenabmessung
- Schmierung
- Meßtechnik

ergaben sich bei gleicher T, $\dot{\varphi}$ und Analyse immer noch deutliche, aber wesentlich geringere Abweichungen, s. Abb. 67

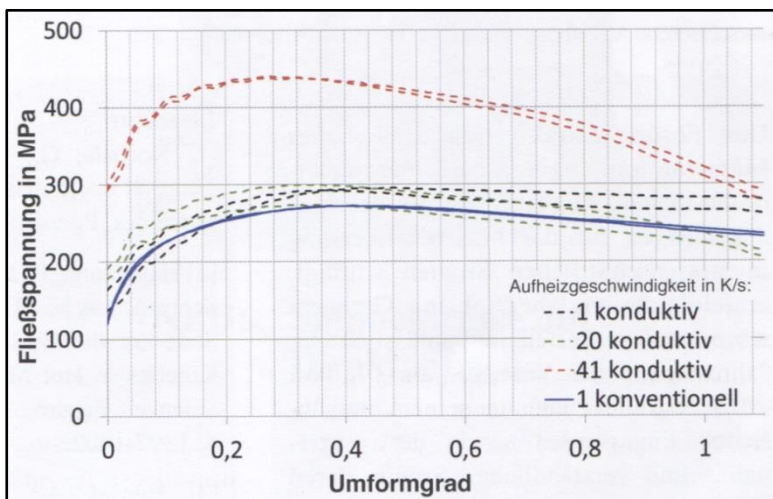


Abb. 155:

Vergleich von FK eines Stahls als f(Aufheiz-v)

Umform-T = 850 °C

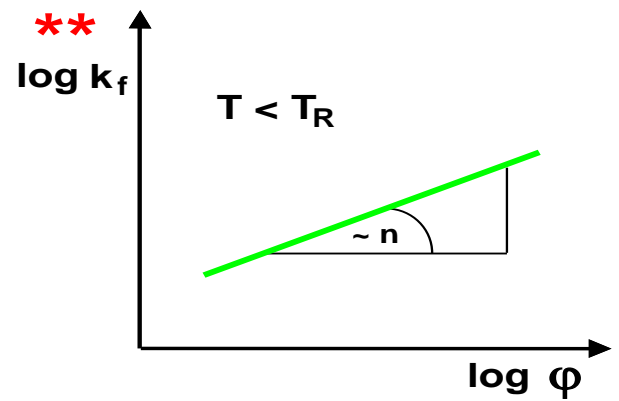
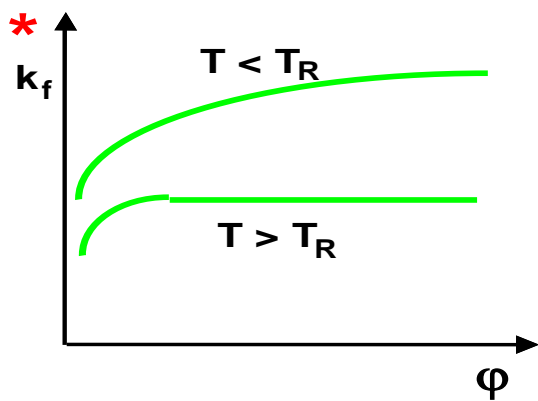
$1 \text{ s}^{-1} \leq \dot{\varphi} \leq 41 \text{ s}^{-1}$

Ursache: s. ZTA-Schaubilder

Untersuchung von 9/2013,
s. Schmiedejournal

Zur Thematik „Fließkurven“ und deren Bestimmung gibt der „Fließkurvenatlas“ von E. Doege et al. umfassend Auskunft. Des Weiteren ist ein vom selben Autor geschriebener Aufsatz unter dem Titel „[Fließkurve](#)“ von meiner Homepage abrufbar.

Die Fließkurve (Zusammenfassung)



5.6 Stauchen eines Zylinders + Aufgabe Stauchkraft

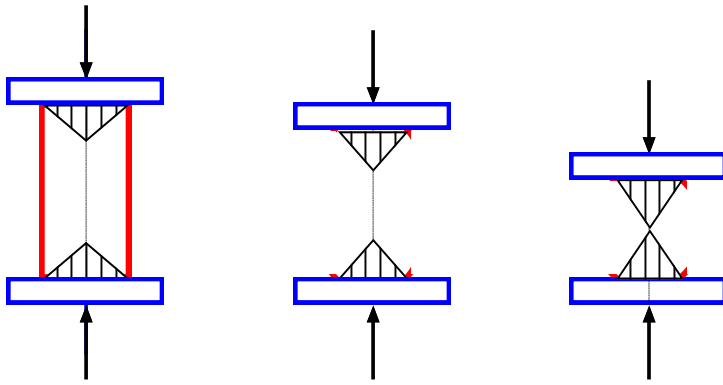


Abb. 156:
Verformung eines Zylinders beim Stauchen

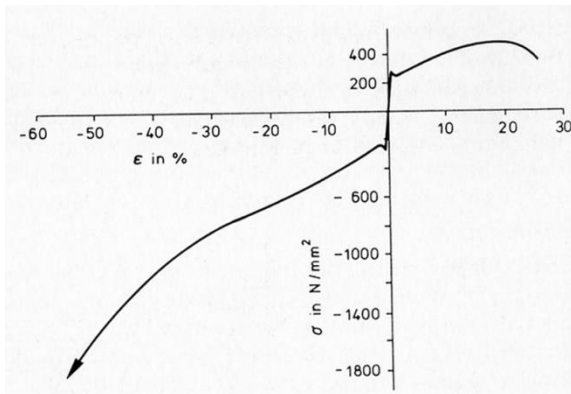
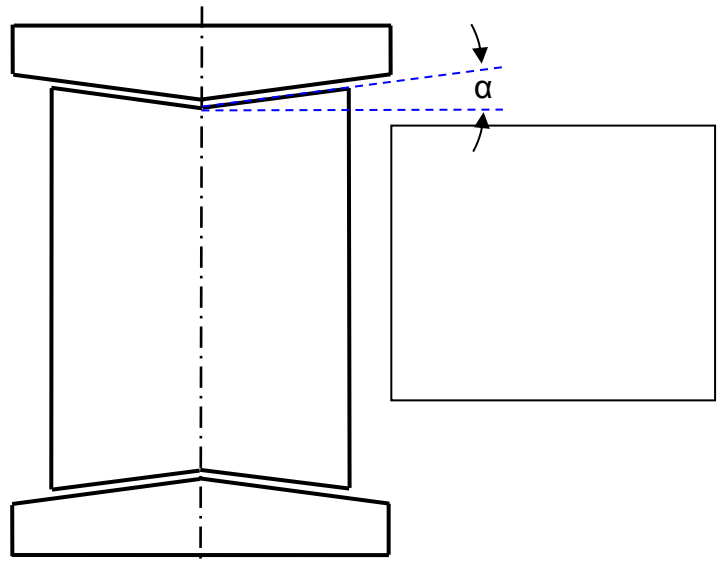
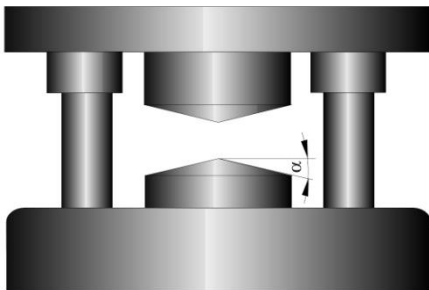
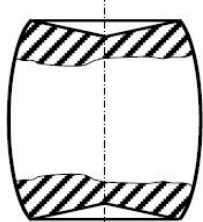


Abb. 157:
σ-e-Kurve im Zug- und Druckversuch

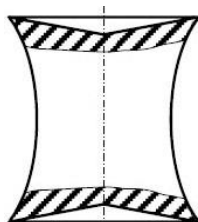
Kegelstauchversuch



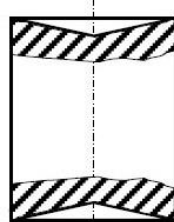
Zylindrische Probe:



$\alpha < \arctan \mu$ (↑)



$\alpha > \arctan \mu$ (↓)



$\alpha = \arctan \mu$ (Reibung optimal)

Abb. 158: Einfluss der Reibung an der Grenzfläche Werkzeug - Werkstück

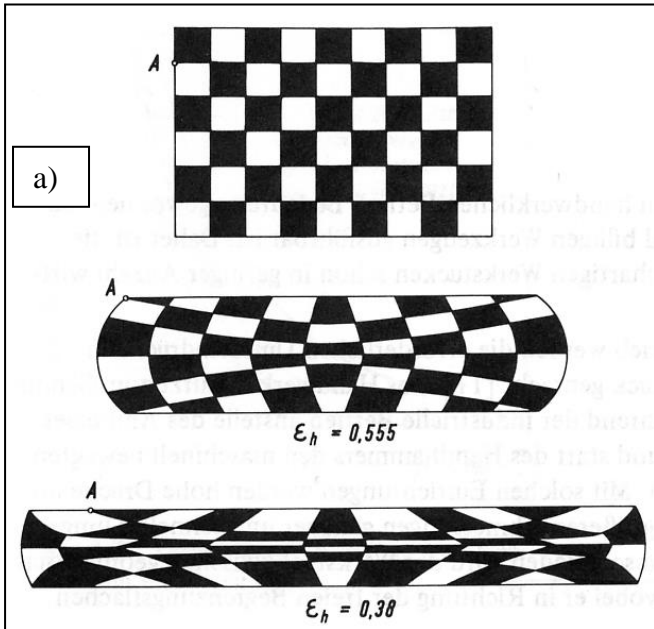
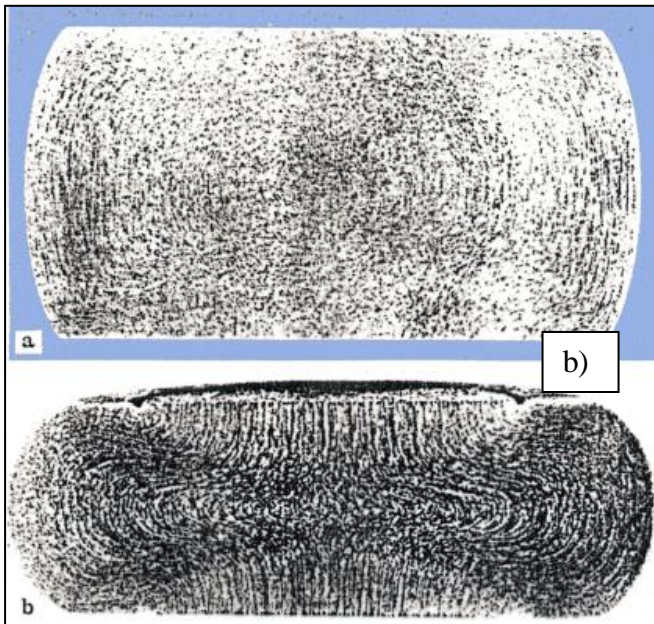
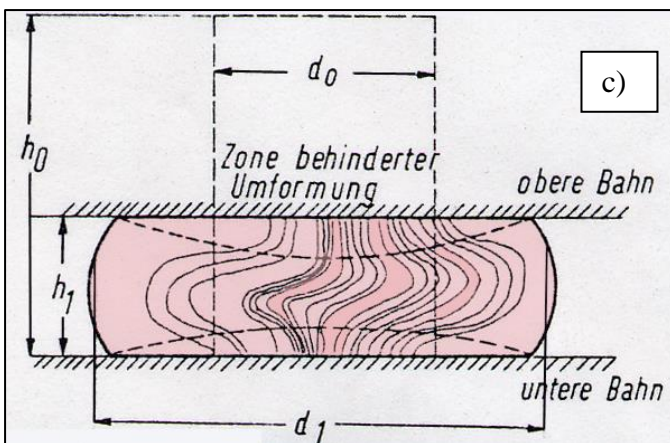


Abb. 159: Stauchen eines Zylinders

a) Wanderung der Volumenelemente



b) Ausbauchung mit Faserverlauf im Makroschliff

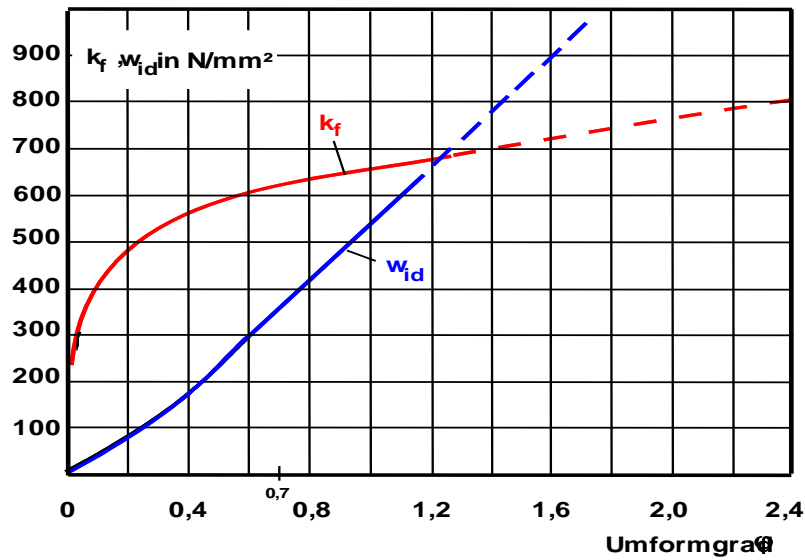


c) Faserverlauf: schematische Darstellung

Aufgabe:

Berechne die Umformkraft beim Stauchen eines Bolzens aus Ck 10 auf die halbe Ausgangshöhe bei $T = RT$.

gegeben:	A_0	=	100 mm ²	(Ausgangsquerschnitt)
	h_0	=	40 mm	(Ausgangshöhe)
	h_1/h_0	=	0,5	(Formänderungsverhältnis)
	μ	=	0,1	(Reibungskoeffizient)



gesucht: F_{id} = ideale Umformkraft,
 F_{re} = reale Umformkraft

Abb. 160:

Fließkurve für Ck 10

5.7 Ermittlung der Umformarbeit + Aufgabe

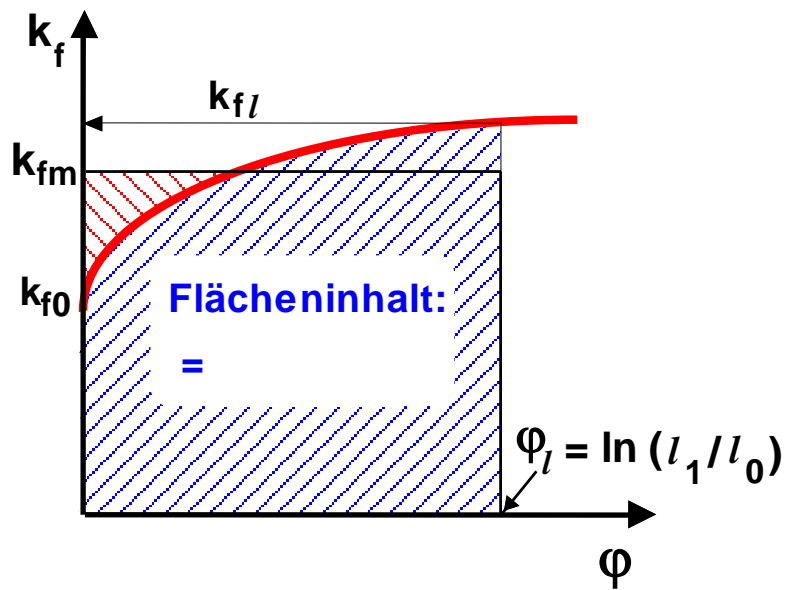


Abb. 161:
Ermittlung der Umformarbeit

Aufgabe:

Berechne die Umformarbeit beim Stauchen eines Zylinders aus Ck 10 auf die halbe Ausgangshöhe bei $T = RT$.

gegeben: $A_0 = 100 \text{ mm}^2$ (Ausgangsquerschnitt)
 $h_0 = 40 \text{ mm}$ (Ausgangshöhe)
 $\eta_f = 0,6$ (Formänderungswirkungsgrad)

gesucht:

W_{id} = ideale Umformarbeit
in Nm

W_{re} = reale Umformarbeit in
Nm

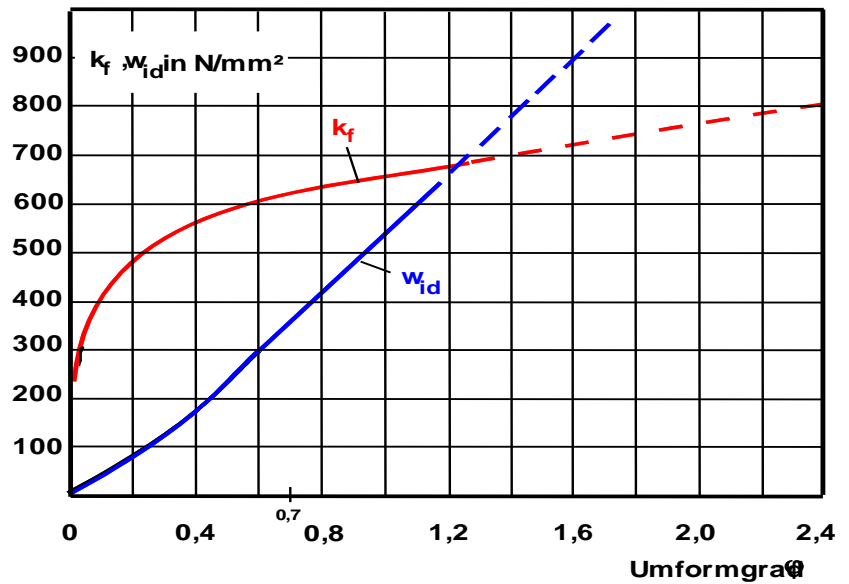


Abb. 162: Fließkurve für Ck 10

6. Verfahren der Umform- und Schneidetechnik nach DIN 8582 (Kurzübersicht)

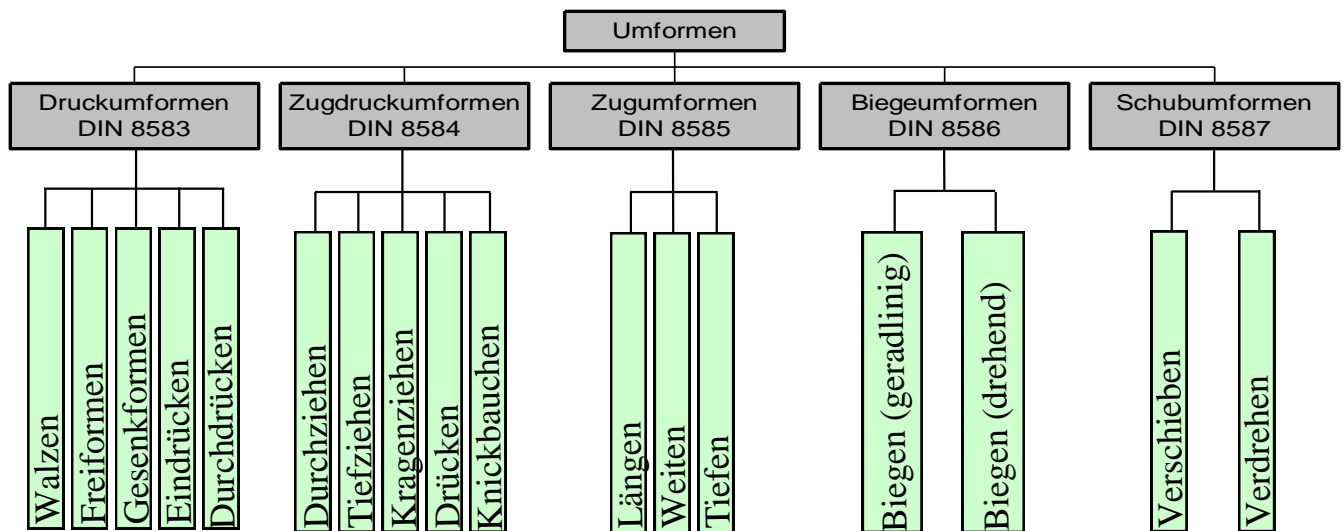


Abb. 163: Übersicht über die Verfahren der Umformtechnik
s. auch folgende Seiten

In der DIN 8582 werden die 17 Verfahrensgruppen nach den Kriterien der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück sowie der Werkzeug- und der Werkstückgeometrie unterschieden

(ausführliche Beschreibung der einzelnen Verfahren → „Verfahren der Umformtechnik“ von Karl H. Hofer)

Umformverfahren nach DIN 8582 (Kurzübersicht; Farb-Graphiken aus „Schuler“)

Druckumformen

- ❑ **Walzen:** Dabei werden durch sich drehende Werkzeuge aus gegossenem Ausgangsmaterial (Brammen, Stränge) Halbzeuge in Form von Blechen, Rohren oder Profilen hergestellt. Warm-, Kaltwalzen... ⇒ s.u.
- ❑ **Schmieden (Freiformen):** Dabei entsteht die Werkstückform durch Werkzeuge, die nicht oder nur teilweise die Form des Werkstückes enthalten.
- ❑ **Schmieden (Gesenkformen):** Dabei entsteht die Werkstückform durch gegeneinander bewegte Formwerkzeuge, die das Werkstück ganz oder zu einem wesentlichen Teil umschließen.
- ❑ **Durchdrücken:** (z.B.: Verjüngen, Strangpressen, Fließpressen). Dabei wird der Werkstoff teilweise oder vollständig durch eine formgebende Werkzeugöffnung gedrückt wobei der Querschnitt oder der Durchmesser verringert wird.
- ❑ **Fließpressen/Strangpressen** (z.B. Napf-Rückwärts-Fließpressen): Dabei entsteht die Werkstückform durch gegeneinander bewegte Formwerkzeuge. Der Werkstoff fließt im gezeigten Fall entgegen (rückwärts) der Richtung des Werkzeuges (Stempels).
- ❑ **Eindrücken** (z.B. Münzprägen): Dabei dringt das Werkzeug örtlich in das Werkstück ein.

Schmieden (Freiformen)

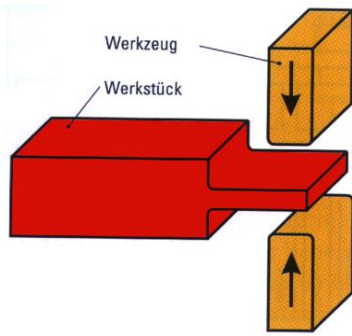


Abb. 164: Schmieden (Freiformen)

Durchdrücken (Napfrückwärts-Fließpressen)

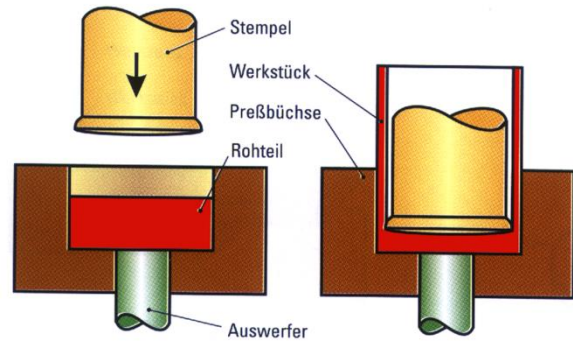


Abb. 165: Durchdrücken (Napfrückwärts-Fließpressen)

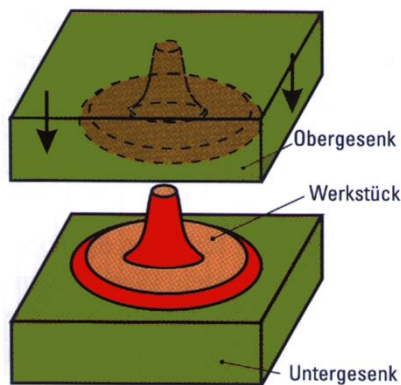


Abb. 166: Schmieden (Gesenkformen)

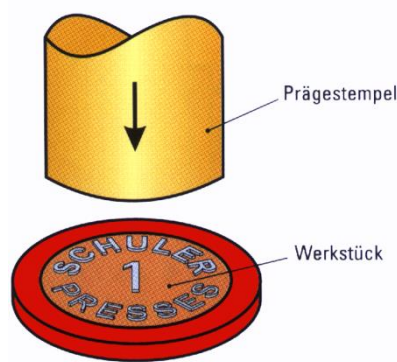


Abb. 167: Eindrücken (Münzprägen)

weitere Verfahren: Walzen, Durchdrücken (Verjüngen, Strangpressen)

Zugdruckumformen

- **Tiefziehen:** Dabei wird ein Blechzuschnitt (z.B. Ronde) zu einem Hohlkörper ohne beabsichtigte Änderung der Blechdicke umgeformt. Dazu werden starre Werkzeuge oder Wirkmedien benutzt. Bei größeren Umformgraden sind mehrere Züge (Weiterzüge) erforderlich. Diese können sowohl in die gleiche als auch in die entgegengesetzte Richtung erfolgen.

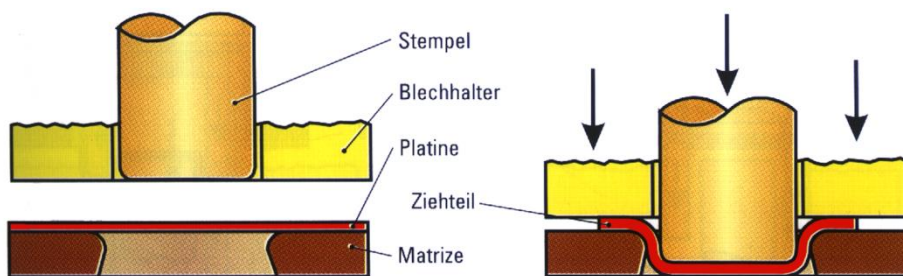


Abb. 168: Tiefziehen

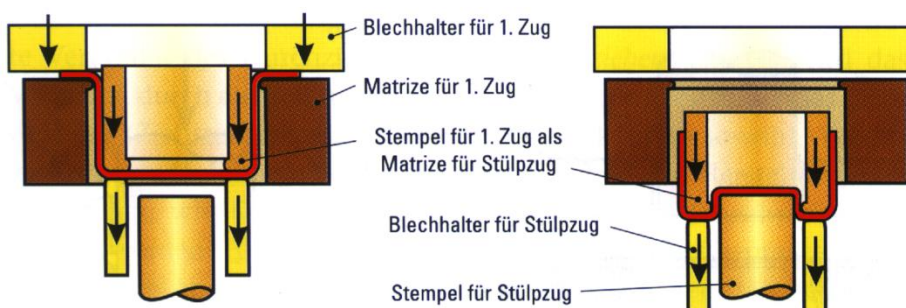


Abb. 169: Stülpziehen

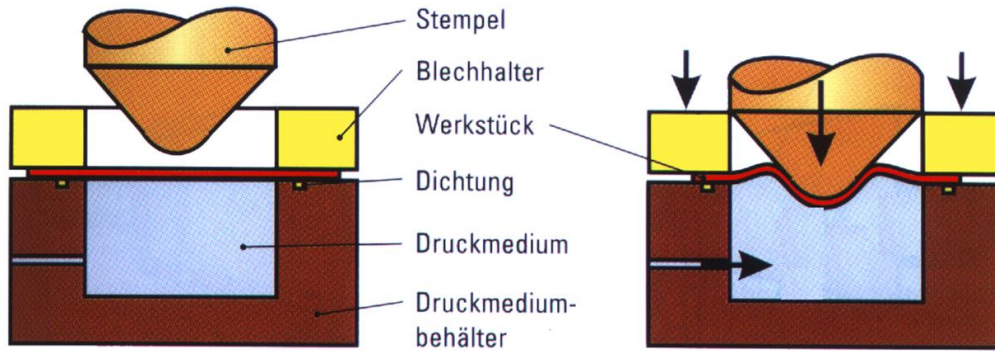


Abb. 170: Hydromechanisches Tiefziehen

weitere Verfahren:

Kragenziehen, Drücken, Knickbauchen

Zugumformen

- **Tiefen:** Dabei werden Vertiefungen an einem ebenen oder gewölbten Werkstück aus Blech erzeugt, wobei eine Oberflächenvergrößerung durch Verringern der Blechdicke erreicht wird.

Streckziehen: Beim Streckziehen wird ein Blechzuschnitt mit einem starren Stempel umgeformt (getieft), wobei das Werkstück am Rand fest eingespannt ist.

Hohlprägen: ist Tiefen mit einem Stempel (starres Werkzeug) in ein Gegenwerkzeug, wobei die Vertiefung gegenüber den Abmessungen des Werkstückes klein ist.

Weiten: ist Zugumformen zum Vergrößern des Umfangs eines Hohlkörpers. Wie beim Tiefziehen kommen auch hier starre und nachgiebige Werkzeuge sowie Wirkmedien zum Einsatz.

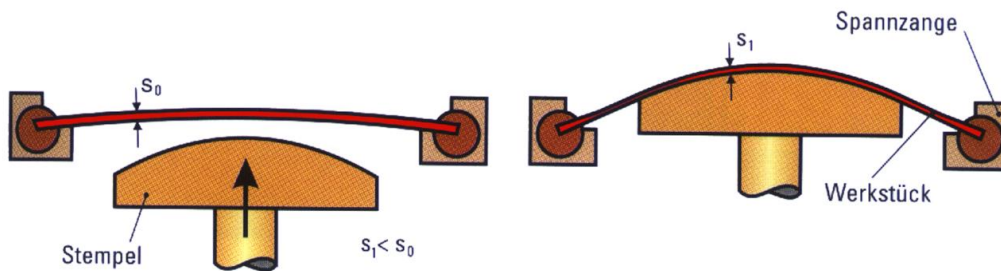


Abb. 171: Streckziehen

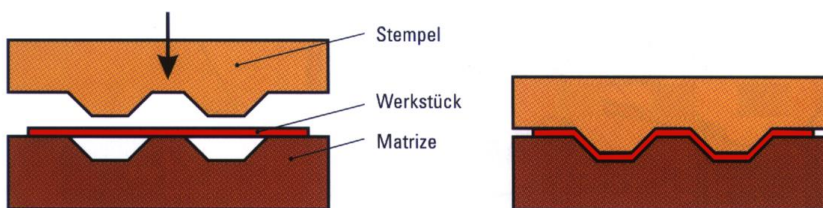


Abb. 172: Hohlprägen

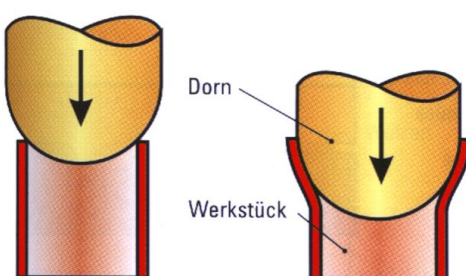


Abb. 173: Weiten

Biegeumformen

- **Gesenkbiegen:** Dabei führen die Werkzeuge eine gerade Bewegung aus. Die Werkstück- (Teile-) form wird durch die Werkzeuggeometrie und die Rückfederung eingestellt.
- **Walzbiegen:** Dabei führen die Werkzeugteile eine drehende Bewegung aus. Das Biegemoment wird durch Walzen aufgebracht.

Walzrunden: dient zum Biegen von Blechen, z.B. auch zur Herstellung zylindrischer Körper.

Walzprofilieren: Dabei werden Blechbänder oder Platinen mit Hilfe von Walzen (Rollen) zu Profilen umgeformt, wobei die Umformung stufenlos fortschreitet. Es wird 1 Rollenpaar pro Umformstufe benötigt.

- **Schwenkbiegen:** ist Biegen mit einer Wange, die das Teil um die Biegekante herum biegt.

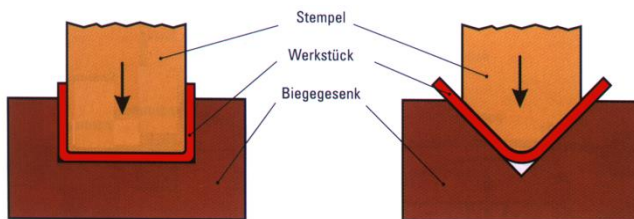


Abb. 174: Biegen im Gesenk

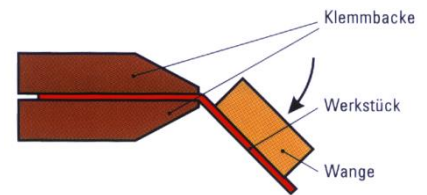


Abb. 175: Schwenkbiegen

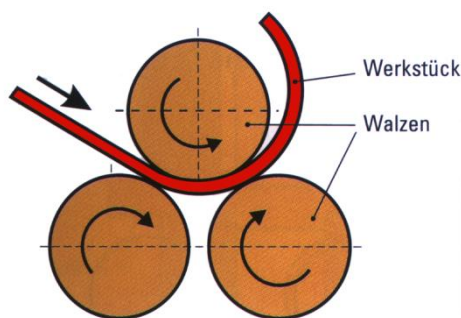


Abb. 176: Walzrunden

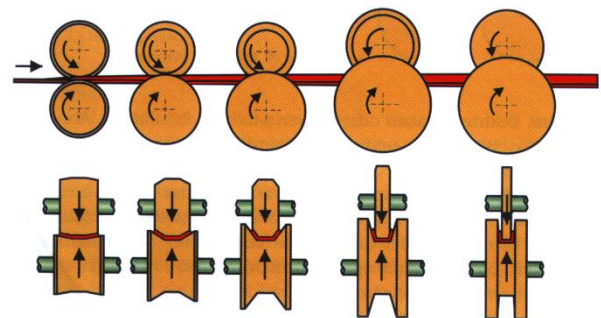


Abb. 177: Walzprofilieren

Schubumformen

- **Durchsetzen (Verschieben):** Dabei werden in der Umformzone benachbarte Querschnittsflächen des Werkstückes in Krafrichtung durch eine geradlinige Bewegung des Werkzeuges parallel zueinander verlagert (verschoben).
- **Durchsetzen (Verdrehen):** Dabei werden benachbarte Querschnittsflächen des Werkstückes in der Umformzone durch eine Drehbewegung gegeneinander verlagert (verschoben) [Beispiele s. S. 42 – 44]

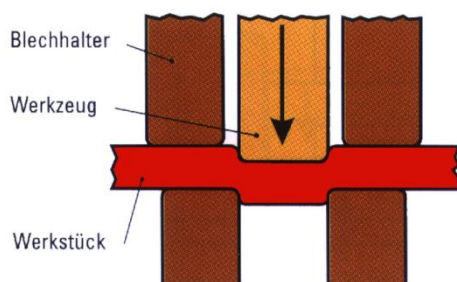


Abb. 178: Verschieben

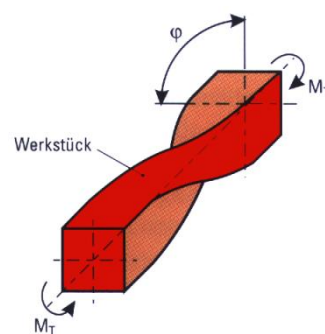
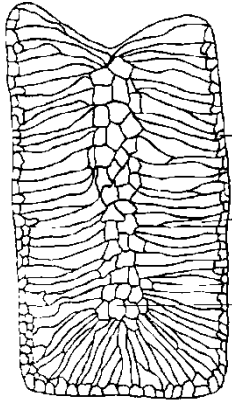


Abb. 179: Verdrehen

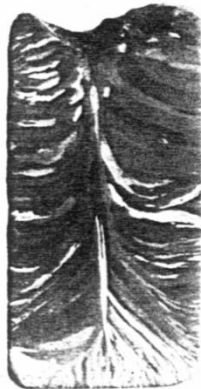
7. Walzen (ca. 80 % ! aller Stahlprodukte sind im Laufe ihrer Herstellung gewalzt worden)

Definition: Walzen ist ein stetiges oder schrittweises Druckumformen mit einem oder mehreren rotierenden Werkzeugen (Walzen) /DIN 8583-2/.

7.1 Werkstoffkundliche Aspekte:



a)



b)

Abb. 180:

Kristallisationszonen an einem Gußstück:

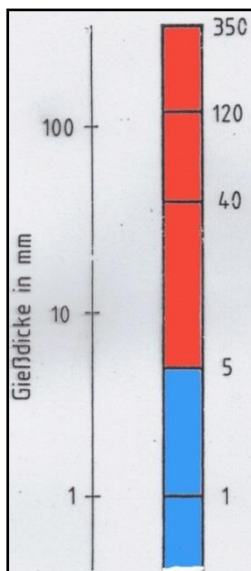
a) schematisch,
b) am Beispiel von Reinst-Zink

s. auch „Gießen“

⇒ Warm-Walzen (und andere Warmumformverfahren) führen gegenüber dem Gussgefüge zu

7.2 Walzerzeugnisse

Warmwalzen dient primär zur Herstellung von Halbzeug* aus Gussmaterial. Die Walzerzeugnisse (nach EN 79-69, s. Tabelle) haben meist gleichmäßige Querschnittsform

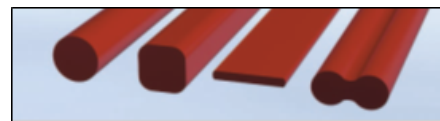


Vorblock   (∅ z.B. 600 mm)

Bramme 

Dünnbramme

Vorband



*Abb.: Halbzeuge
Stangen,

Dünmband

Dünnstband

Abb. 181: Walzerzeugnisse

Kaltwalzen wird primär angewendet bei kleinen Abmessungen, z. B. Feinbleche ($s < 3$ mm), Gewinde ($< M12/M18$)

z.B.: Spezielle Stähle: bis $d = 0,5$ mm; Rein-Al: bis $d = 6,35$ μm (Alu-Folien) bei Walz-v bis 2000 m/min)

→ beachte Vor- und Nachteile von Warm- und Kaltumformen, s.o.

Werkstoffe sind Stähle sowie NE-Metalle (Al- und Cu-Knet-Legierungen) sowie Ni, Ti und Mg.

*Halbzeuge: Walzwerksprodukte, die

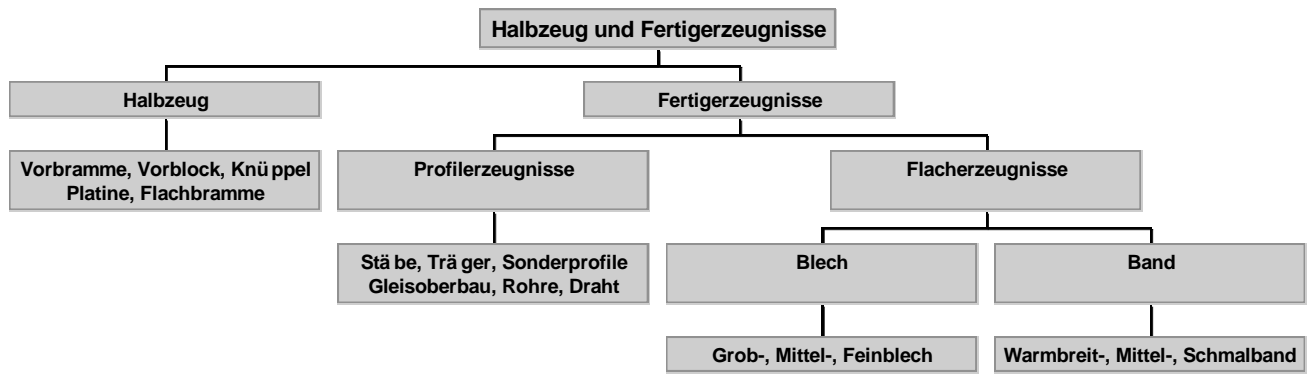


Abb. 182: Übersicht über die Walzerzeugnisse nach Euronorm 79-69

7.3 Der Umformvorgang beim Walzen

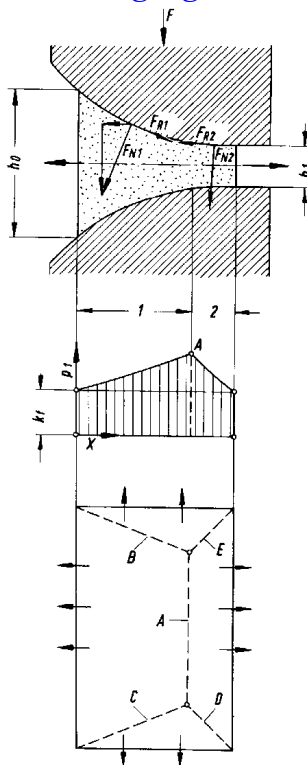


Abb. 183: Umformvorgang in Walzspalt

7.3.1 Geschwindigkeiten beim Walzen

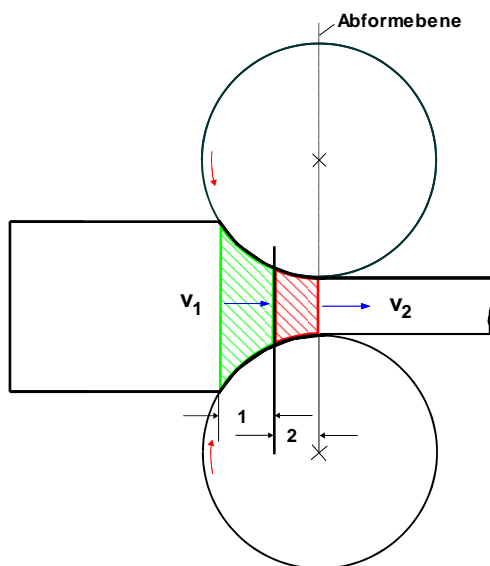


Abb. 184: Geschwindigkeiten beim Walzen

7.3.2 Kräfte beim Greifen und Walzen: → Greif- und Durchziehbedingung

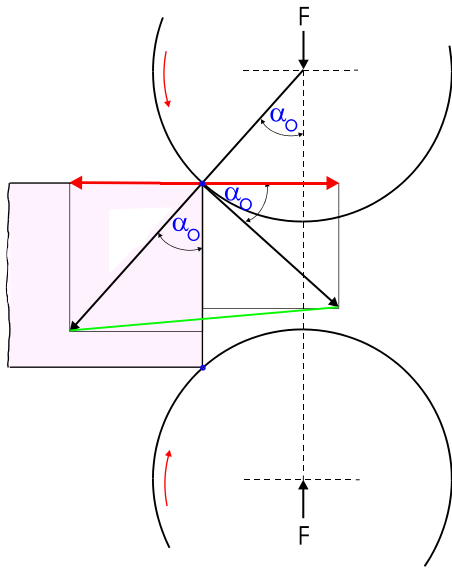


Abb. 185: Kräfte beim Greifen

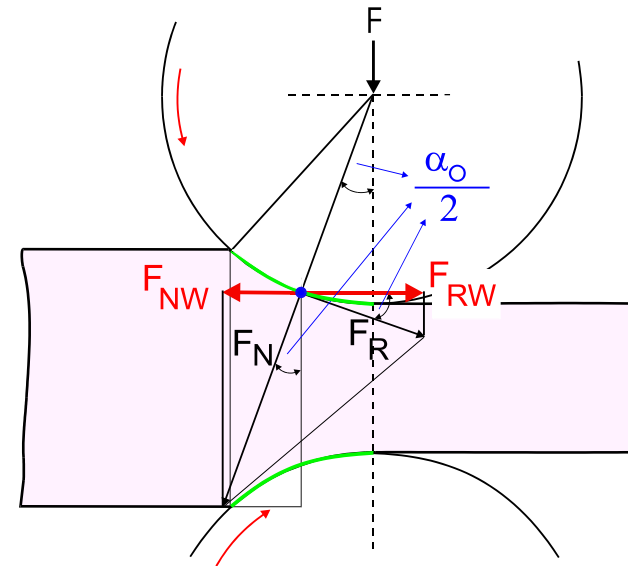


Abb. 186: Kräfte beim Durchwalzen

Greifbedingung

Durchwalzbedingung:

Walzen: Aufgabe

zum Greifen (Durchwalzen) eines Blechstreifens aus Stahl durch ein Walzenpaar

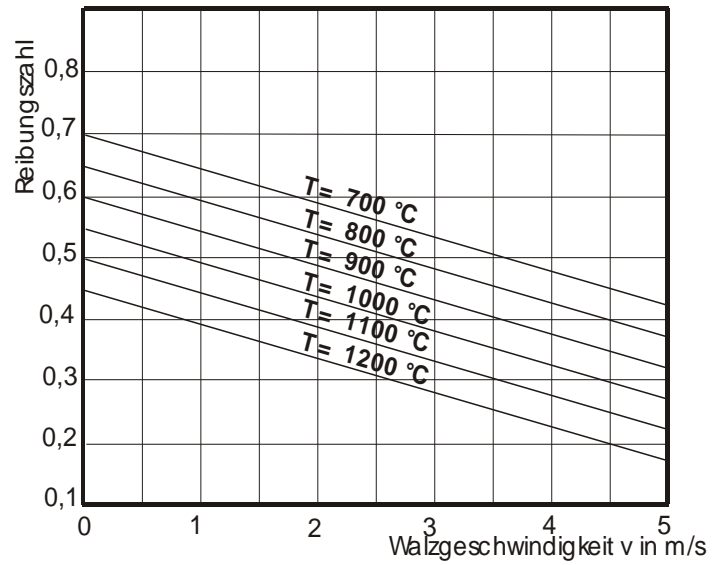
gegeben:

$$T = \theta = 900 \text{ °C}$$

$$v_t = 2 \text{ m/s}$$

gesucht:

größter zulässiger Greifwinkel α_0



Lösung: Greifbedingung/Durchwalzbedingung:



7.3.3: Dickenabnahme beim Walzen

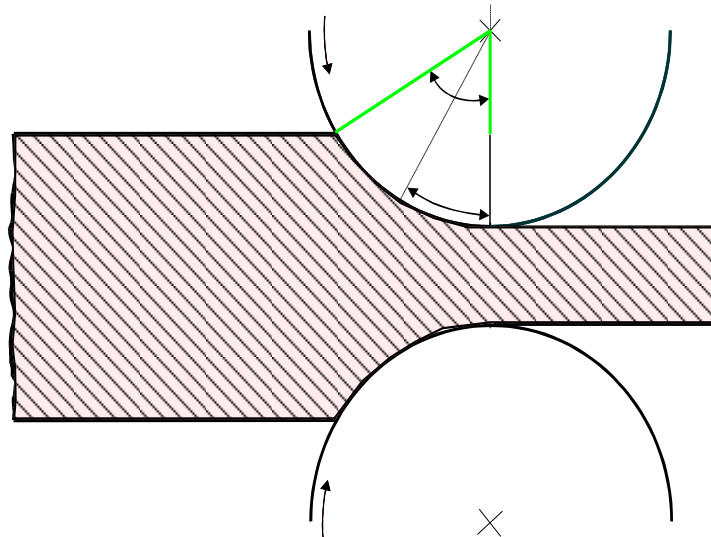


Abb. 187: Dickenabnahme = $f(\text{Eingriffswinkel})$:

Daraus ergibt sich (s. Aufgabe nächste Seite), dass beim Durchziehen eine wesentlich höhere Dickenabnahme erfolgt als beim Greifen \rightarrow deshalb sind Maßnahmen zum Erleichtern des Greifens entwickelt worden:

Erleichtern des Greifens

- Anspitzen des Stranges
- Hineindrücken des Walzgutes in den Walzspalt
- rauhe Walzen
- Kühlen $\rightarrow \mu^{\hat{u}} \rightarrow \rho^{\hat{u}} \rightarrow \alpha_0^{\hat{u}} \rightarrow \Delta h_{\max}^{\hat{u}}$ (s. Abb. 185)
- v reduzieren $\rightarrow \mu^{\hat{u}} \rightarrow \rho^{\hat{u}} \rightarrow \alpha_0^{\hat{u}} \rightarrow \Delta h_{\max}^{\hat{u}}$ (s. Abb. 185)
- $\mu^{\hat{u}}$, z.B. durch Sand)

Walzen: Aufgabe

Berechne die maximale **Dickenabnahme** a) beim Greifen b) beim Walzen von Stahl

gegeben: $T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$
 $v_t = 2 \text{ m/s}$
 $D = 200 \text{ mm (Walzen-}\varnothing\text{)}$
Reibungskoeffizient $= f(v, T)$

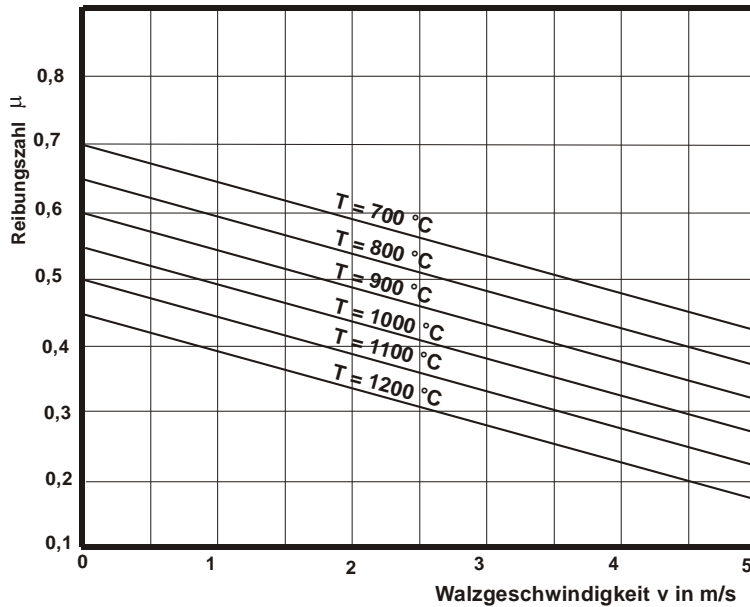


Abb. 188: Reibungszahl als Funktion der Walzgeschwindigkeit und der Temperatur

gesucht: Δh_{\max} beim Greifen und beim Walzen

7.4 Tribologie

Tribologie ist

Tribosystem: Die Gesamtheit der für Verschleiß und Reibung wichtigen Komponenten und Einflussgrößen.

Offene Tribosysteme, z.B. Umformverfahren. Werkzeuge, wie z. B. Gesenke, Walzen, Ziehmatrizen, stellen den Grundkörper dar, der wiederholt (durch stets neue) Werkstücke beansprucht wird.

Geschlossenes Tribosystem: z. B. ein Wälzlager.

Wirkfuge: Grenzschicht zwischen Grund- und Gegenkörper. Dort erfolgt die Reibung.

In der Umformtechnik → das Werkstück bringt die Verschleißbeanspruchung auf das Werkzeug

7.4.1 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!

Je nach Kontaktzustand der Reibpartner unterscheidet man:

1. **Festkörperreibung:** Elastische und plastische Verformungen der Oberflächen treten auf, insbesondere beim weicheren Reibpartner. Dabei wird die Oxidschicht zerstört und es kommt lokal zu Verschweißungen bzw. zu Adhäsion.
2. **Grenzreibung:** Dieser Kontaktzustand stellt die Grenze zwischen geschmierter und ungeschmierter (trockener) Reibung dar. Es genügen bereits geringste Fettmengen, damit die Festkörperreibung zur Grenzreibung wird, denn Fettsäuren bilden mit der Oxidschicht Metallseifen, die sehr gute Schmiereigenschaften haben.
3. **Mischreibung:** Grenzreibung und Flüssigkeitsreibung treten in kleinen Bereichen nebeneinander auf.
4. **Flüssigkeitsreibung** (hydrodynamische Schmierung): Die Reibpartner sind durch einen Schmierfilm ganzflächig getrennt.

Optimal (geringster Verschleiß und Energieverlust) → hydrodynamische Schmierung.

Beim Umformen liegt im Allgemeinen Mischreibung vor, gelegentlich auch Grenzreibung (Gesenkschmieden). Hydrodynamische Schmierung wird z.B. gezielt beim hydrostatischen Fließpressen eingesetzt.

Schlecht: Festkörperreibung. Sollte möglichst vermieden werden. Beim Umformen würden die Werkzeuge schon nach kürzester Zeit unbrauchbar.

7.4.2 Schmierstoffe

Es gibt eine große Anzahl von Schmierstoffen, die je nach Einsatzbereich angewendet werden, z.B. dutzende Öle und Fette, Graphitsuspensionen, Glasperlen, Holzmehl, MOS_2 -Wasser Suspensionen, (Kern-) Seifenlösungen, Teflonfolien, Kalk-Wasser-Lösungen etc.

Schmierstoffe für die Kaltmassivumformung

Kalk (Kälken):

Unter Kälken versteht man ein Eintauchen der Rohlinge in eine auf 90 °C erwärmte Lösung aus Wasser mit 8 Gewichtsprozent Kalk. Kälken ist nur für Stahl bei geringen Umformungen verwendbar.

Seife:

Hier verwendet man z. B. Kernseifenlösungen mit 4 - 8 Gewichtsprozent Seifenanteil bei 80 °C und einer Tauchzeit von 2 - 3 min. Ihr Einsatz ist bei mittleren Schmieranforderungen gegeben.

Mineralöle (evtl. mit geringen Fettzusätzen):

Diese unter der Bezeichnung Pressöle auf dem Markt befindlichen Schmiermittel sind für hohe Schmieranforderungen vor allem bei automatischer Fertigung geeignet. Sie übernehmen neben der Schmierung noch zusätzlich die Aufgabe des Kühlens.

Molybdändisulfid (Molykote-Suspensionen):

Bei den Schmiermitteln auf Molybdändisulfid-Basis, die für höchste Schmieransprüche geeignet sind, verwendet man überwiegend MOS_2 -Wasser Suspensionen. Die Tauchzeit liegt zwischen 2 und 5 Minuten bei einer Temperatur von 80° C. Die Konzentration liegt im Mittel bei 1:3 (d. h. 1 Teil Molykote, 3 Teile Wasser). Bei besonders schwierigen Umformungen verwendet man höher konzentrierte Suspensionen. Es gibt auch Hochdruckzusätze, die bei Umformdrücken ab 3 MN/mm² zur Anwendung kommen. Bei der Anwendung in der Halbwarmformgebung ist sicherzustellen, dass die Hochdruckzusätze nicht in toxische Zerfallsprodukte (z. B. Dioxine) umgesetzt werden.

Schmierstoffe für die Blechumformung

Für das **Tiefziehen** reichen in der Regel reine Gleitmittel wie **Ziehöle oder Ziehfette** aus, die eine unmittelbare Berührung von Werkstück und Werkzeug verhindern. Phosphatierte oder verzinkte Bleche können bis ϕ ca. 0, 1 (evtl. bis 0,2) **ohne Ziehöle oder Ziehfette** umgeformt werden. Das bietet den Vorteil, dass vor dem Lackieren nicht entfettet werden muss.

Schmierstoffe für die Warmformgebung (Gesekschmieden):

Beim Gesekschmieden verwendet man als Schmier- und Gleitmittel gelegentlich noch Sägemehl und in automatisierten Anlagen Graphitsuspensionen. Bei beiden Schmiermitteln entsteht im Gesenk

a) ein Gasdruck, der das Ausformen unterstützt

b) Kohlenstoff, der der Randentkohlung entgegenwirkt.

optimale Ergebnisse erhält man mit 4 % kolloidalem Graphit in Wasser oder Leichtöl (kolloidal bedeutet "in feinsten Verteilung"). Bei den Flüssigschmiermitteln muss jedoch die Dosierung beachtet werden. Zu viel Suspension erhöht den Gasdruck im Gesenk und **erschwert die Formgebung**.

7.4.3 Oberflächenbehandlung

Zur Optimierung der Wirkung der Schmiermittel ist oftmals Schmiermittelträgerschicht (s.u.) auf den Werkstücken nötig. Im Unterschied dazu hat die Oberflächenbehandlung der Werkzeuge in der Regel die Aufgabe, eine verschleißfeste (harte) Werkzeugoberfläche herzustellen.

Oberflächenbehandlung der Werkstücke:

(erfolgt auch mit Hilfe von Spanlosen Fertigungsverfahren, hier eine Kurzzusammenfassung)

a) Beizen

Mit dem Beizvorgang werden oxidische Überzüge (Rost, Zunder) entfernt. Beizen dient oft als **Ausgangsbasis für die eigentliche Oberflächenbehandlung**, weil nach dem Beizen die Oberfläche des Rohlings „metallisch rein“ ist. Als Beizmittel verwendet man verdünnte Säuren. Für nicht rostfreien Stahl (Baustahl etc.) z. B. 10 %ige Schwefelsäure (Vol-%). Das Beizen wird bei der Drahtvorbehandlung zum Drahtziehen in großtechnischem Maßstab eingesetzt.

b) Phosphatieren

Wenn man auf einen „metallisch reinen“ (gebeizten) Rohling als Schmiermittel Fett, Öl oder Seife unmittelbar aufbringt, dann hat das Schmiermittel nur geringe Wirkung. Der Schmierfilm wird ab Umformdrücken von ca. 300 N/mm^2 abreißen und es kommt zum Kaltverschweißen. In der Regel ist ein zweiter Arbeitsgang ohne Nachölen nicht möglich. Deshalb ist eine Schmiermittelträgerschicht sehr hilfreich. Hierfür haben sich **Phosphate bewährt**. Mit dem Phosphatieren wird eine nichtmetallische, auf dem Grundwerkstoff **fest haftende, poröse Schmiermittelträgerschicht** auf den Rohling aufgebracht. In diese Poren diffundiert das Schmiermittel ein. Die Schichtdicken des aufgetragenen Phosphates liegen zwischen 5 und 15 μm . Solche Schichten können bis zu **14 mal mehr Schmieröl aufnehmen** als Oberflächen, die nur gebeizt sind. Phosphatschichten dienen auch bei Zwischenlagerungen als (temporärer) Korrosionsschutz und sind eine gute Vorbehandlung für Tauch- und Spritzlackierungen.

c) Oxalatieren

Hochlegierte Stähle werden von Phosphorsäure nur langsam angegriffen. Phosphatieren ist deshalb aus Zeitgründen kein geeignetes Verfahren **für hochlegierte Stähle**. Die Alternative sind Oxalatschichten. Nach dem Umformen können Oxalatschichten durch alkalische Tauchreinigungen entfernt werden. Von der Oxalierung kann man folgende Vorteile erwarten: Höhere Ziehgeschwindigkeiten bei stärkeren Querschnittsreduktionen, erhöhte Werkzeugstandzeiten, geringeren Ausschuss durch Vermeidung von Rattermarken, Riefen und Materialabrissen. Dafür muss allerdings eine verhältnismäßig große Oberflächenrauigkeit des gezogenen Materials (nach der Reinigung sichtbar) in Kauf genommen werden.

Oberflächenbehandlungen der Werkzeuge (erfolgt auch mit Hilfe von Spanlosen Fertigungsverfahren, hier eine Kurzzusammenfassung)

Der Verschleißwiderstand der Werkzeuge wird im Allgemeinen durch Härten dieser Werkzeuge oder durch Oberflächenbehandlungen erzeugt. Auf den Verschleiß wird im folgenden Kapitel eingegangen. Hier sei nur so viel vorweggenommen, dass es sich um ein System von (mindestens) drei Komponenten handelt: Werkzeug, Werkstück und Schmiermittel. **Vergleiche von Verschleißschutzschichten** sind demnach nur sinnvoll, wenn auch die beiden anderen Systemkomponenten (Werkstück, Schmiermittel) mit berücksichtigt werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Behandlungsverfahren von Werkzeugen bezüglich der **Verschleißminderung** genannt und gegebenenfalls dazu die typischen Anwendungsbereiche. Für weitergehende Informationen zu den Verfahren empfiehlt sich das Studium der Fachliteratur zur Werkstoffkunde.

a) Randschichthärtung

Hierzu gehören Flamm-, Laser- und Hochfrequenzhärten. Das Härten erfolgt durch Martensitbildung beim Abschrecken. Anwendungen sind bei Maschinenbauteilen gegeben, aber auch im Werkzeugbau, z. B. bei wechselbaren Werkzeugaktivelementen (Ziehringe, Ziehwalze, vgl. Tiefziehen).

b) Thermochemische Oberflächenbehandlung

Die wichtigsten Verfahren sind:

- Carbonitrieren und Nitrieren (gegen Oberflächenzerrüttung),
- Eisenborid bzw. Vanadiumkarbid ($\text{HV}_{0,2} > 2200$, gegen abrasiven Verschleiß),

- CVD (chem. Abscheiden aus der Gasphase von TiC, TiN, Eisenkarbiden und Chromkarbiden)
- Ionenimplantieren.

Karbidschichten werden vor allem für Pressstempel und -matrizen eingesetzt. Sie halten hohen Flächenpressungen auch im Kantenbereich stand (einige kN/mm^2).

c) Auftragschweißen

Auftragsschweißen ist häufig bei Reparaturen an großen Werkzeugen die kostengünstigere Alternative (Karosseriewerkzeuge) zum Einbau neuer Aktivelemente. Auftragsschweißen ist mit MIG-Schweißen und Laserstrahl-Handschweißen möglich.

d) Flamspritzen

Zur Anwendung kommen meist Molybdän oder Aluminid (ein Al-Ni-Gemenge). Sie zeichnen sich durch relativ gute Schichthaftung aus und sind geeignet für Reparaturzwecke als Alternative zum Auftragsschweißen, wenn größere Werkzeugflächen aufgefrischt werden müssen.

e) Plasmaspritzen

Es sind höhere Spritztemperaturen als beim Flamspritzen möglich, dadurch können höher schmelzende Überzüge erzeugt werden (HV 2: 3000; Karbide und Oxide, z. B. Wolframkarbid). Stanz- und Schneidwerkzeuge werden erfolgreich hiermit beschichtet.

f) Galvanochemische Verfahren

Dies sind die klassischen Beschichtungsverfahren von Werkzeugen. Nickelüberzüge werden nur mit Zusätzen hart, Chrom erreicht Härten bis HV 1900 (Standard HV 900). Während des Beschichtens entweicht Wasserstoff, der die Chromschicht mikrorissig macht. Die Schichthaftung ist sehr gut und hält hohen Prägekräften stand. Durch Entchromen und anschließendes erneutes Verchromen lassen sich verschlissene Werkzeuge bis zehnmal (und öfter) auffrischen.

Die letzten vier genannten Verfahren sind ausgesprochen reparaturfreundlich, d. h. Werkzeuge lassen sich gegebenenfalls mehrfach auffrischen.

In der Umformtechnik kommt es bei Verwendung flüssiger Schmierstoffe meist zu Mischreibungszuständen.

7.4.4 Die Reibungszahl μ :

Die Bestimmung der Reibungszahl μ 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) $|F_r| = \mu \cdot |F_n|$ mit F_r als Reibungskraft und F_n als Normalkraft
 (2) $|\tau_r| = m \cdot k$ mit m als Reibungsfaktor ($0 < m < 1$), τ_r als Reibungsschubspannung und k 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:

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: Richtwerte für Reibungszahlen bei ausgewählten Umformprozessen.

Für **Stahl gilt im Warmwalzbereich** von $700\text{ °C} < T < 1200\text{ °C}$ für $0\text{ m/s} < v_t < 5\text{ m/s}$ annähernd:

$$\mu = 1,05 - 0,5 \cdot 10^{-3} T - 0,056 - 0,05 \cdot v_t \quad \text{s. auch graphische Darstellung zur Aufgabe Walzen/6}$$

Das Ergebnis ist je nach Walzenwerkstoff wie folgt zu korrigieren:

$\mu - 0,1$ für Hartgußwalzen, $\mu - 0,2$ für geschliffene Hartgußwalzen oder Stahlwalzen
 Für Aluminiumwerkstoffe kann man in erster Näherung rechnen mit: **$0,25 \leq \mu \leq 0,35$**

Für das **Kaltwalzen von Stahl** gilt: **$0,07 \leq \mu \leq 0,15$**

$\mu \neq f(T, v_t)$ aber

$\mu = f(\text{Werkstoff, Oberfläche, Schmierung, etc., s.o.})$

Weiterführende Literatur: Lange (s.o.), S 239 – 306 („Tribologische Grundlagen“)

7.5: Kraft und Arbeitsbedarf: Berechnung

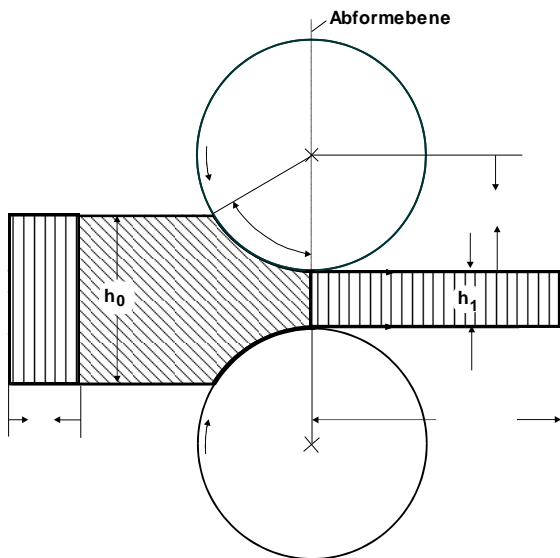


Abb. 189: Walzen: Kraft- und Arbeitsbedarf

Walzen: Aufgabe

Thema: Kaltwalzen von Stahlblech (Ck 10):

gegeben:

$b_0 (\approx b_1) = 1000$ mm (Breite)
 $h_0 = 10$ mm (Dicke)
 $h_1 = 6,3$ mm (End-Dicke)
 $2r = 600$ mm (Walzen- \emptyset)
 $v_t = 0,1$ m/s (Walzenum-
fangs-v)
 $\mu = 0,1$ (Reibbeiwert)
 $\eta_f = 0,4$ (FÄ-Wirkungsgrad)
Fließkurve für Stahl Ck10

gesucht:

F_{tr}, F_{tid} (Walzkraft)
 M_r (Walzmoment)
 P_r (Walzleistung)

Lösung:

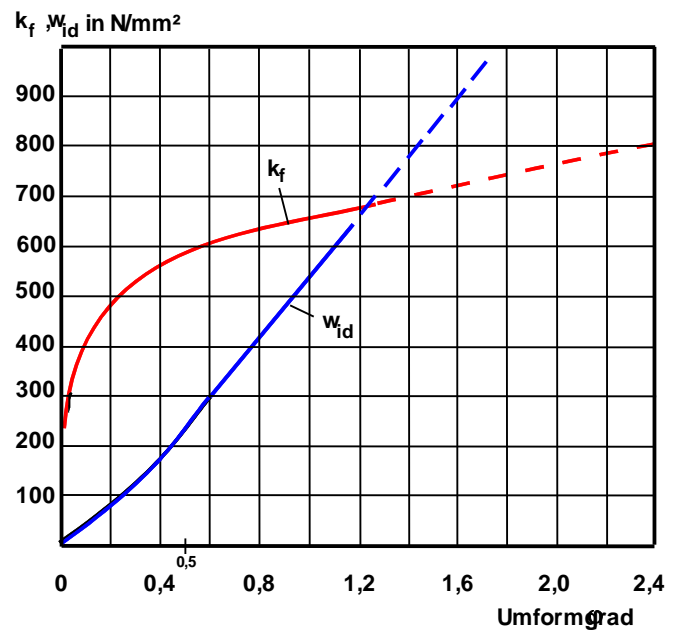


Abb. 190: Fließkurve für Stahl Ck10

7.6 Walzverfahren

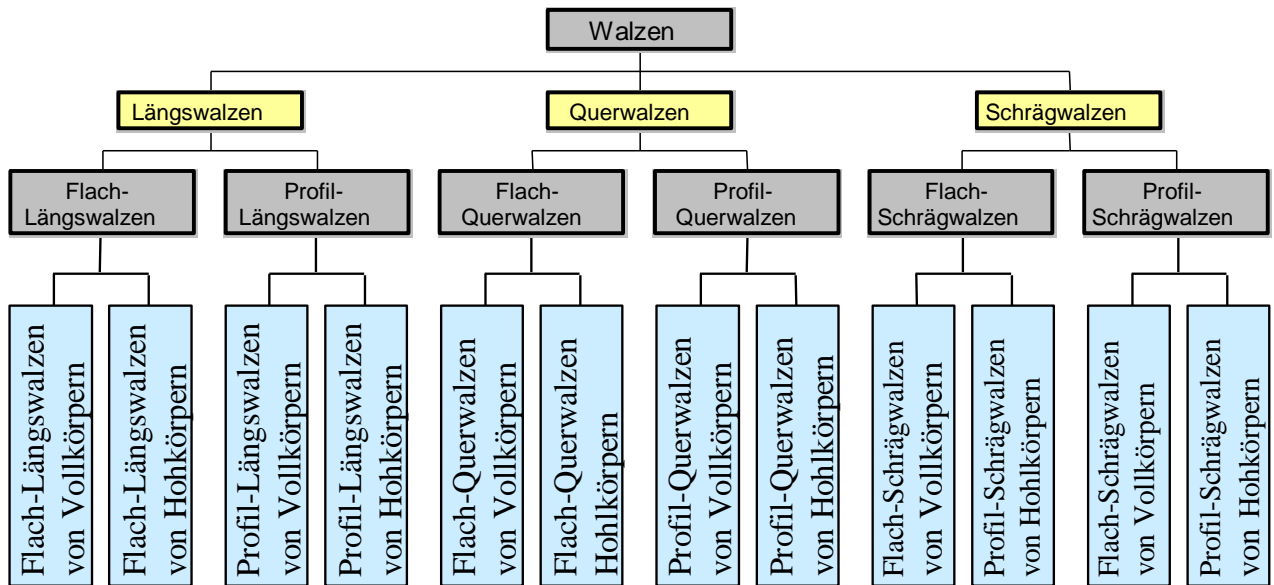
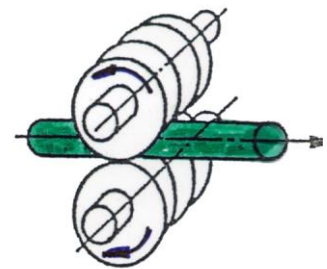


Abb. 191:
Ordnungssystem der Walzverfahren nach DIN 8583, B1.2

7.6.1 Längswalzen

-
-
-



Produkt: Halbzeuge (Strang)

7.6.1 Beispiele zu den Walzverfahren: Längswalzen

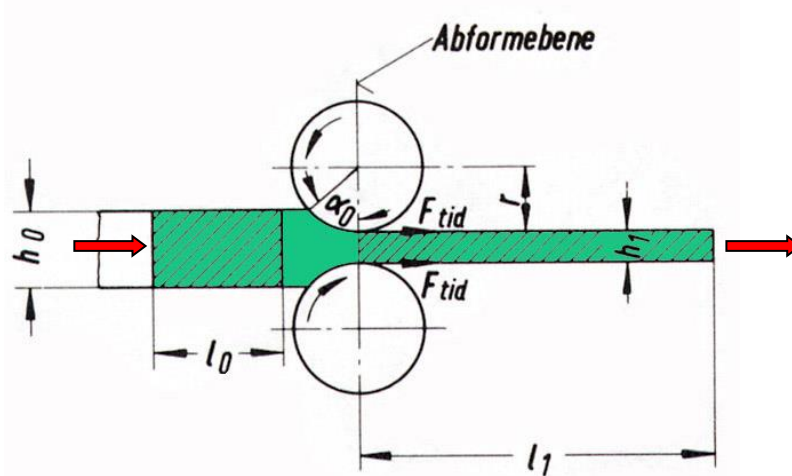


Abb. 192: Blechwalzen

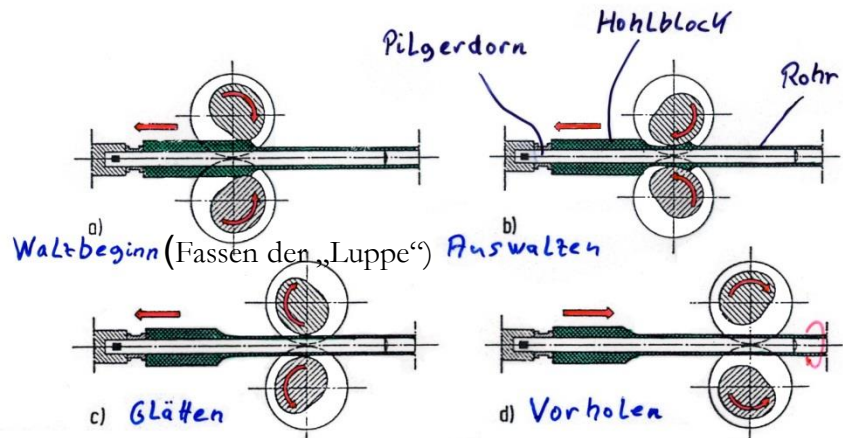


Abb. 193: Rohrwalzen: Pilgerschrittverfahren → Video

→ eigentliche Walzrichtung
← Schritte a) b) c)

} **Pilgerschritt**

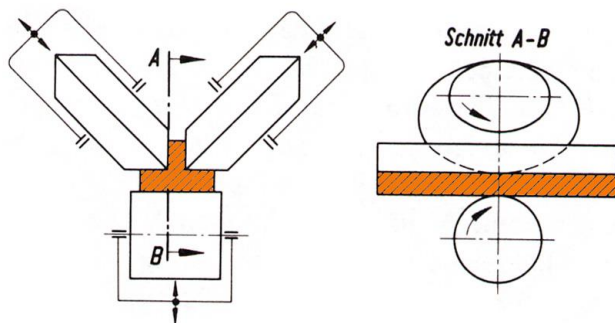


Abb. 194: Walzen von T-Trägern

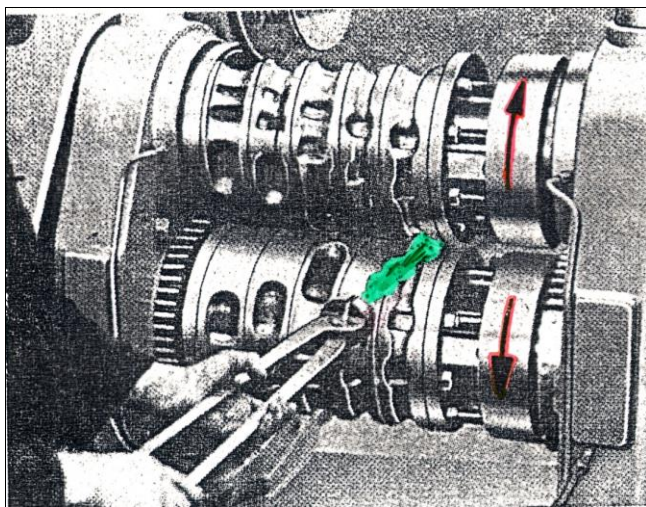
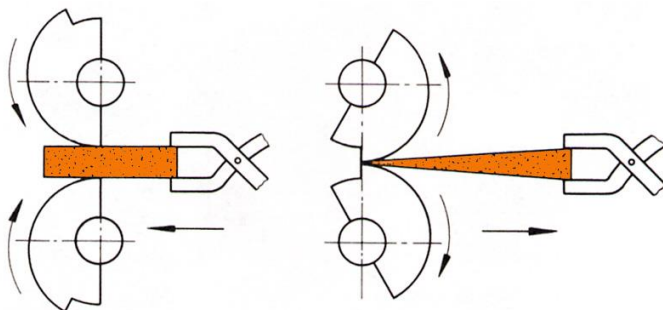
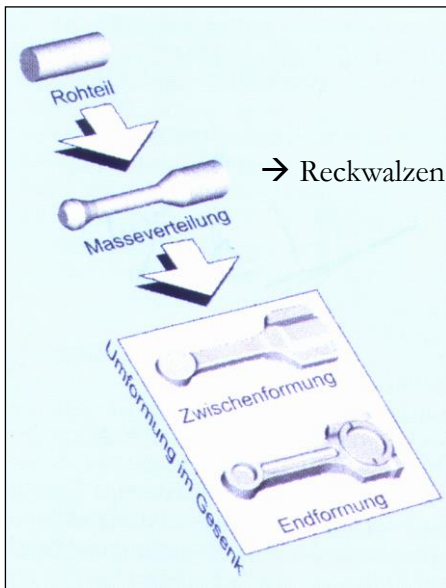


Abb. 195: Reckwalzen → Massenverteilung (sprunghafte Querschnittsänderung)

Abb. 196: Reckwalzen zur Vorbereitung des (Halbwarm-Präzisions-) Gesenk-Schmiedens:

☐ **Verfahrensschritte**



$T < 900 \text{ °C} \Rightarrow 10\mu\text{m} < Rz < 14\mu\text{m}$

$T \text{ rel.} \downarrow \Rightarrow \text{Zunder} \downarrow \Rightarrow \text{Genauigkeit} \uparrow$ Aber: $\Delta T \Leftrightarrow \Delta K_f \Leftrightarrow \Delta \text{Formfüllung}$ (filigrane Teile), Schmierung (Graphit), therm. + elast. Dehnung!



Endprodukt: Pleuel (120 mm lang)



Reckwalzen (Massenverteilung)

Vorgrawur

Fertigrawur

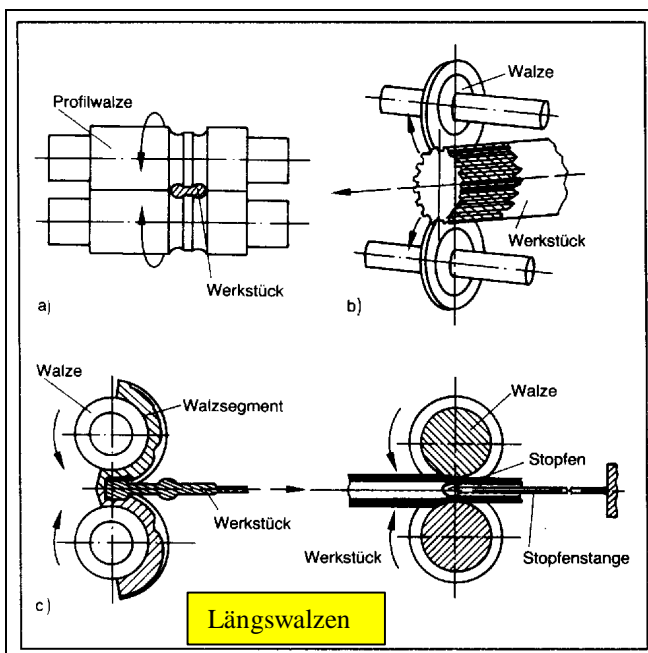


Abb. 197: Längswalzen (aus DIN 8583)

- a, b) Längsprofilwalzen
- c) Reckwalzen
- d) Rohrwalzen

7.6.2 Querwalzen

-
-
-

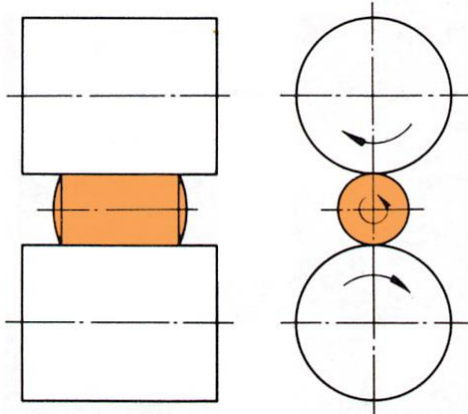
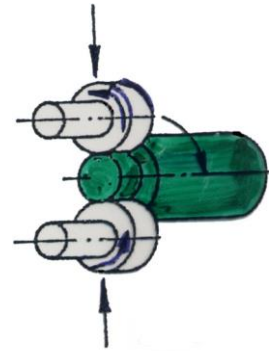


Abb. 198: Rundstückwalzen

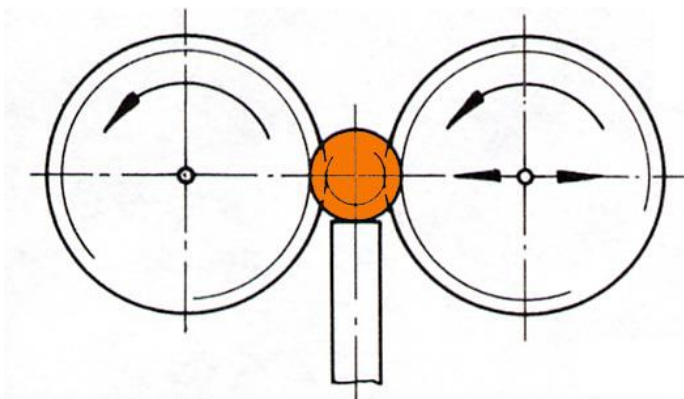


Abb. 199: Gewindewalzen

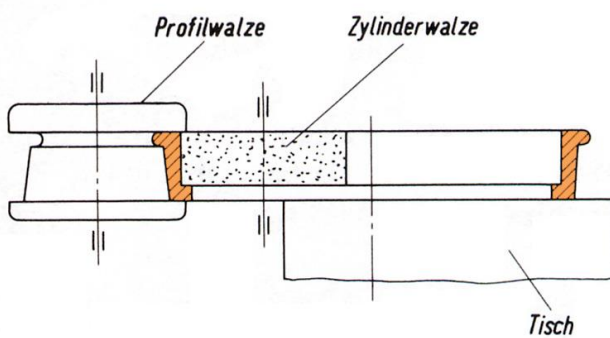


Abb. 200: Ringwalzen

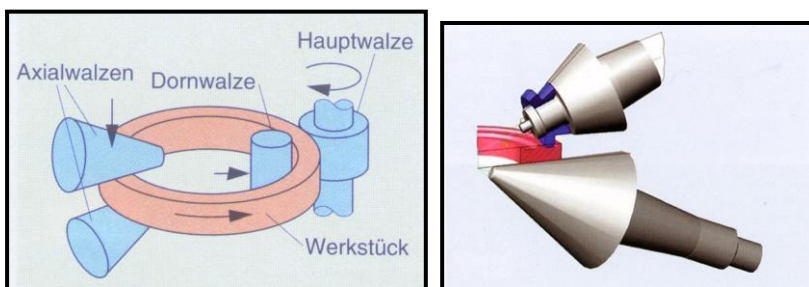


Abb. 201: Ringwalzen
Prinzipskizzen



Abb. 202: Ringwalzen: Fotos

Anwendung:

primär zur Herstellung von nahtlosen Ringen mit rechteckigem Querschnitt

Ausgangsmaterial:

geschmiedete und gelochte Scheibe

Abmessungen:

von 100 bis 10000 mm Durchmesser (16 t) und 20 bis 1500 mm Höhe

Produkte:

Kugellagerringe, Eisenbahn-Laufradbandagen, Kupplungsmuffen bei Ölbohrgestängen, Großwälzlager, Bergbau, Kraftwerke

Vorteile: (vor allem bei Einzelstücken und kleinen Serien)

Oft keine Kosten für spezielle Werkzeuge, praktisch unbegrenzte Formgebungsmöglichkeiten

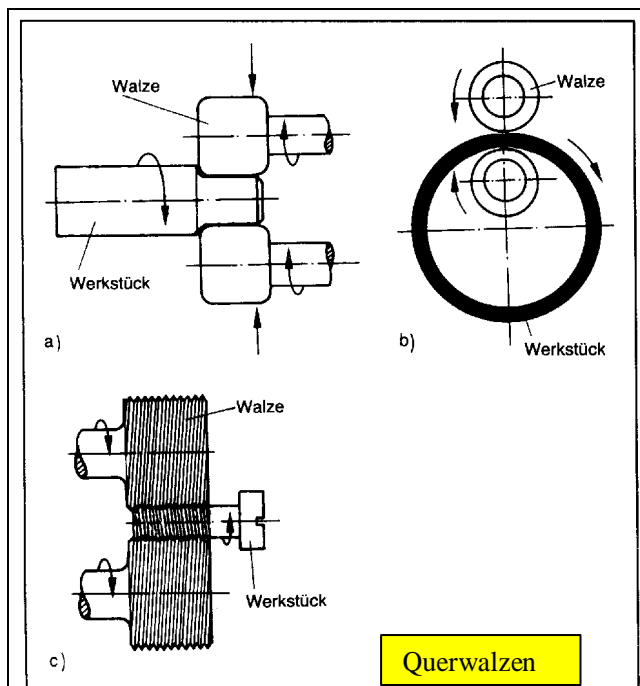
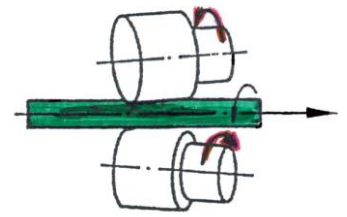


Abb. 203: Aus DIN 8583, Bl.2:

- a) Glattwalzen
- b) Ringwalzen
- c) Gewindewalzen

7.6.3 Schrägwalzen

-
-
-
-



Beispiel zum Schrägwalzen:

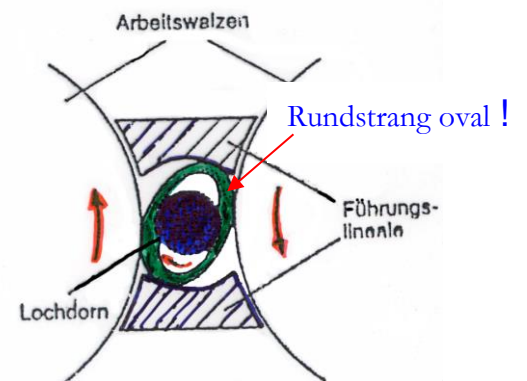
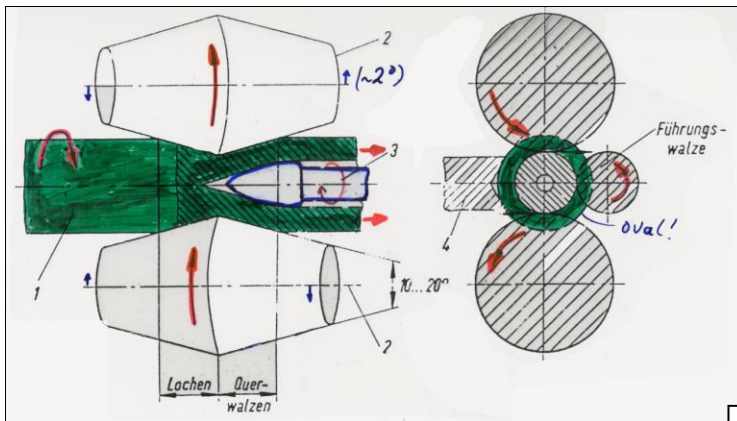


Abb. 204: Schrägwalzen von Rohren aus Vollmaterial

- 1) Rundstrang (voll)
- 2) Walzen (Doppelkegel unter $3 - 6^\circ$)
- 3) Dorn (rotiert)
- 4) Auflage

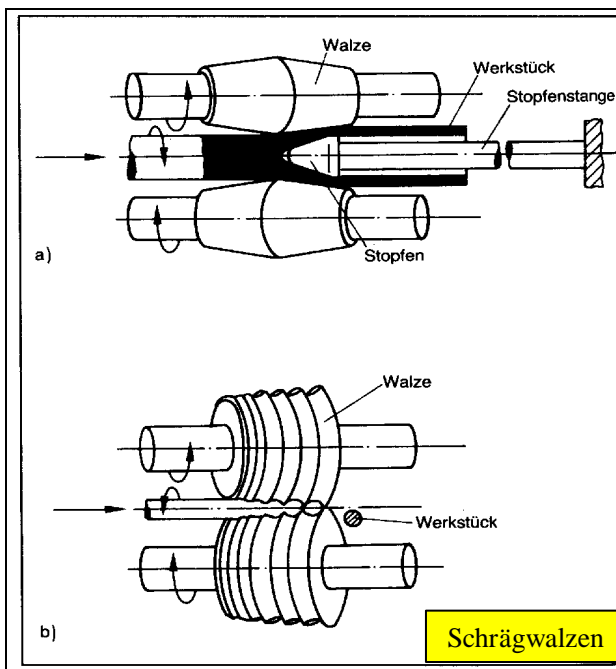


Abb. 205: Aus DIN 8583, Bl.2:

- a) Rohrwalzen b) Kugelwalzen

7.7 Walzenarten/ -körper/ gerüste

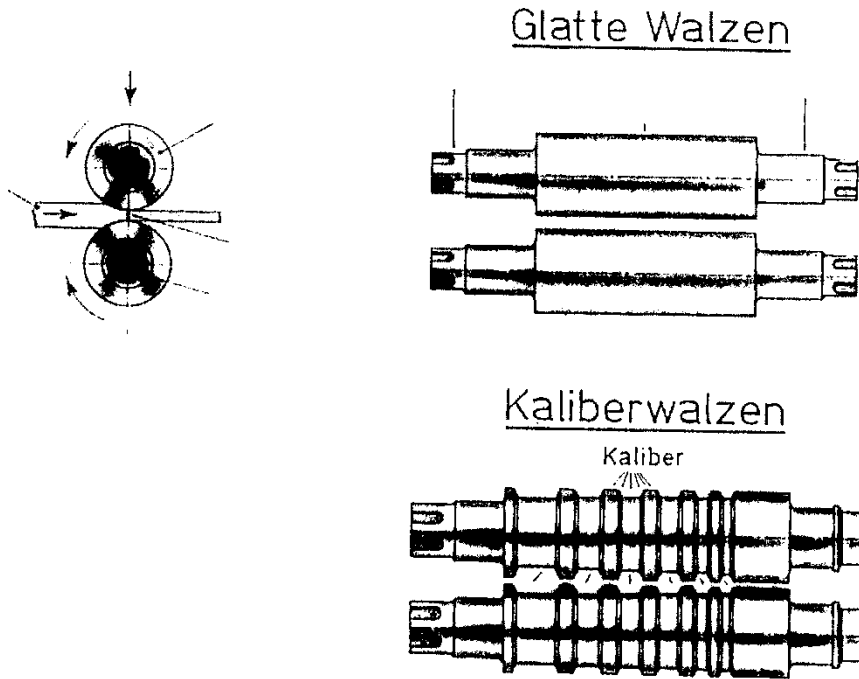
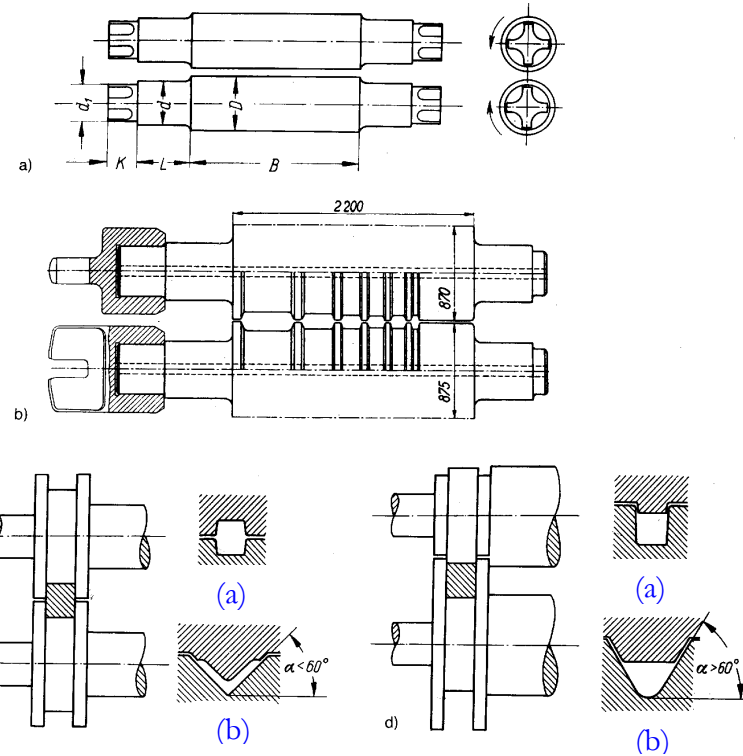


Abb. 206: Walzenarten:

Man unterscheidet:

-
-
-



Wenn die Kaliberöffnung zwischen den unbelasteten Walzen durch Linien parallel zur Walzenachse (a) oder unter einem Kaliberöffnungswinkel $< 60^\circ$ (b) gebildet wird.

Wenn die Kaliberöffnung zwischen den unbelasteten Walzen durch Linien annähernd senkrecht zur Walzenachse (a) oder unter einem Kaliberöffnungswinkel $> 60^\circ$ (b) gebildet wird.

Walzengerüste

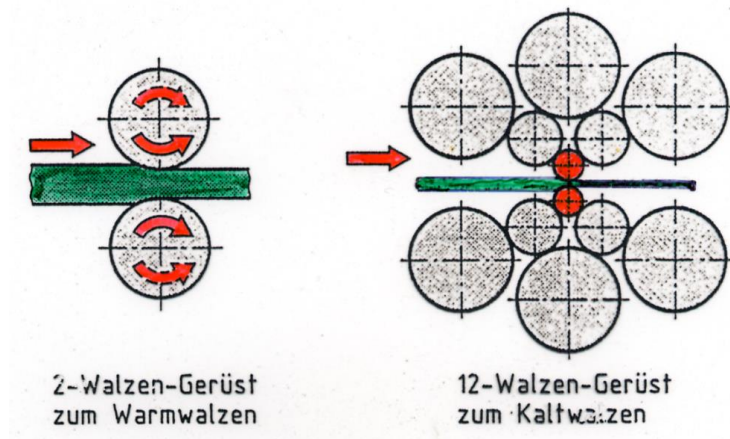


Abb. 208: Walzengerüste zum Kalt- und Warmwalzen

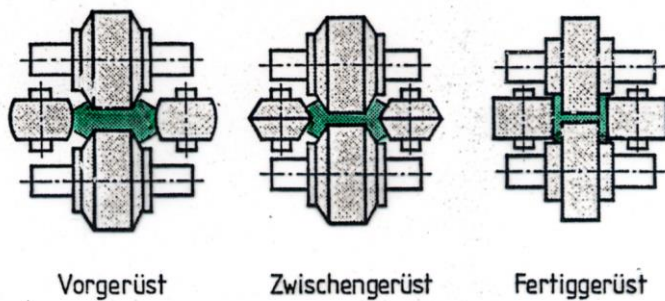


Abb. 209: Walzengerüste für **I**-Profile (

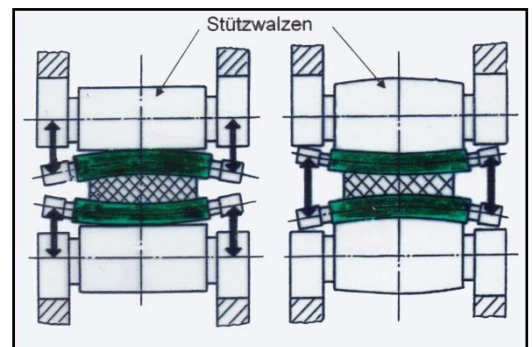


Abb. 210:

Ausgleich der Walzenlinie durch gezieltes Gegenbiegen der Arbeitswalzen durch Stützwalzen, s. auch nächstes Bild

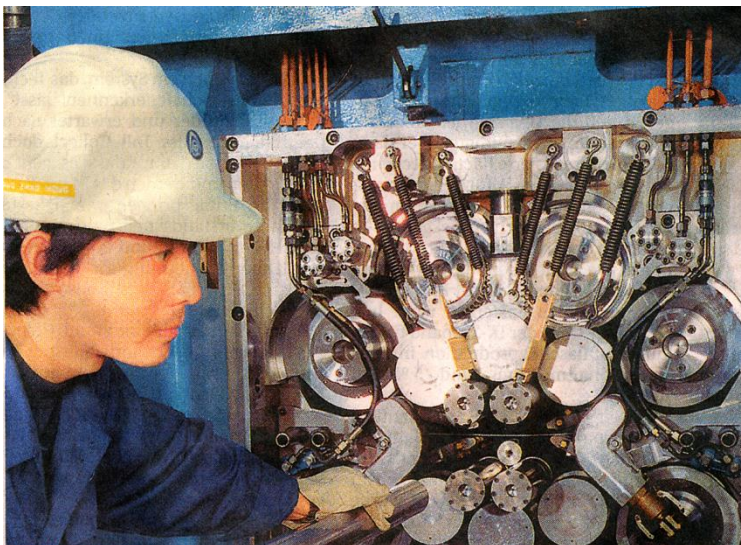


Abb. 211:

20 Rollen Walzengerüste für

7.8 Walzenwerkstoffe

Walzen werden je nach Verwendungszweck aus verschiedenen Werkstoffen hergestellt

a) Warmwalzen

- geschmiedeter Stahl ⇒
- Stahlguß ⇒
- Halbhartguß ⇒
- Mildhartguß ⇒
- Schalenhartguß ⇒
- Indefiniteguß ⇒
- Sphäroguß ⇒

b) Kaltwalzen)

es werden geschmiedete + gehärtete Walzen verwendet

→ hohe Ansprüche da $K_f \uparrow$ + Oberflächengüte \uparrow + Standzeit \uparrow

- 2 - 3,5 %ige Cr-Stähle mit ca. 0,8 %C (+ Leg.)**
⇒ Schalenhärter mit HRC \uparrow für hohe Ansprüche an die Oberfläche,
z.B. 72 CrMnMo 6 3
- 5 - 7 %ige Cr-Stähle mit ca. 0,6 - 0,8 %C (+ Leg.)**
⇒ durchgehärtet, Verschleißfestigkeit \uparrow , unempfindlich da hohe Anlaß-T ,
z.B. X63 CrMoV 5 1
- 12 %ige Cr-Stähle mit ca. 1,6 %C (+ Leg.)**
⇒ durchgehärtet, Verschleißfestigkeit $\uparrow\uparrow$, hohe Anlaß-T (unempfindlich), hoch
druckbelastbar, z.B. X155 CrMoV 12 1
- verschiedene hochlegierte Schnellarbeits-Stähle**, z.B. S 6- 5-3

i.a. werden Duo-, Quarto- oder Vielrollen-Gerüste benutzt [evtl. Vorwärmung ($A_v \uparrow$), dann $T \uparrow$
durch innere Reibung]

Walzenwerkstoffe_2

Walzen werden je nach Verwendungszweck aus verschiedenen Werkstoffen mit unterschiedlichen Eigenschaften hergestellt z. B. aus

- a) **geschmiedetem Stahl**, geeignet für Blockwalzen
- b) **Stahlguß** mit geringer Festigkeit aber besserer Temperaturwechselbeständigkeit. Walzen aus Stahlguß werden dabei für leichtere Block- und Vorstraßen verwendet. Stahl und Stahlgußwalzen können nach Verschleiß durch Auftragschweißen wieder instand gesetzt werden
- c) **Halbhartguß**, gegossen in Sand ausgekleideten Kokillen und daher mit feinperlitischem Gefüge, eignet sich sowohl für Knüppelwalzen als auch für schwere Profil- und Grobblechwalzen
- d) **Mildhartguß** in normalem Kokillenguß hergestellt, hat keine karbidische Schicht, ist feinkörnig und verschleißfest. Walzen aus diesem Guß werden verwendet zum Walzen feiner Knüppel, von Rundstahl und mittlerem bis feinerem Profilstahl.
- e) **Schalhartguß**, in Kokillen gegossene Walzen, wobei die Abschreckwirkung eine harte, karbidische Schicht hinterlässt, während der übrige Querschnitt sowie der Zapfen grau erstarren. Tiefe Einarbeitung der Kaliber ist hier nicht zweckmäßig. daher werden diese Walzen für kleinere Profile verwendet.
- f) **Indefiniteguß**, ein Hartguß, der jedoch nur geringe Härteannahme vom Rand zum Kern zeigt, daher sind tief eingeschnittene Kaliber möglich.
- g) **Sphäroguß**, Walzen aus Gußeisen mit Kugelgrafit sind wegen ihrer hohen Festigkeit dort geeignet, wo höherer Walzdruck bei Vor- und Fertigstraßen auftritt.

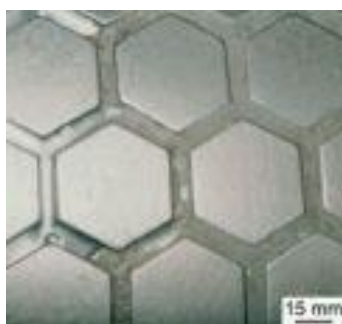
Neue Walzenwerkstoffe

05.09.05: Der mechanische Verschleiß etwa von Walzenoberflächen oder Rollen kostet die deutsche Wirtschaft jährlich ca. 60 Milliarden Euro. Abhilfe schaffen pulvermetallurgische Werkstoffe, die sich durch große Härte bei gleichzeitiger Zähigkeit auszeichnen. Sie sind effizient und haltbar, bislang aber aufwändig und teuer in der Herstellung.

Auf die Beschichtung kommt es an: Die neuen pulvermetallurgisch hergestellten Schichten bestehen aus Hartstoffen, z.B. Keramik, die in eine Umgebung aus weicherem Metall eingebettet sind. Bei Walzen, die etwa in großen Mühlen zum Einsatz kommen, stellen sich die harten Partikel dem Mahlgut in den Weg und verhindern die Bildung von Furchen, während die weichere Umgebung Risse stoppt. Mit diesen sog. Metallmatrix-Verbundwerkstoffen lässt sich die Lebensdauer von Verschleißteilen bis um das 50-fache steigern. Einziger Haken: Die Herstellung der neuen Werkstoffe ist kompliziert und teuer; es bedarf zum "Zusammenbacken" der Komponenten sehr hoher Temperaturen und Drücke über lange Zeit. Das "Backen" der Werkstoffe im Ofen beschränkt außerdem ihre Größe auf etwa 1,5 Meter Durchmesser.

Walzen statt Gasdruck: Günstiger und schneller werden soll die Prozedur durch das sog. Radial-Axial-Ringwalzen: Nach dem Erhitzen auf Temperaturen oberhalb 1100° C in einer Blechkapsel im Ofen wird der beschichtete Ring gewalzt. Dadurch verdichtet sich die Pulverschicht und wird in Form gebracht. Aus einem Vollmaterialring, der mit 1,5 Metern Durchmesser aus dem Ofen kommt, kann so eine Walze von bis zu 6 Metern Durchmesser werden. Der anschließende Abkühlprozess wird zur Wärmebehandlung genutzt, bei der durch gezielte Abkühlzeiten und Haltestufen sowohl der Grund- als auch der Schichtwerkstoff gehärtet werden.

Simulationen und schnelle Umsetzung: Die Vorgänge beim Sintern, Umformen und die durch Temperaturdifferenzen und Phasenumwandlung generierten Spannungen während der Wärmebehandlung simulieren die Forscher zusätzlich mit Hilfe der Methode der finiten Elemente. Dies gelingt mit der ALE (arbitrary Lagrangian Eulerian)-Methode, die es erlaubt, im Walzspalt ("wo viel passiert") mit einem feinen Netz zu arbeiten, wohingegen an unkritischen Stellen im Bauteil für kurze Rechenzeiten auch vergrößert werden kann. Die Entwicklung ist auf schnelle industrielle Umsetzung ausgerichtet. Daher steht von Beginn an die Übertragung von Laborergebnissen auf großtechnische Fertigungsprozesse im Vordergrund.



Das Prinzip der Werkstoffmischung übertragen die Forscher auch auf die makroskopische Oberfläche der Walze: Viele Sechsecke aus einer harten Werkstoffmischung sind umgeben von einer weicheren Mischung. Diese Matrix wird zwar schnell ausgewaschen, die Ritzen füllen sich aber schnell mit gepresstem Mahlgut, so dass die Walze noch griffiger wird.

Prof. Theisen, Ruhruniversität Bochum, (wt@wtech.rub.de)

Seit einigen Jahren versucht man auch nanokristalline Keramiken für Walzenwerkstoffe zu entwickeln. Durch die extreme Feinkristallinität vermindert sich die Sprödigkeit der Keramik. Gelingt dies, eröffnen sich eine Reihe weiterer Anwendungen, z.B. in der Automobiltechnik

7.9 Thermomechanisches Walzen

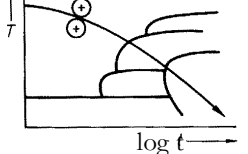
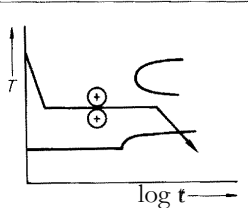
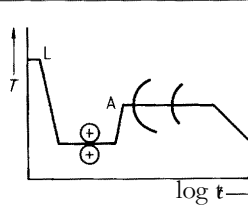
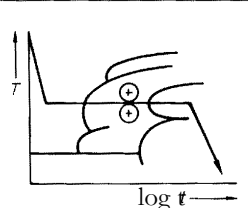
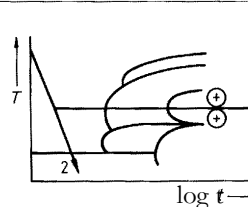
Art der TM-Behandlung	Beispiele für technisch angewendete Verfahren	
	φ-T-Führung	Verfahren
Verformung vor der Umwandlung	 <p>a)</p>	<p><i>normale Warmwalzvorgänge</i>, bei denen die Warmformgebung in einem definierten Temperaturbereich dicht oberhalb A_{c3} erfolgt</p>
	 <p>b)</p>	<p><i>Austenitformhärten („Ausforming“)</i> im Bereich des umwandlungsträgen Bereiches ($\approx 500^\circ\text{C}$) unterhalb T_{Rk}. Große Anzahl von Gitterbaufehlern und gespeicherte Energie erzwingt extrem schnelle γ-Umwandlung in extrem feinnadligen Martensit</p>
	 <p>c)</p>	<p><i>Spannungsinduzierte Ausscheidungen</i> (vorwiegend bei NE-Metallen). Verformen nach Lösungsglühen (L) erzeugt bei nachfolgendem Auslagern (A) sehr feine und gleichmäßige Ausscheidungen</p>
Verformung während der Umwandlung	 <p>d)</p>	<p>Festigkeit wird erhöht durch Verfeinern des Mikrogefüges und eventuell durch Ausscheidungshärtung</p>
Verformung nach der Umwandlung	 <p>e)</p>	<p>(1) <i>Patentieren</i> von Draht. Sehr feinkörniges perlitisches Gefüge läßt sich durch Verformen stark verfestigen („Klaviersaitendraht“). (2) Martensit wird vor Anlassen verformt. Anlaßgefüge mit feinstverteilten Karbiden entsteht</p>

Abb. 212:
verschiedene Verfahren des thermomechanischen Walzens

8. Das Tiefziehen (EN 10130, DIN 8584)

8.1 Definition, Prinzip, Verfahren

□ Blechumformung durch Zug- + Druckspannung zur Erzeugung von Hohlteilen

Def.: Tiefziehen ist ein Zug-Druck-Umformverfahren. Dabei wird ein Blechzuschnitt (z.B. eine Ronde) zu einem Hohlkörper ohne beabsichtigte Änderung der Blechdicke umgeformt. Dazu werden starre Werkzeuge oder Wirkmedien benutzt. Bei größeren Umformgraden sind mehrere Züge (Weiterzüge) und Zwischenglühung (Rekristallisation) erforderlich. Diese können sowohl in die gleiche als auch in die entgegengesetzte Richtung erfolgen.

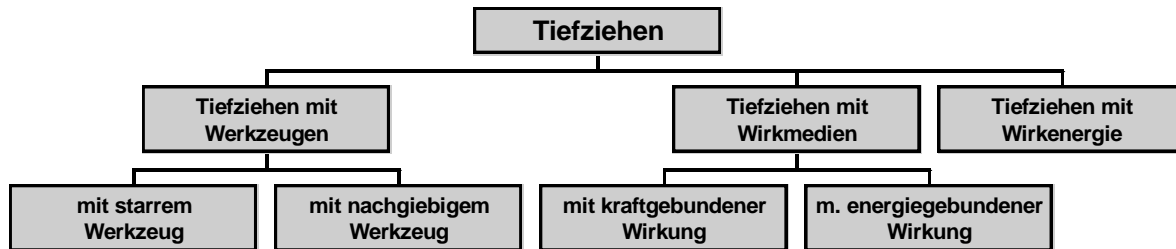


Abb. 213: Unterteilung der Tiefziehverfahren nach DIN 8584

Nomenklatur (Bezeichnungen):

⇒ Ausgangswerkstück = Blech (Flachprodukt) = Ronde

Feinstblech	:	0,49	mm \geq s
Feinblech	:	0,50	mm \leq s < 3,00 mm ↯
Mittelblech	:	3,00	mm \leq s \leq 4,75 mm
Grobblech	:	4,75	mm < s



Abb. 214:

a) Ausgangswerkstück

b) tiefgezogenes Hohlteil

Das im 18. Jahrhundert entwickelte *Tiefziehen* ist ein wichtiges Verfahren der Blechverarbeitung. Typische Produkte (i.A. Hohlteile):

- Getränkedosen
- Töpfe und Pfannen
- Behälter aller Formen und Größen
- Waschbecken
- Automobilkarosserien, Scheinwerfer
- Gehäuse etc.

Werkstoffe:

- gut verformbare (meist C-arme oder weichgeglühte) Stähle
- hochlegierte Cr-Ni-Stähle
- Al-Knetlegierungen
- Cu-Knetlegierungen
- Ni-Legierungen

8.2 Prinzip, Verfahren, Spannungen:

Ein flacher Blechrohling (Ronde, Platine) wird zu einem zylindrischen- oder kastenförmigen Teil mithilfe eines Stempels geformt, der den Rohling in den Gesenkhohlraum presst, s. Abb. 3. Es können auch Teile mit kleinen Vertiefungen erzeugt werden.

Unter dem Einfluss der Stempelkraft wird der Werkstoff plastisch und fließt in Richtung Ziehkante. Dabei treten im Werkstoff Druckkräfte auf, die ihn in Ziehrichtung strecken und quer dazu stauchen.

Durch Verwendung geeigneter Schmierstoffe beim Tiefziehen wird die Reibung zwischen Blech und Werkzeug verringert. Dadurch wird der Verschleiß an den Ziehkanten gemindert und die Werkstoffbeanspruchung herabgesetzt.

Die grundlegenden Parameter beim Tiefziehen eines zylindrischen Napfes sind in Abb. 3b dargestellt:

Ein kreisförmiger Blechrohling mit einem Durchmesser D_0 und einer Dicke t_0 wird über einer Öffnung mit einem Eckenradius R_d platziert. Die Ronde wird mit einem **Niederhalter** unter einer bestimmten Kraft gegen das Gesenk gedrückt. Ein Stempel mit einem Durchmesser D_p und einem Eckenradius R_p bewegt sich nach unten und zieht die Ronde in die Matrizenöffnung, wodurch ein Napf geformt wird.

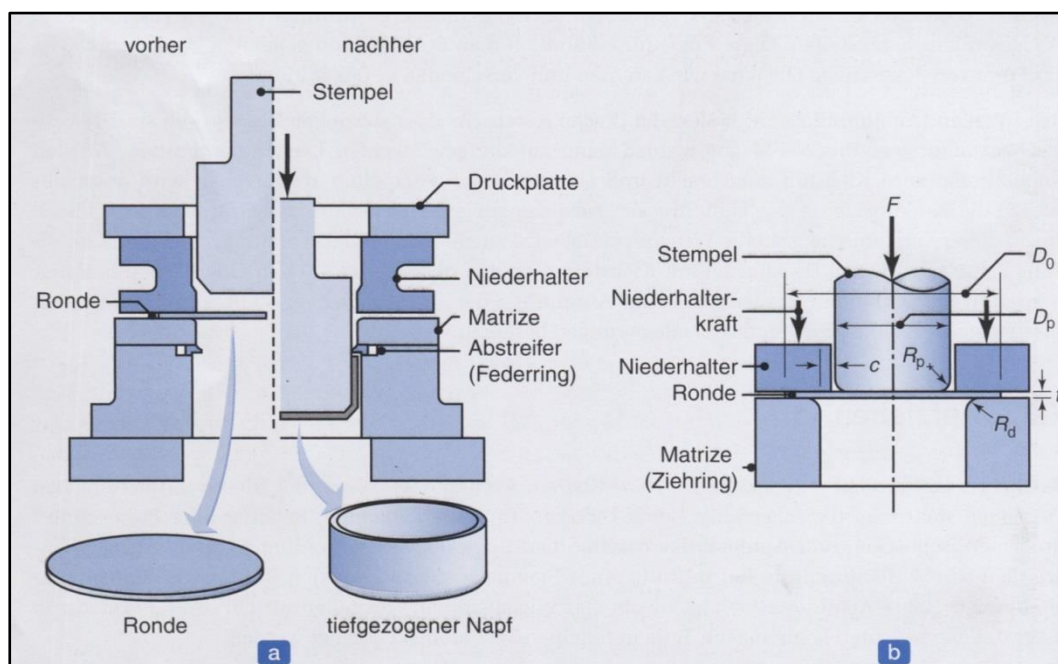


Abb. 215:

(a) Schematische Darstellung des Tiefziehens einer kreisförmigen Blechrunde. Der Abstreiferring trennt den tiefgezogenen Napf beim Rücklauf des Tiefziehstempels von diesem,

(b) Kraft- und Geometriebedingungen beim Tiefziehen eines Napfes. Mit Ausnahme der Stempelkraft F sind alle Größen unabhängig voneinander wählbar.

Die signifikanten Variablen beim Tiefziehen sind:

- Eigenschaften des Blechs
- Verhältnis von Rondendurchmesser zu Stempeldurchmesser Blechdicke
- Ziehspalt zwischen dem Stempel und der Matrize
- Eckenradien von Stempel und Matrize
- Niederhalterkraft
- Geschwindigkeit des Stempels
- Reibung an den Grenzflächen zwischen Stempel, Matrize und Werkstoff

weitere Tiefziehverfahren:

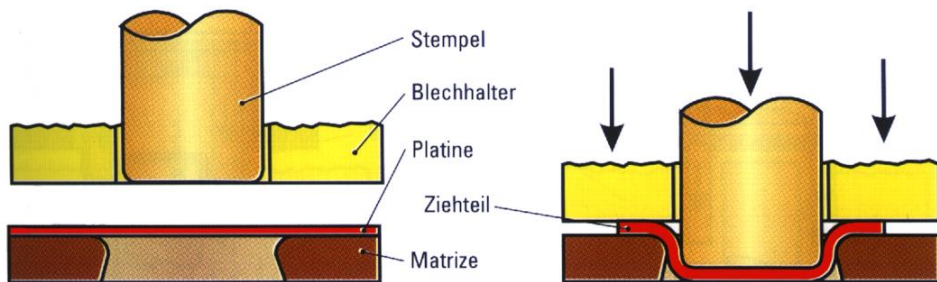


Abb. 216:
Tiefziehen

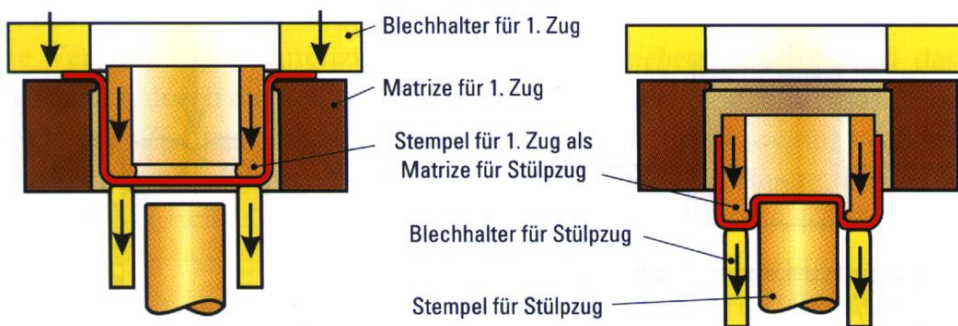


Abb. 217:
Stülpziehen

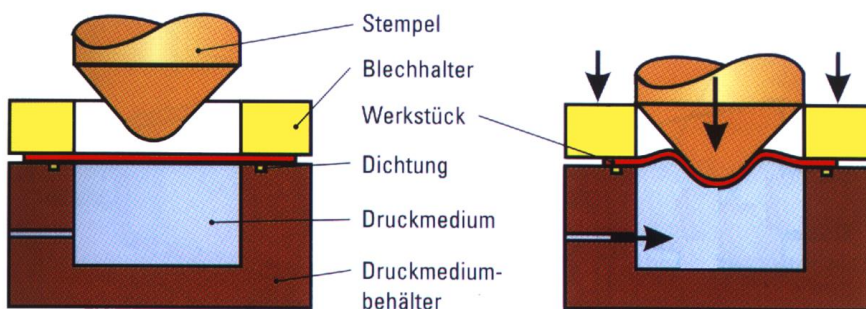


Abb. 218:
Hydromechanisches
Tiefziehen

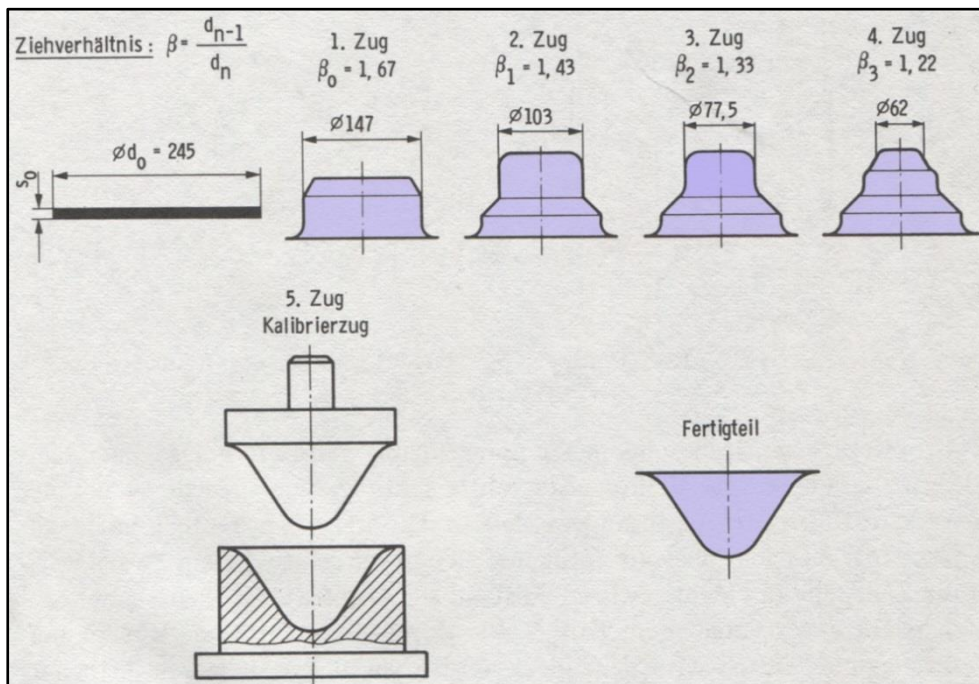


Abb. 219:
Mehrstufiges Ziehen eines konischen Werkstücks (Scheinwerferreflektor) mit zylindrischen Zwischenzügen

8.3 Spannungen beim Tiefziehen:

Tiefziehen ist ein Zugdruckumformen. Dabei wird das Werkstück durch gleichzeitig wirkende Zug- und Druckkräfte umgeformt.

Während des Tiefziehens ist das Werkstück den in Abb. 8 angegebenen Spannungszuständen unterworfen.

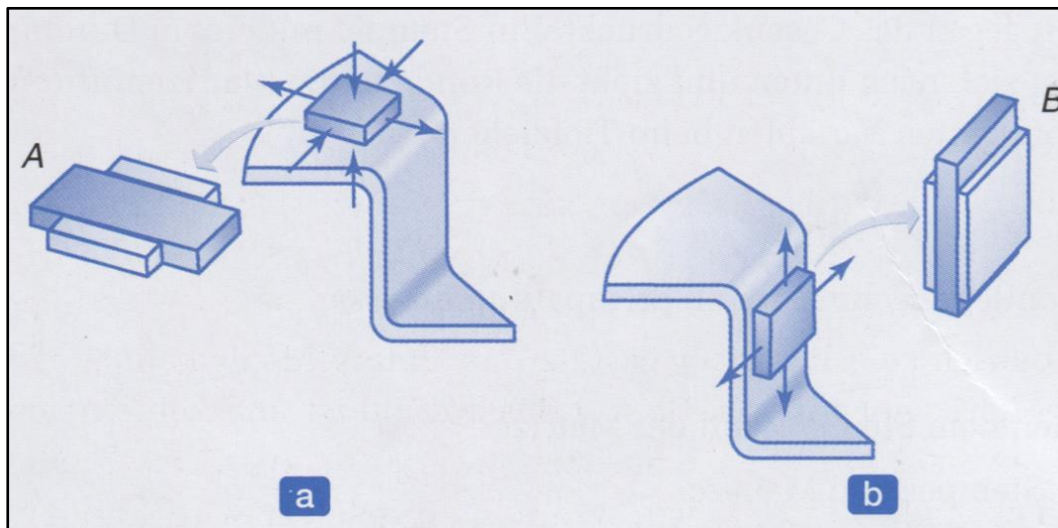


Abb. 220: Belastung und Verformung eines Blechelements (a) im Flansch und (b) in der Napfwand beim Tiefziehen eines zylindrischen Napfes.

Auf das Element A der Ronde wirkt eine radiale Zugspannung, weil die Ronde in die Matrice gezogen wird, die senkrecht auf das Element wirkende Druckspannung geht auf die Kraft zurück, die vom Niederhalter aufgebracht wird. Mit einem Freikörperbild der Ronde lässt sich zeigen, dass die radialen Zugspannungen zu Druckumfangsspannungen auf das Element A führen. Unter diesem Spannungszustand zieht sich Element A in der Umfangsrichtung zusammen und dehnt sich in der radialen Richtung. Da die Umfangsspannungen im Flansch dazu führen können, dass sich das Teil beim Ziehen in die Matrice faltet, muss der Niederhalter eine bestimmte Kraft ausüben, um dies zu verhindern.

Der Stempel überträgt die Ziehkraft F (Abb. 8b) über die Wände des Napfes auf den Flansch, der in den Matrizenhohlraum gezogen wird. Die Napfwand, die bereits geformt ist, wird prinzipiell einer Zugspannung in Napflängsrichtung unterworfen, wie es bei Element B in Abb. 8 zu sehen ist. Die Zugumfangsspannung auf Element B entsteht, weil der Napf aufgrund seiner Kontraktion unter den in Längsrichtung wirkenden Zugspannungen in der Napfwand eng gegen den Stempel gedrückt wird.

Da Element B durch den starren Stempel an einer Kontraktion in Umfangsrichtung behindert ist, unterliegt es folglich keiner Breitenänderung, dehnt sich aber in der Längsrichtung.

Ein wichtiger Aspekt bei Ziehoperationen ist die Bestimmung, wie viel reines Ziehen und wie viel Strecken stattfindet. Bei einer geringen Niederhalterkraft kann die Ronde praktisch ungehindert in die Matrize fließen (reines Ziehen). Element A in Abb. 8a wird dicker werden, wenn es sich gegen den Matrizenhohlraum bewegt, weil sein Durchmesser abnimmt. Die Verformung des Blechs geschieht hauptsächlich im Flansch und die Napfwand wird nur elastischen Spannungen unterworfen. Allerdings nehmen diese Spannungen mit wachsendem D_o/D_p -Verhältnis zu und können schließlich zum Bruch führen, sofern die Napfwand die erforderliche Last ertragen kann, um das Blech im Flansch in die Matrize zu ziehen (Abb. 8a).

Umgekehrt kann mit einer geeigneten Niederhalterkraft oder der Verwendung von Zieh-wülsten (in den Abb. 8b und 10 gezeigt) die Ronde daran gehindert werden, frei in den Matrizenhohlraum zu fließen. Die Verformung des Blechs findet hauptsächlich um den Stempel statt und der Napf beginnt sich zu verlängern, was schließlich zum Einschnüren und Reißen des Blechs führt. Ob das Einschnüren örtlich oder diffus auftritt, hängt (a) vom Exponenten der Dehngeschwindigkeitsempfindlichkeit m des Blechs, (b) der Stempelgeometrie und (c) der Schmierung ab. Je höher der Wert von m , desto diffuser ist die Einschnürung.

Die Länge des nicht gestützten Teils des Blechs (d.h. die Differenz zwischen den Matrizen- und Stempelradien = Spaltbreite) ist insofern wichtig, als sie zu Faltenbildung führen kann. Wie Abb. 10c zeigt, wird Element A in den Matrizenhohlraum gezogen, wenn sich der Stempel nach unten bewegt. Allerdings nimmt der Durchmesser der Ronde ab und der Umfang am Element wird kleiner, wenn sich das Element zu Position A' bewegt. Somit wird das Element an dieser Position Umfangsdruckdehnungen unterworfen und wird durch kein Werkzeug gestützt, im Unterschied zu einem Element zwischen dem Niederhalter und der Matrizenoberfläche. Da das Blech dünn ist und keine nennenswerten Umfangsdruckspannungen aufnehmen kann, neigt es dazu, im nicht gestützten Bereich zu falten. Diese Situation ist vor allem beim reinen Ziehen anzutreffen, während sie seltener wird, wenn sich der Prozess dem reinen Strecken nähert.

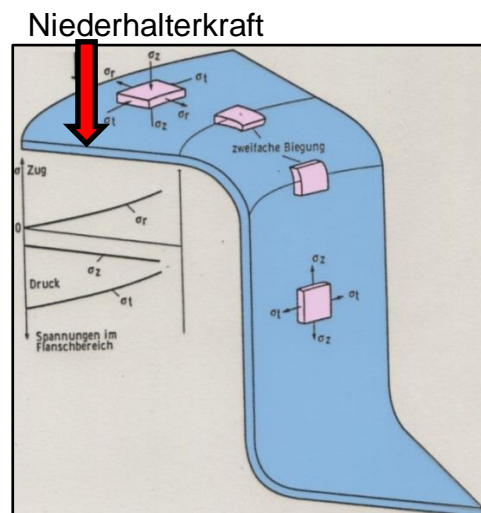


Abb. 221:
Spannungen beim Tiefziehen

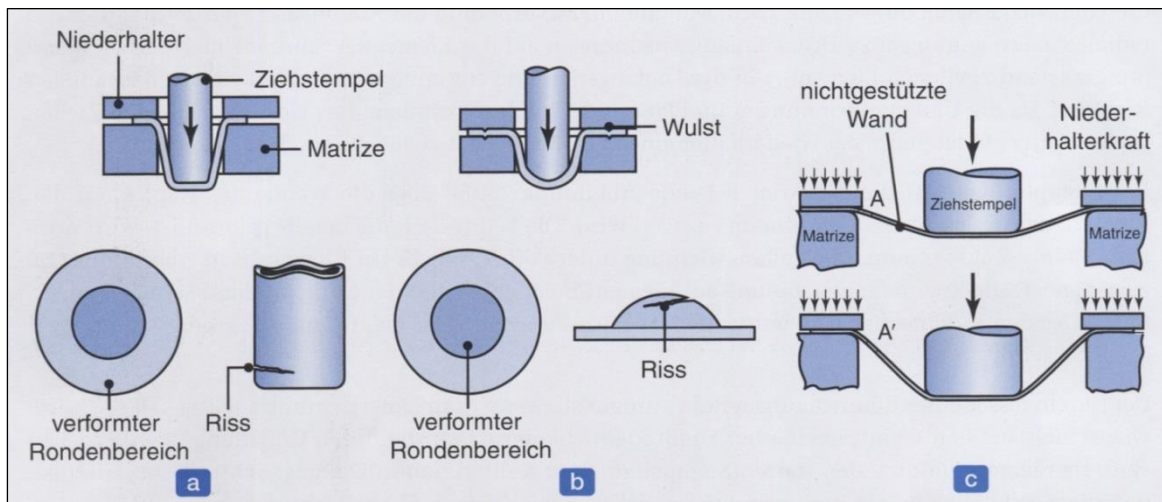


Abb. 222:

Beispiele für (a) reines Ziehen und (b) reines Strecken. Der Wulst (auch Zieh- oder Bremswulst genannt) verhindert, dass das Blech ungehindert in die Matrize einfließen kann. Dies wird besonders bei kleinen Niederhalterkräften angewandt, (c) Nicht gestützte Wand. In diesem Bereich neigt das Blech zur Faltenbildung.

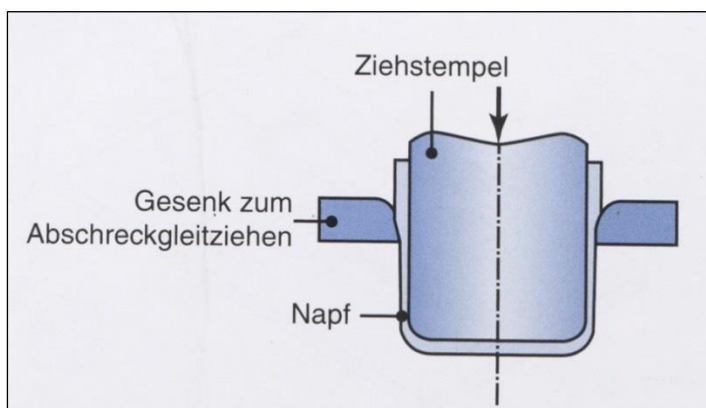


Abb. 223:

Schematische Darstellung des Abstreckgleitziehens. Durch dieses Umformen wird die Napfwand dünner als der Boden. Alle Getränkedosen, die kein separates Bodenteil besitzen, werden mit diesem Verfahren hergestellt.

Abstreckgleitziehen: Wenn die Dicke des Blechs beim Eintritt in den Matrizenhohlraum größer ist als der Ziehspalt zwischen dem Stempel und der Matrize, muss sie durch eine als *Abstreckgleitziehen* oder *Abstrecken* bezeichnete Verformung verringert werden. Durch Steuern des Ziehspalts liefert das Abstreckgleitziehen einen Napf mit konstanter Wanddicke (Abb. 11).

8.4 Fehler beim Tiefziehen

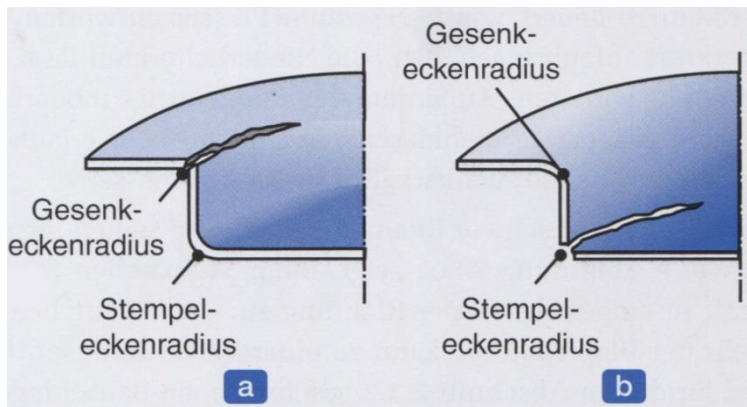


Abb. 224:

a Eckenreißer
b Bodenreißer

- Ist der Eckenradius zu klein, reißt das Blech beim Eintritt in die Matrize. Der Radius sollte typischerweise das 5- bis 10-fache der Blechdicke sein
- Ist der Eckenradius des Stempels zu klein, reißt das Blech in der Nähe der Stempellecke.

Da die Reibung zwischen Napf und Stempel das Tiefziehen unterstützt, wirkt sich übertriebenes Schmieren nachteilig auf die Tiefziehbarkeit aus.

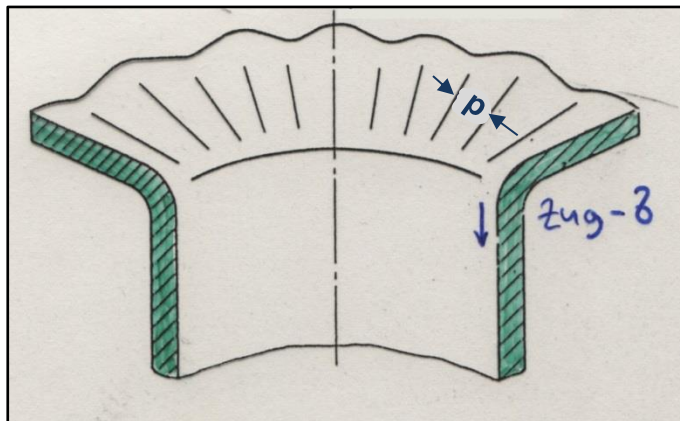


Abb. 225:

Faltenbildung durch zu geringe Niederhalterkraft

8.5 Blechumformung: Trends und neuere Entwicklungen

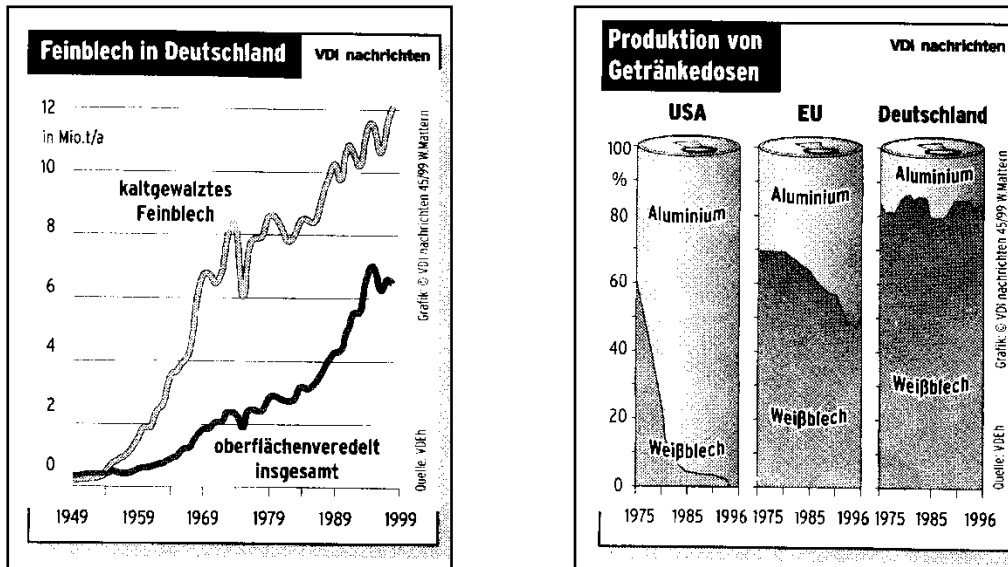


Abb. 226:

a) Coilcoating

b) In Deutschland: Stahl (Weißblech) dominiert den Dosenmarkt

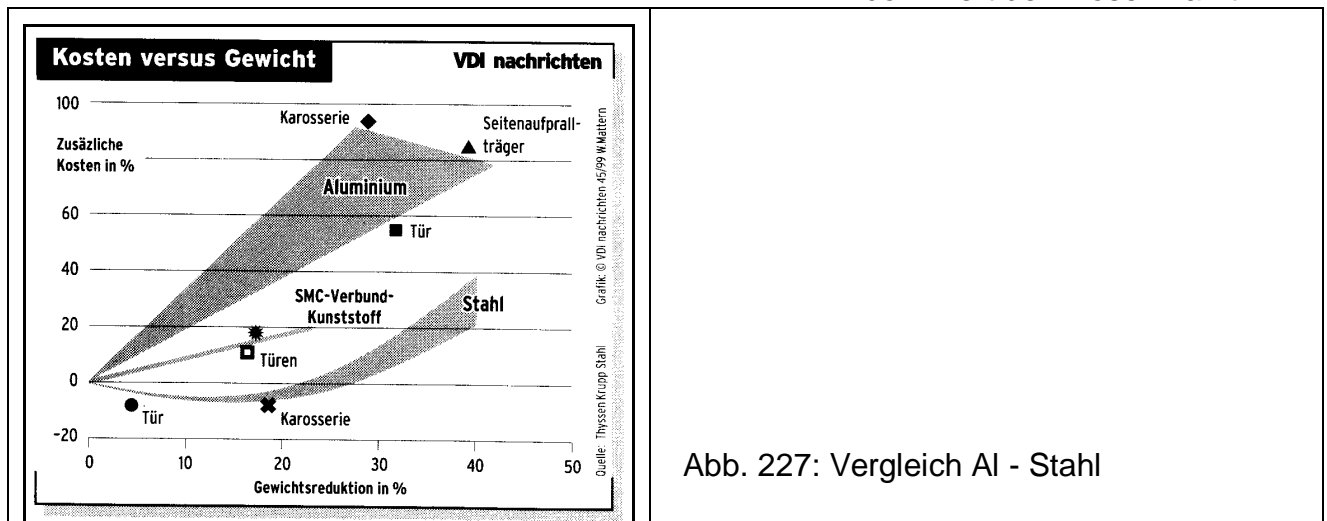


Abb. 227: Vergleich Al - Stahl

„Tailored Blanks“

Tailored Blanks sind "maßgeschneiderte", (laser-)geschweißte Platinen. Sie werden von den Stahlherstellern gefertigt und bestehen aus Feinblechen unterschiedlicher Dicke, Festigkeit und Oberflächenbeschichtung.

Die gesamte Seitenwand inkl. des hinteren Kotflügels wird aus dieser Platine herausgeschnitten und gepresst (tiefgezogen), s. Abb. 19.

- ⇒ unterschiedliche Stähle (Rp, Steifigkeit, Verformbarkeit...) s. Abb. 18.
- ⇒ Optimierung entsprechend der örtlichen Beanspruchung
- ⇒ Gewichts- und Kostenreduzierung (Verstärkungselemente...)

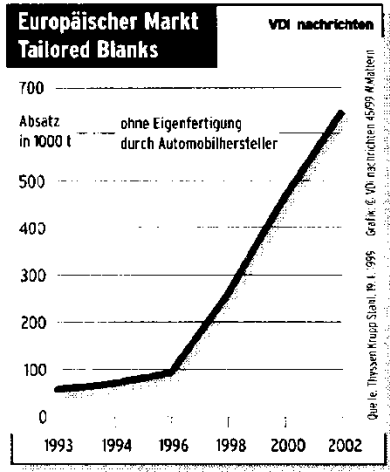


Abb. 228:
maßgeschneiderte Bleche unterschiedlicher Stahlgüte und Dicke

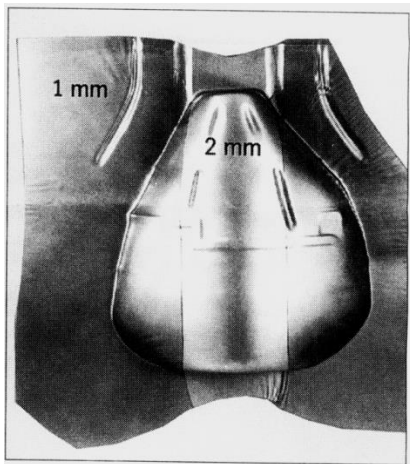


Abb. 229:
Tailored blanks:
Das Pkw-Radhaus besteht aus Blechen mit Δd die zusammenschweißt und gemeinsam umgeformt werden

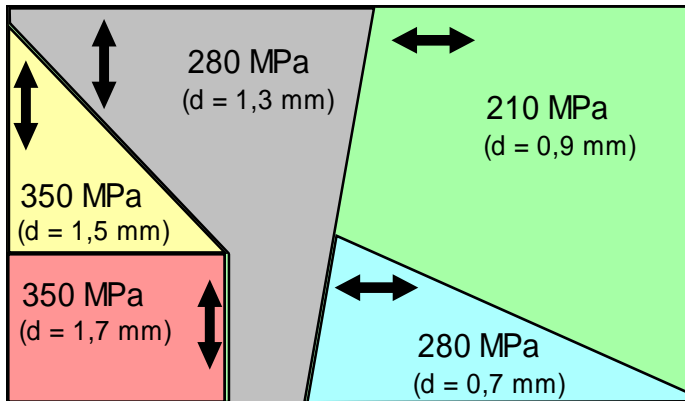


Abb. 230:
Tailored Blank für die Seitenwand der ULSAB-Karosserie
($b = 3429$ mm, $h = 1727$ mm;
↔ Walzrichtung,
MPa-Angaben = Streckgrenze, d = Dicke; ULSAB = Ultra Light Steel Auto Body)



Abb. 231: Seitenwand der ULSAB-Karosserie

Neuere Entwicklungen IHU:

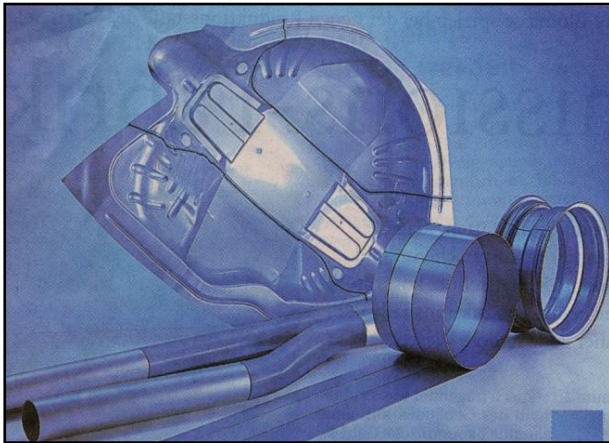


Abb. 232:

- tailored blanks mit gekrümmten Schweißnähten (oben: Ford Mondeo → Radhaus)
- tailored tubes (partiell verstärkte Rohre)
- tailored strips (für leichtere Felgen)

IHU = Innenhochdruckumformen = „Umformung eines Körpers bis zur Anlage an eine Werkzeuggravur durch die kraftgebundene Wirkung eines flüssigen Mediums mit dem Werkstück“

⇒ Rohre, Kfz-Tanks (Emissionen), s. Abb. 20.

8.6 Tiefziehen – Berechnungen

8.6.1 Ziehverhältnis:

Kenngroße für die Umformung ist das Ziehverhältnis β

⇒ s. Graphik



Gesamtziehverhältnis:

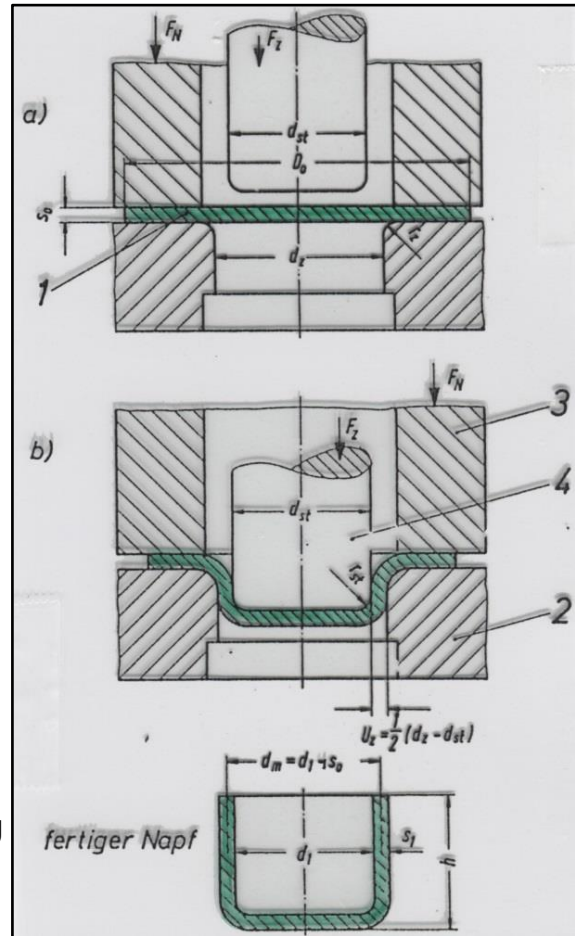


Abb. 233:
Tiefziehvorgang

Beispiel:

Eine Blechscheibe mit $D_0 = 200$ mm wird im Erstzug auf $d_1 = 100$ mm und in zwei Weiterschlägen auf $d_2 = 63$ mm und $d_3 = 45$ mm gezogen. Wie groß ist das Gesamtziehverhältnis β_{ges} ?

Lösung:

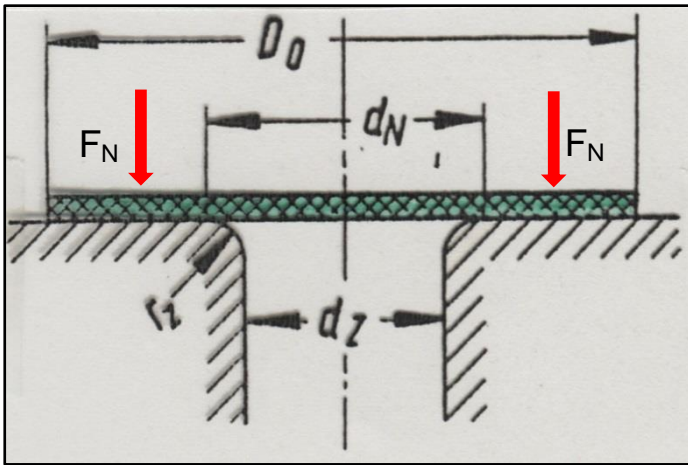
8.6.2 Niederhalterkraft

- ⇒ Faltenbildung vermeiden
- ⇒ Werkstofffluss noch zulassen

erforderlicher Niederhalter-Druck nach Siebel:

$$p_N = \left[(\beta_1 - 1)^3 + \frac{d_1}{200 \cdot s} \right] \cdot \frac{R_m}{400} \text{ in N/mm}^2$$

$$p = \frac{F}{A} \quad \Rightarrow \quad F = p \cdot A \quad \text{mit } A = \text{Kreisring, s. Graphik}$$



⇒ Niederhalterkraft in N

$$\text{mit: } d_N = d_z + 2 \cdot r_z$$

- ⇒ Faltenbildung[↑] bei dünnen Blechen (da p [↑] wenn s [↓])

Niederhalterkraft (Berechnungsbeispiel)

Ein rostfreies Stahlblech mit einer Zugfestigkeit von 600 N/mm^2 wird mit einem Ziehverhältnis von 2 gezogen. Wie groß ist die nötige Niederhalterkraft ?

gegeben:

$$\begin{aligned} R_m &= 600 \text{ N/mm}^2 \\ \beta_1 &= 2 \\ D_0 &= 200 \text{ mm} \quad (\text{Blechrollen-f}) \\ d_1 &= 100 \text{ mm} \quad (\text{Napf-f}) \\ s &= 1 \text{ mm} \quad (\text{Blechdicke}) \\ d_N &= d_z + 2 \cdot r_z \approx d_1 \end{aligned}$$

gesucht:

F_N

Lösung:

Ergebnis:

Die erforderliche Niederhalterkraft beträgt $\approx 53,014 \text{ kN}$

8.6.3 Stempelkraft

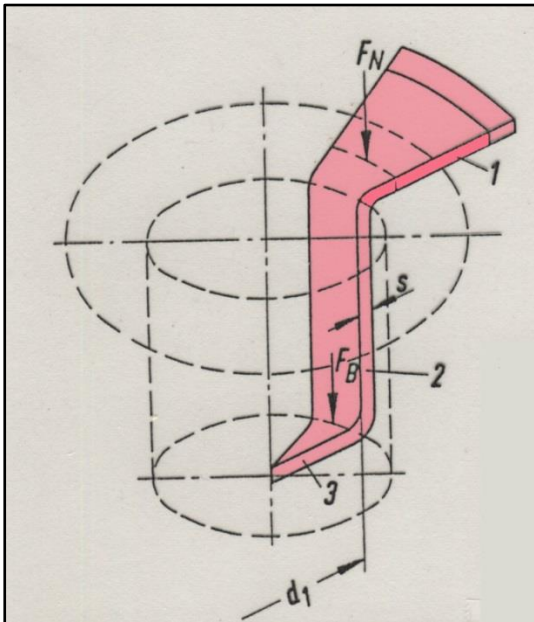


Abb. 234:

Ausschnitt aus einem tiefgezogenen Hohlteil

1 Flansch

2 Zarge

3 Boden

Querschnittsfläche des Hohlteils:

$$A = \pi \cdot (d_1 + s) \cdot s \text{ in N}$$

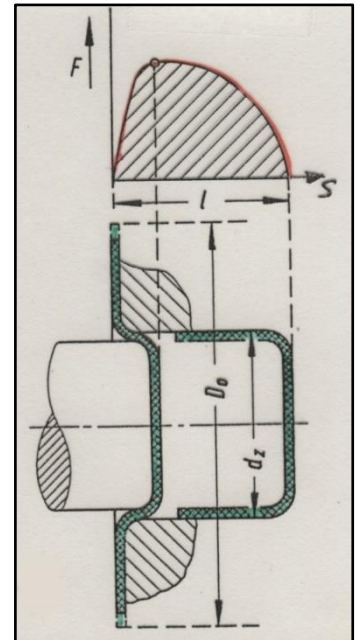
Bodenreißkraft:

mit F_Z = tatsächliche Ziehkraft

$F_Z = f(\text{Ziehweg})$, s. Graphik

Abb. 235:

Kraft-Wege-Schaubild beim Tiefziehen



Gesamtstempelkraft:

$$F_{Zg} = F_{id} + F_{RN} + F_{RZ} + F_B = \frac{F_{id}}{\eta_f} \text{ in N}$$

mit: F_{id} = reine (ideelle) Umformkraft

F_{RN} = Reibungskraft zwischen Ziehring und Niederhalter

F_{RZ} = Reibungskraft an Ziehkante

F_B = Rückbiegungskraft

f = FÄ-Wirkungsgrad

⇒ gilt streng nur wenn $F_Z \neq f(\text{Ziehweg})$

8.6.4 Umformkraft für einen einfachen runden Napfzug nach Siebel:

$$F_{id} = \pi \cdot d_1 \cdot s \cdot k_{fm} \cdot (\ln \beta_1 - c) \text{ in N}$$

⇒



mit: $0,5 < \eta_f < 0,7$; Beiwert $c \approx 0,25$

vereinfacht:

$$F_{Z_g} = 5 \cdot d_1 \cdot s \cdot k_{fm} \cdot \ln \beta_1 \quad \text{in N}$$

Für runde Napfweilerschläge gilt:

$$F_{Z_2} = 0,5 \cdot F_{Z_1} + 5 \cdot d_2 \cdot s \cdot k_{fm_2} \cdot \ln \beta_2 \quad \text{in N}$$

$$F_{Z_3} = 0,5 \cdot F_{Z_2} + 5 \cdot d_3 \cdot s \cdot k_{fm_3} \cdot \ln \beta_3 \quad \text{in N}$$

Beachte: Die Werkzeugmaschine muss $F_Z + F_N$ in N aufbringen

$$F_{ges} = F_Z + F_N \quad \text{in N}$$

Formeln gelten nur näherungsweise !

Empfohlene (Tief)Ziehgeschwindigkeiten

Werkstoff	Ziehgeschwindigkeit
Aluminiumblech	30 m/min
Messingblech	45 m/min
rostfreies Stahlblech	12 m/min
Stahlblech	18 m/min
Zinkblech	22 m/min

⇒ Optimum aus Werkstoffverhalten und Wirtschaftlichkeit

Beispielaufgabe:

Berechne die Stempelkraft für Erstzug und Weiterschlag einer Stahlblechrunde aus Ck 10

Aufgabe:

gegeben:

$$\begin{aligned} \text{Fließkurve} &\Rightarrow \\ D_0 &= 200 \text{ mm} \\ d_1 &= 125 \text{ mm} \\ d_2 &= 100 \text{ mm} \\ R_m &= 380 \text{ N/mm}^2 \\ s &= 1 \text{ mm} \end{aligned}$$

gesucht:

$$F_{Zg1}, F_{Zg2},$$

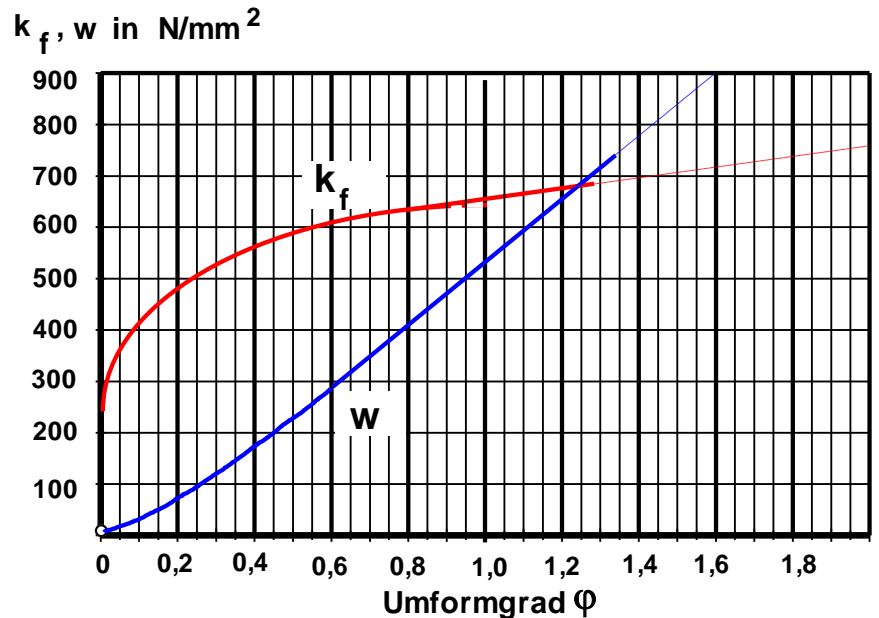


Abb. 236: Fließkurve von Ck10

Lösung:

$$F_{Zg} = 5 \cdot d_1 \cdot s \cdot k_{fm} \cdot \ln \beta_1 \quad \text{in N}$$

Ziehverhältnis:

$$\beta_1 = \frac{200 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} = 2; \quad \beta_2 = \frac{100 \text{ mm}}{63 \text{ mm}} \approx 1,6; \quad \beta_3 = \frac{63 \text{ mm}}{45 \text{ mm}} = 1,4$$

$$\Rightarrow \quad \beta_1 = \frac{200 \text{ mm}}{125 \text{ mm}} = 1,6; \quad \beta_2 = \frac{125 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} = 1,25$$

FÄ-Verhältnis:

$$\varphi = \ln \left(\frac{D_0}{d_1} \right) \Rightarrow \varphi_1 = \ln \beta_1 = 0,47; \quad \varphi_2 = \ln \beta_2 = 0,233$$

mittlere FÄ-Festigkeit \Rightarrow Fließkurve:

Weiterschlag ohne Zwischenglühlung:

$$k_{fm2} = \frac{k_{f1} + k_{f2}}{2}$$

FÄ-Festigkeit:

$$\text{Für } \varphi_1 = \ln \beta_1 = 0,47 \quad \Rightarrow \quad k_{f1} = 580 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\text{Für } \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = 0,693 \quad \Rightarrow \quad k_{f2} = 610 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Stempelkraft für den Erstzug:

$$F_{Zg1} = 5 \cdot 125 \cdot 1 \cdot 447 \cdot 0,47 \text{ N} \approx 131,5 \text{ kN}$$

Stempelkraft für den Weiterzug:

$$F_{Zg2} = (0,5 \cdot 131,5) + (5 \cdot 100 \cdot 0,595 \cdot 0,223) \text{ kN} \approx 132,25 \text{ kN}$$

Bodenreißkraft für den Erstzug:

$$F_{B1} = \pi \cdot (125 + 1) \cdot 1 \cdot 380 \text{ N} = 150,5 \text{ kN} > F_{Zg1}$$

Bodenreißkraft für den Weiterzug:

$$F_{B_2} = \pi \cdot (100 + 1) \cdot 1 \cdot 380 \text{ N} = 120,5 \text{ kN} < F_{Z_{g_2}}$$

⇒ da beim Weiterzug $F_{B_2} < F_{Z_2}$ muss noch zwischengeglüht werden (Rekristallisation bringt Entfestigung !)

FÄ-Festigkeit nach Zwischenglühlung: für $\varphi_2 = 0,223$

$$k_{fm_2} = \frac{w}{\varphi} = \frac{80}{0,223} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 359 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Stempelkraft:

$$F_{Z_{g_2}} = (0,5 \cdot 131,5) + (5 \cdot 100 \cdot 0,359 \cdot 0,223) \text{ kN} = 105,75 \text{ kN}$$

$$F_{Z_{g_2}} < F_{B_2}$$

Ergebnis:

Stempelkraft für den Erstzug: $F_{Z_{g_1}} = 131,5 \text{ kN}$

Stempelkraft für den Weiterzug: $F_{Z_{g_2}} = 105,75 \text{ kN}$

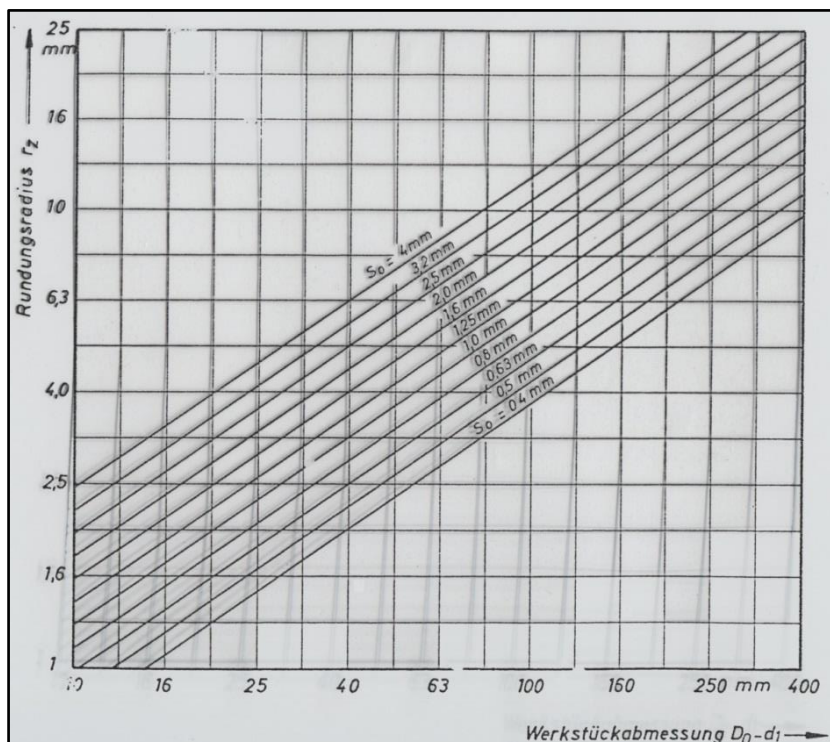
8.7 Werkzeuggestaltung

Umformergebnis (β_{max}) = f (Werkzeuggeometrie), z.B.:

❑ vom Rundungsradius der Ziehkante r_z

$$\Rightarrow r_z = f(D_0, d_1, s_0)$$

$$\Rightarrow \beta \uparrow = f(r_z \uparrow)$$



$$r_z = 0,035 \cdot [50 + (D_0 - d_1) \cdot \sqrt{s_0}]$$

(empirisch)

Beispiel:

für $D_0 = 200 \text{ mm}$, $d_1 = 100 \text{ mm}$,
 $s_0 = 1 \text{ mm}$

$$\Rightarrow r_z = 5,25 \text{ mm} (?)$$

Abb. 237:

Nomogramm zur Bestimmung
von r_z

- vom Rundungsradius des Ziehstempels r_{st}
- ⇒ Oberfläche, Abtrennung des Bodens
- ⇒ $r_{st} = (4...5)$ in mm (wobei immer $r_{st} > r_z$)

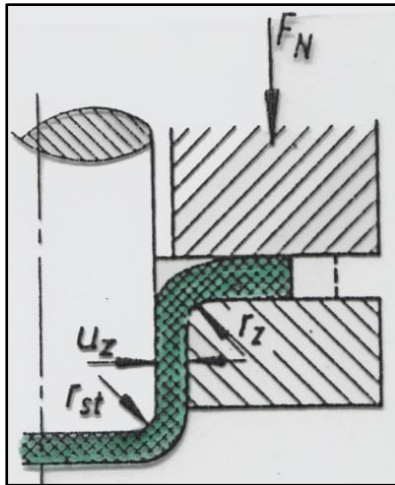


Abb. 238:

- von der Breite des Ziehspaltes U_z

Ziehspalt \approx Blechdicke S_0 , jedoch

Ziehtiefe $\uparrow \Rightarrow$ Werkstoffanhäufung \uparrow an Ziehkante \Rightarrow Fließbehinderung $\uparrow \Rightarrow F_z \uparrow \Rightarrow$

$\Rightarrow U_z > U_z$

beachte: wenn $U_z \gg U_z$:

- unterschiedliche Wanddicke
- keine glatte zylindrische Oberfläche
- β_{\downarrow}

beachte: wenn $U_z \ll U_z$

- Gleitziehen mit Abstrecken (Abreißen)

Kompromiss:

Werkstoff	U_z
Stahlblech	
Al-Blech	
sonst. NE-Metalle	
hochwarmfeste Legierungen	

8.8 Ermittlung des Zuschnitts

Annahme: $V_0 = V_1$

$$V_0 = \text{Volumen der Ronde} = \pi \cdot \frac{D_0^2}{4} \cdot s_0$$

$$V_1 = \text{Volumen des Hohlteils} = \pi \cdot \frac{d_1^2}{4} \cdot s_0 + \mu \cdot (d_1 + s_1) \cdot s_1 \cdot h$$

⇒ mit $s_0 = s_1 = s$

Da s_1 oft $< s_0$ ⇒ Sicherheit gegeben

Falls das Blech eine Walztextur (Anisotropie) zeigt: ⇒ Zugabe von 5...15 mm

Falls s_1 bewusst $< s_0$ ⇒ Δs_1 berücksichtigen ⇒



□ Beipielaufgabe: Berechnung des Zuschnittdurchmessers D_0

geg.: $h = 75 \text{ mm}$ (Napfhöhe)
 $d_1 = 100 \text{ mm}$ (Ziehdurchmesser)
 $s_0 = 1 \text{ mm}$ (Blechdicke)

Lösung:

Zuschnittdurchmesser ohne Streckung

$$D_0 = \sqrt{100^2 \text{ mm}^2 + 4 \cdot 75 \text{ mm} \cdot (100 \text{ mm} + 1 \text{ mm})} \approx \underline{\underline{200 \text{ mm}}}$$

Zuschnittdurchmessers mit Streckung

$$D_0 = \sqrt{\frac{0,65 \text{ mm}}{1 \text{ mm}} [100^2 \text{ mm}^2 + 4 \cdot 75 \text{ mm} \cdot (100 \text{ mm} + 1 \text{ mm})]}$$

$$D_0 \approx \underline{\underline{161 \text{ mm}}}$$

8.9 Abstufung der Züge

Anzahl der Züge $\downarrow = f(\beta^{\uparrow})$, β ist abhängig von:

- Form des Ziehteils
- Festigkeitseigenschaften des Ziehwerkstoffes
- Blechdicke und Toleranz
- Oberfläche von Werkzeug und Werkstück
- Radien der Werkzeuge (r_z , r_{St})
- Ziehspaltweite u_z
- Niederhalterdruck p_n
- Ziehgeschwindigkeit, - T
- Schmierung

⇒ sehr komplex ⇒ Grenzziehverhältnis ($d_1 = 100$ mm, $s_0 = 1$ mm)



mit $0,05 < e < 0,15$

Beispiel:

geg.: Werkstoff = St III 23

$$\begin{aligned}\beta_{100} &= \text{St III 23} \\ d_1 &= 100 \text{ mm} \\ s_0 &= 1 \text{ mm}\end{aligned}$$

ges.: für β' für $d_1 = 220$ mm und $s_0 = 1,8$ mm

Lösung.:

$$\beta' = (1,7 + 0,05) - \frac{0,05 \cdot 220}{100 \cdot 1,8} \approx \underline{\underline{1,81}}$$

⇒ für rostfreie Stähle ⇒ β' wird graphisch ermittelt (s. Folie):

8.10 Ziehringformen

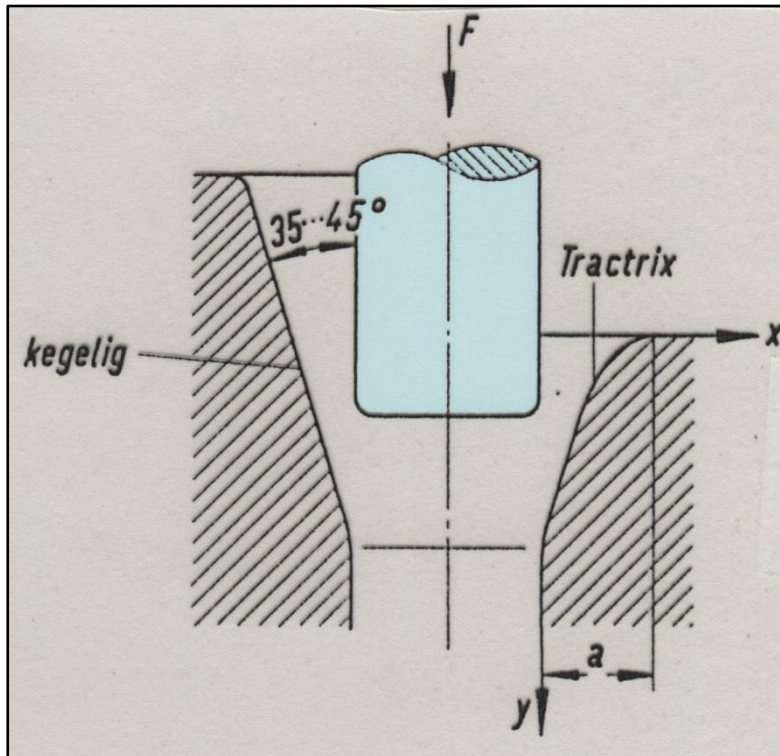


Abb. 239: Ziehringformen

- radiusförmig
- kegelig
- nach einer Tractrix-Kurve

$$y = a \cdot \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - x^2}}{x} - \sqrt{a^2 - x^2}$$

⇒ Eigenschaften von oben nach unten:

gleichmäßigeres Biegen ⇒ besseres Fließen ⇒ bessere

Ausnutzung der Werkstofffähigkeiten ⇒ $\beta \uparrow$

⇒ Herstellungskosten \uparrow

8.11 Schmierung

Sinn:

- μ_{\downarrow} zwischen Werkzeug und Werkstück
- Verschleiß \downarrow der Werkzeuge
- keine Kaltverschweißungen zwischen Werkzeug und Werkstück
- Kühlung (Umformwärme)

wichtig:

- Zähigkeit und Teilchengröße des Schmiermittels
- Beschaffenheit der Oberflächen

8.12 Grenzformänderungskurven

Das Formänderungsvermögen ist hier ein Maß für die für einen gegebenen Werkstoff erzielbare maximale Formänderung in 2 Ebenen. 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.

Wie wird eine Formänderungsanalyse durchgeführt?

- Prüfronden erstellen, s. Abb. 28
- Aufbringen eines Liniennetzes auf die Prüfronde
- Blech bis zum Anriss verformen
- Umformgrade aufnehmen (mit Hilfe von Markierungen auf der Blechoberfläche)
- Werte in ein Grenzformänderungsschaubild eintragen

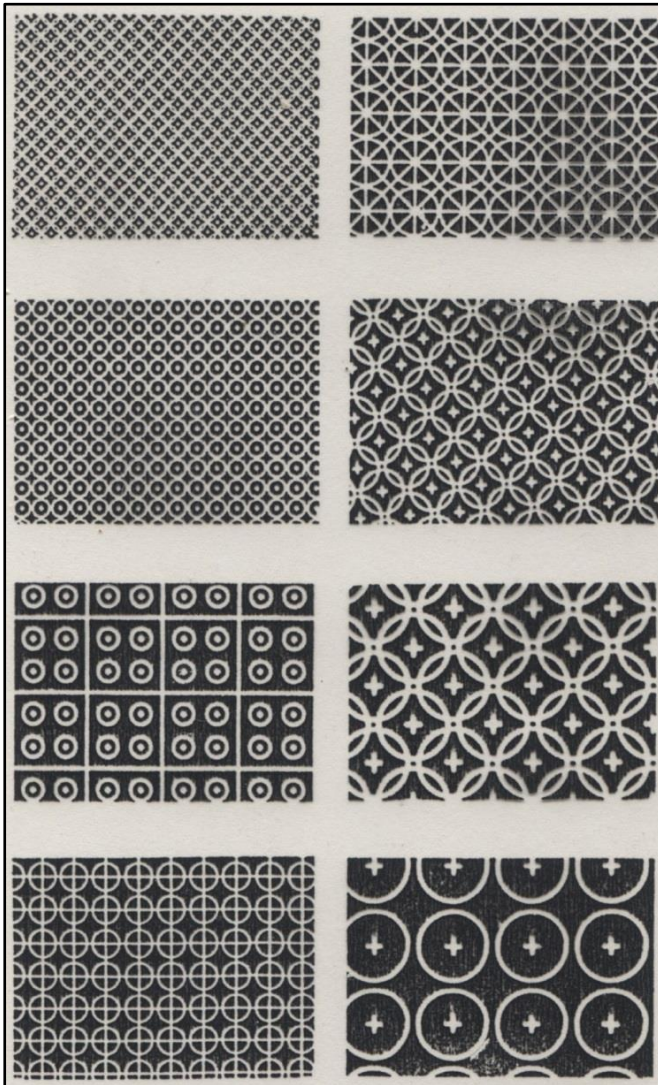


Abb. 240:

Blechmarkierungen zur Bestimmung der Grenzformänderungskurve

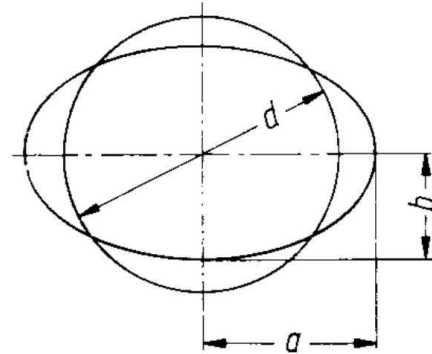
Aufbringung z.B.:

elektrochemisch

mechanisch

durch Siebdruck

mit Gummirollstempel (billig, Abrieb)



Durch das Umformen entstehen aus den Kreisen des Liniennetzes Ellipsen

$$\varphi_1 = \ln \frac{2a}{d}; \quad \varphi_2 = \ln \frac{2b}{d}$$

Die gemessenen Umformgrade werden in ein Diagramm eingetragen, s. Abb. 28.

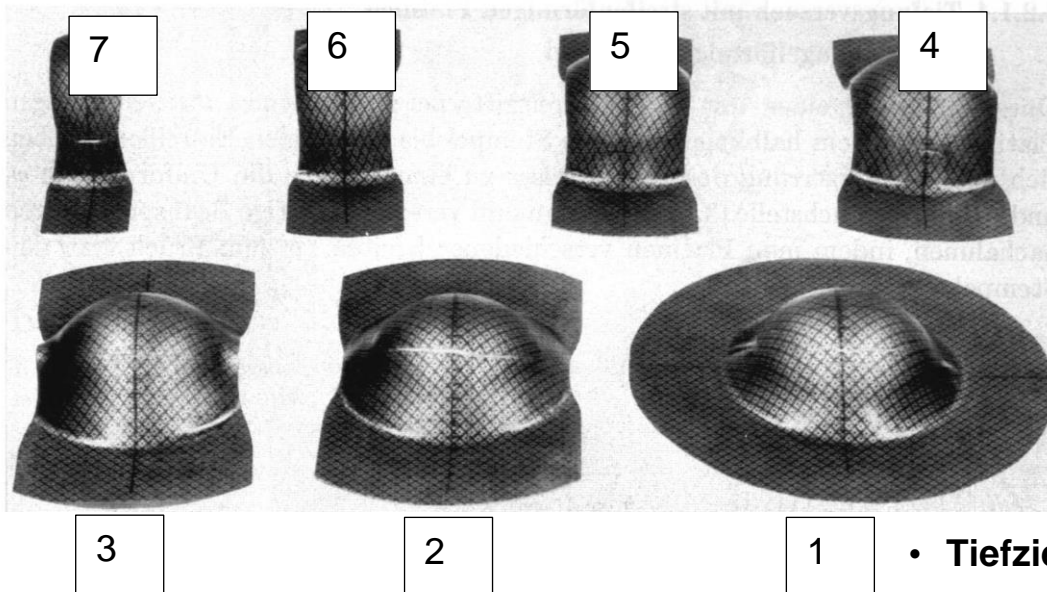


Abb. 241:

Ronden mit verschiedenen Abmessungen damit verschiedene Spannungszustände realisiert werden. Somit kann man zwischen dem

- **Tiefziehen** ($\varphi_1 = -\varphi_2$)
- bis hin zum **Streckziehen** ($\varphi_1 = \varphi_2$)
variieren, s. auch Abb. 30/32.

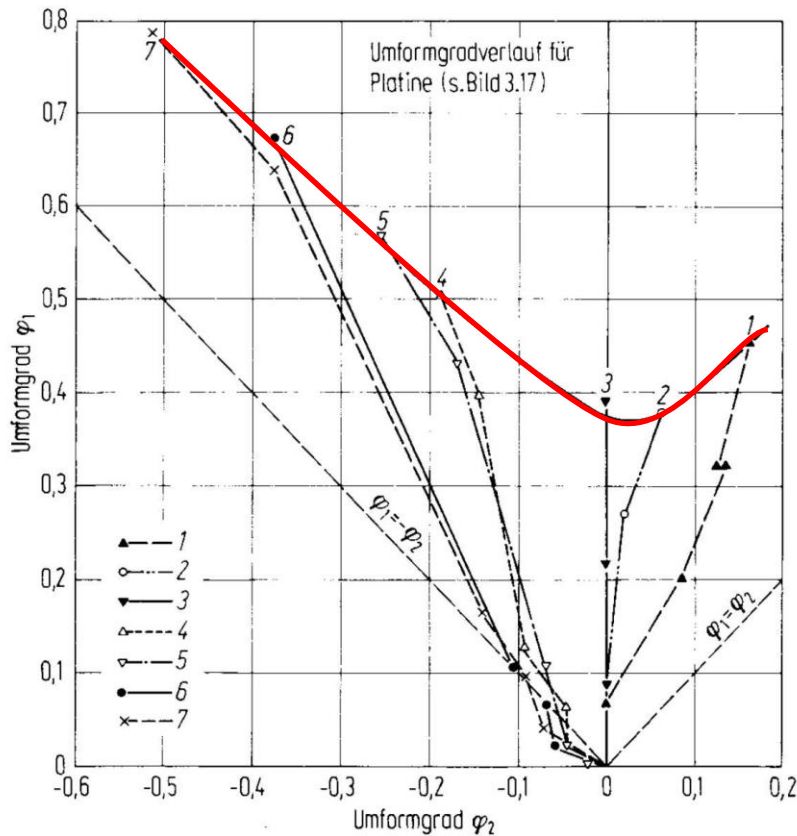
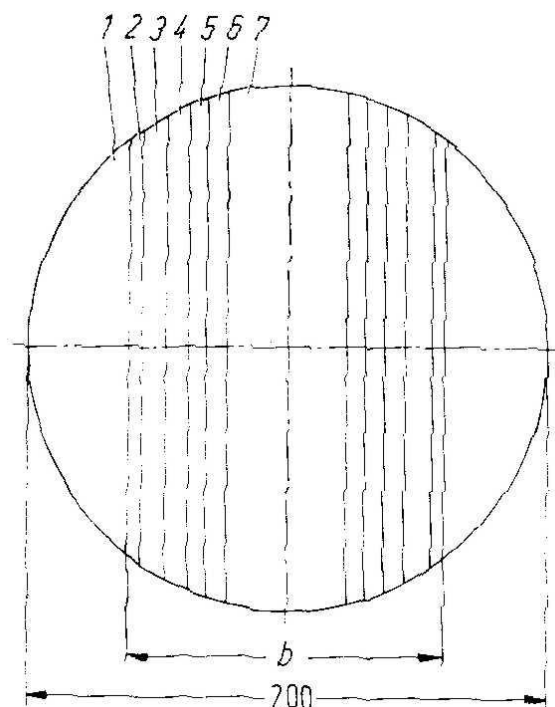


Abb. 242:

Grenzformänderungsdiagramm

Alle Formänderungen unterhalb der Kurve werden vom Werkstoff ertragen.

Im Grenzformänderungsdiagramm stellen die Grenzformänderungskurven die Versagensgrenzen bzgl. Einschnüren (s. Abb. 33) 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.



Nr.	b in mm
1	200
2	120
3	110
4	90
5	75
6	60
7	45

Abb. 243:

Probestreifen verschiedener Abmessung zur Ermittlung des Grenzformänderungsdiagramms

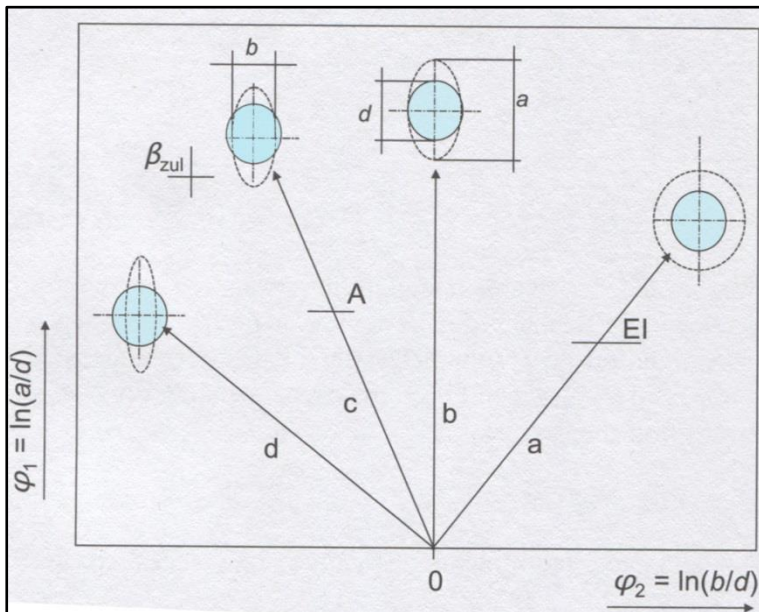


Abb. 244:
Formänderung in der Ebene
(2-achsig)

Bezüglich der **Formänderung in der Ebene** sind drei Fälle zu unterscheiden entsprechend Abb.30:

- Beide Hauptachsen werden beim Umformen größer (**Linie a** in Abb. 32), d.h., der Werkstoff wird in zwei Richtungen gedehnt. Man spricht von zweiachsigem Streckziehen ($\varphi_1 = \varphi_2$).
- Eine Hauptachse wird größer, die andere bleibt gleich dem Ausgangsdurchmesser d , d. h., der Werkstoff wird nur in eine Richtung gestreckt (**Linie b** in Abb. 32). Man spricht von einachsigem Streckziehen.
- Eine Hauptachse wird größer, die andere wird kleiner als der Ausgangsdurchmesser d war, d.h., der Werkstoff wird in eine Richtung gestreckt und in die andere gestaucht. Man spricht von Tiefziehen im engeren Sinn (**Linie c** in Abb. 32) bzw. von reinem Tiefziehen (**Linie d** in Abb. 32), da keine Blechdickenänderung stattfindet ($\varphi_1 = -\varphi_2$)

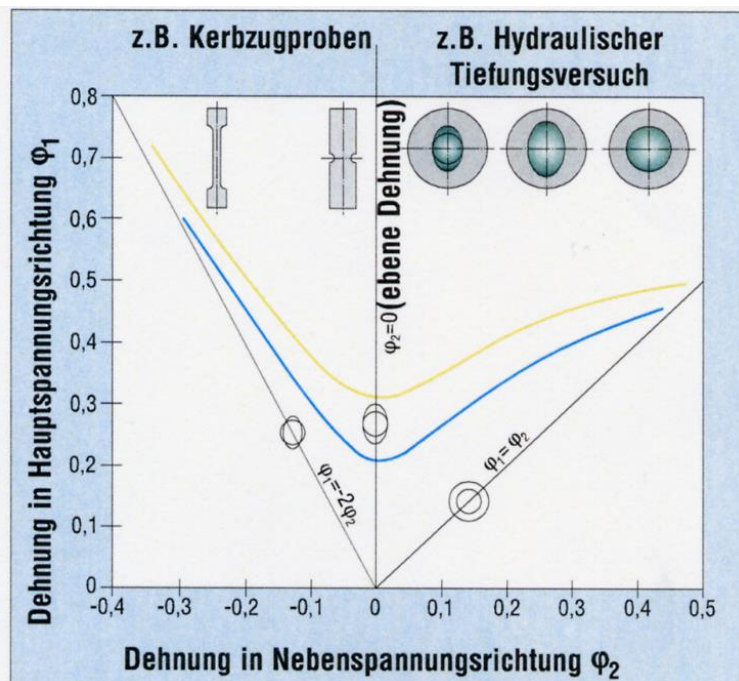


Abb. 245:
Grenzformänderungsdiagramm
Gelb: Grenzformänderungskurve
(Bruch)
Blau: Grenzformänderungskurve
(Einschnürung)

9. Schmieden

9.1 Schmiedeverfahren

Def.: Warmformgebung durch hämmernde oder pressende Werkzeuge

- ❑ Schmieden (Freiformen): Dabei entsteht die Werkstückform durch Werkzeuge, die nicht oder nur teilweise die Form des Werkstückes enthalten. ⇒ Werkstoff kann beim Umformen frei fließen
- ❑ Schmieden (Gesenkformen): Dabei entsteht die Werkstückform durch gegeneinander bewegte Formwerkzeuge (Ober- und Untergesenk. Der Werkstoff ist beim Umformen ganz oder überwiegend durch eine Form (Gesenke) umschlossen
⇒ die Fließrichtung des Werkstoffes wird erzwungen,

1. Gegenüberstellung der Hauptverfahren

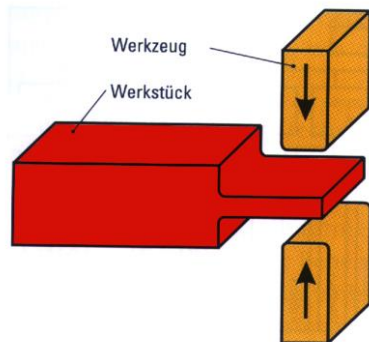


Abb. 246: Schmieden (Freiformen)

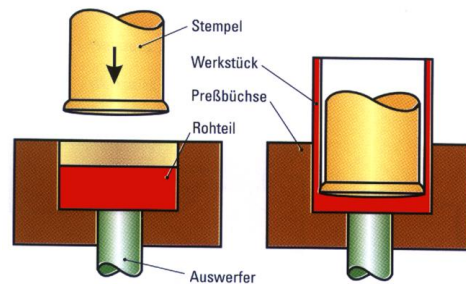


Abb. 247: Durchdrücken (Napfrückwärts-Fließpressen)

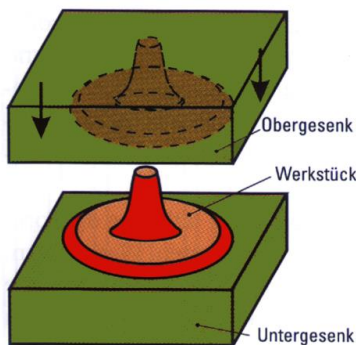


Abb. 248: Schmieden (Gesenkformen)

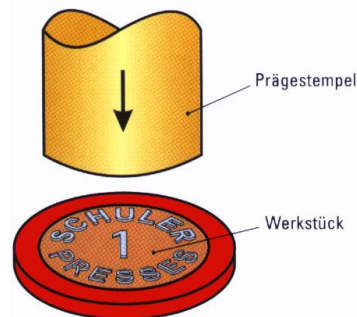


Abb. 249: Eindrücken (Münzprägen)

Werkstoffe:

- ❑ Stahl (mit $\leq 1,7\%$ C)
- ❑ Al- und Cu-Knetlegierungen
- ❑ Ti-, Co- Legierungen

Stähle (350.000 t/a) und NE-Metalle.
Schmiedestücke bis über 100 t Gewicht

Vorteile des Schmiedens:

- ⇒ "Verdichten" des Werkstoffes
- ⇒ Mikrolunker werden verschweißt
- ⇒ Kornfeinung ($R_p \uparrow$)
- ⇒ Faserverlauf (Dauerfestigkeit \uparrow)

9.1.1 Freiformschmieden

Freiformen

⇒ handwerklich bedeutend

⇒ Werkzeuge einfach und billig

Handwerk: Handhammer + Amboß

Industrie: Bär mit Obersattel + Schabotte mit Untersattel

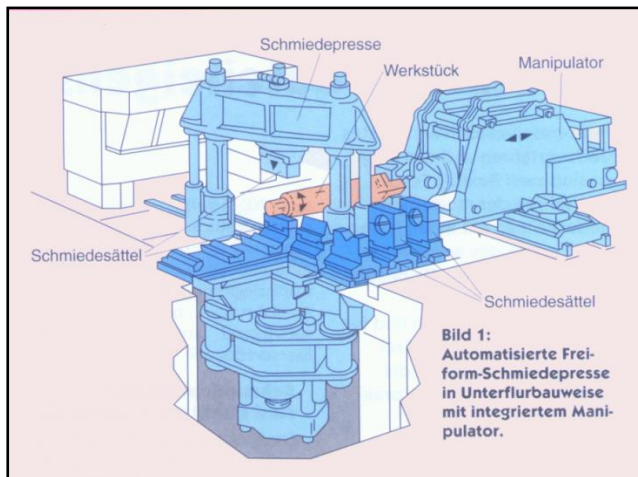


Abb. 250: Freiform-Schmiedepresse in Unterflurbauweise
(automatisiert mit integriertem Manipulator)

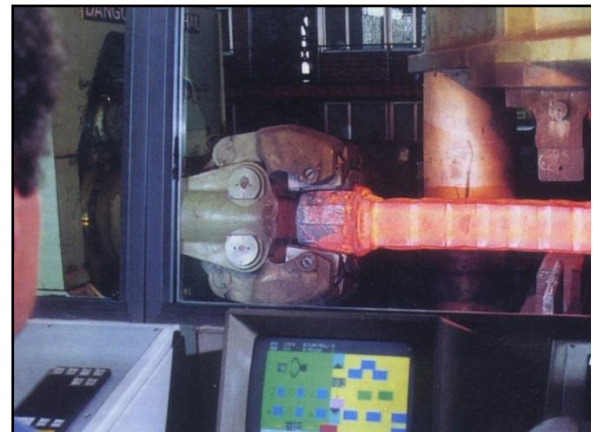


Abb. 251:
Freiformschmieden Beispiel: Freiform-Schmiedepresse im Betrieb



Abb. 252:
Schiffskurbelwelle (Freiformschmieden)

⇒ **Vorteil:** geringe Stückzahlen schon wirtschaftlich

Freiform-Verfahren:

- A) Stauchen
- B) Recken
- C) Sonstige

9.1.2 Gesenkschmieden

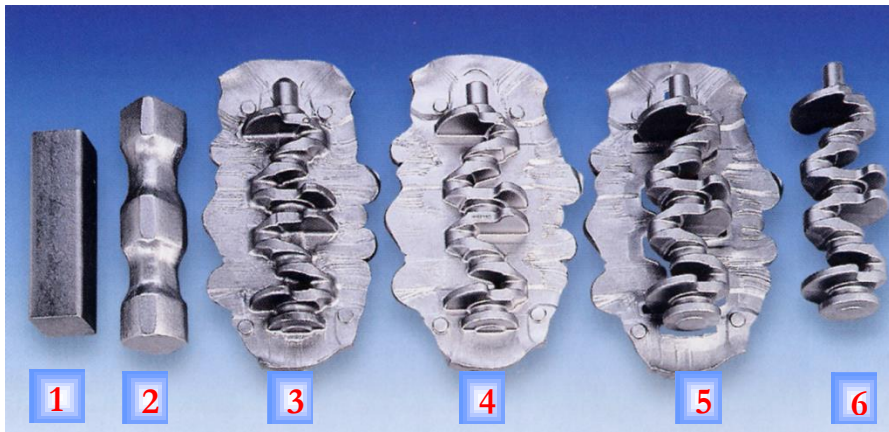


Abb. 253: Umformstufen bei einer 4-Zylinder-PKW-Kurbelwelle:
 1: Zuschnitt, 2: vorgewalztes (Reckwalzen), 3: vorgeschmiedetes -
 4: fertiggeschmiedetes -, 5: entgratetes - und 6: kalibriertes Werkstück

Arbeitsgänge beim Gesenk-Schmieden, s. Abb.

1. Abtrennen des Stangenabschnittes oder der Spaltstücke, s.u. (entfällt beim Schmieden von der Stange)
2. Zwischenformung (Massenverteilung)
3. Fertigformen durch Gesenkschmieden
4. Abtrennen des Werkstückes von der Stange (entfällt beim Schmieden vom Spaltstück)
5. Abgraten des Schmiedestückes

Vorgänge im Gesenk

Umformen des Werkstoffes durch:

- Stauchen
- Breiten
- Steigen

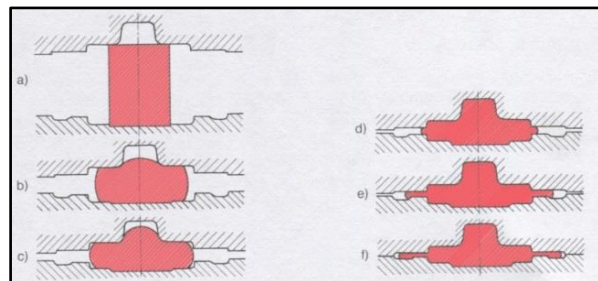
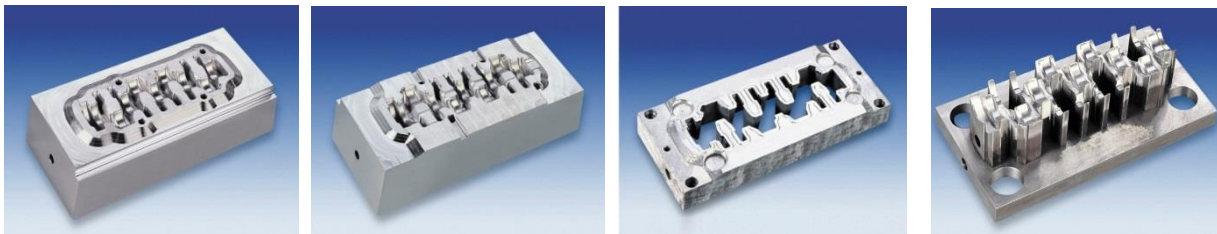


Abb. 254: a) Rohteil b) – e) Zwischenstufen
 f) fertiges Schmiedeteil

Werkstofffluss wird durch Ausgangsquerschnitt und Gesenkform beeinflusst



Untergesenk Vor-schmiedeform

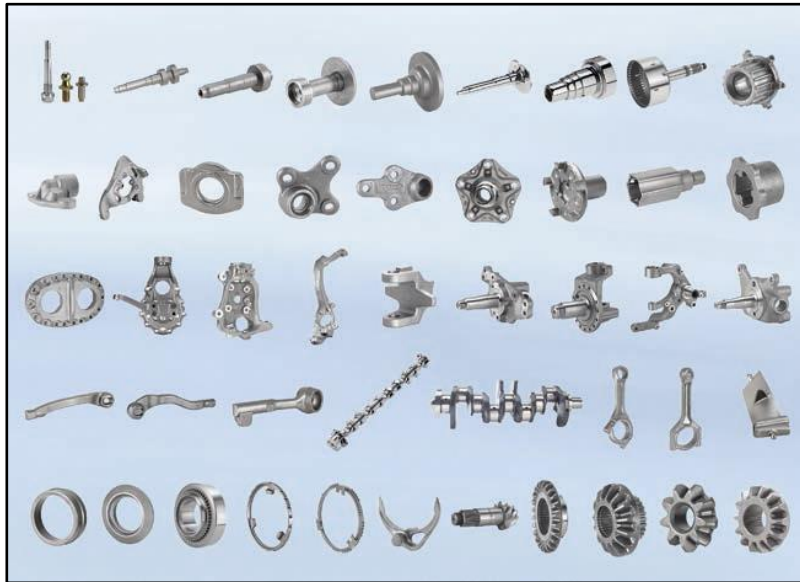
Untergesenk Fertig-schmiedeform

Abgrat-Schnitt

Abgrat-Stempel

Abb. 255: Fertigungsschritte beim Gesenkschmieden

Schmiedefehler bei zu kleinen Radien



⇒ Nachteile:

--

--

Abb. 256: Produktvielfalt beim Gesenkschmieden

Massenverteilung:

Zweck: vor dem Gesenkschmieden wird aus gewalzten Produkten eine Zwischenform hergestellt, deren Volumenabschnitte der jeweiligen Endform nahe kommen, s. Abb. 8.

Verfahren: -- Reckwalzen (Querschnittsvorbildung)
 -- Stauchen -
 -- Biegen

Vorteile: -- es muss weniger Material plastisch verformt werden
 -- Umformarbeit ↓
 -- Schonung der Werkzeuge (Gesenke)

9.1.2.1 Schmieden von der Stange

Rohling = Stangenmaterial

Durchführung:

- Stange wird von Hand geführt
- Stangenende wird erwärmt und geschmiedet
- Stangenende wird abgetrennt
- Vorgang wird wiederholt

Charakteristika:

- i.a. nur längliche Werkstücke
- nur kleine Werkstücke
 - Handarbeit, Manipulator
 - Stangen- $\varnothing \leq 50$ mm
- Zeitgewinn
 - kein Spannen mit der Zange
 - kein Erwärmen und Einlegen von Einzelstücken (Butzen)

9.1.2.2 Schmieden vom Spaltstück

Rohling = Blechmaterial

Charakteristika

- Längsachse des Werkstückes liegt senkrecht zur Schlagrichtung
- Blechmaterial \Rightarrow flache Werkstücke
- Blechstreifen \Rightarrow Faserverlauf unterbrochen
- Zwischenformherstellung durch Biegen oder Stauchen (Massenverteilung)

Vorteile:

- Energieverbrauch \downarrow
- Werkstoffmenge \downarrow
- Werkzeuge werden geschont
- Form- und Maßgenauigkeit \uparrow

Nachteile:

- mehrere Arbeitsgänge



Abb. 257:
Schmieden vom Spaltstück
(vom gewalzten Blech)

9.1.2.3 Weitere Schmiede-Verfahren

Recken

⇒ mehrere Stauchungen hintereinander

Verfahren:

⇒ Recken mit balligen Druckflächen

⇒ Breitschmieden

⇒ Breiten über Dorn

⇒ Weiten über Dorn

⇒ Rundschmieden

⇒ Glätten (Schlichten)

Sonstige

⇒ Lochen, Schlitzen, Erweitern, Schroten, Absetzen, Rundkneten

9.1.2.4 Gesenkschmieden/Kraftbedarf

warum ? → Auswahl der geeigneten Umformmaschine

Umformkraft: F in N

mit A_d = gedrückte Fläche (incl. Grat) in mm^2

k_{we} = FÄ-Widerstand bei φ_{\max}

($k_{we} \approx 10 - 12 \cdot k_{wa}$)

$k_w = f$ (Werkstoff, Verfahren, Werkstückgeometrie, (μ , T , φ , w_m))

- ⇒ Berechnung von F sehr kompliziert
- ⇒ k_w nur durch Messungen bestimmbar
- ⇒ Aufstellung von Nomogrammen zur Ermittlung des Kraftbedarfs in 1. Näherung, s.u.

Die Nomogramme gelten nur für Stähle bis 0,45 % C sowie für niedrig legierte Stähle

Umformgeschwindigkeit (Erinnerung)

$$\dot{\varphi} = \frac{v}{h_0} \text{ in } s^{-1}$$

mit v = Werkzeuggeschwindigkeit in cm/s

h_0 = Werkstück-Anfangshöhe in cm

$\dot{\varphi}$ = anfängliche Umformgeschwindigkeit

φ_m = mittlere Umformgeschwindigkeit

$\varphi_m = (1,3 \dots 1,6) \times \dot{\varphi}$ für hydraulische

$\varphi_m = (0,85 \dots 0,9) \times \dot{\varphi}$ für Hämmer und Reibspindelpressen

$\varphi_m = (0,3 \dots 0,4) \times \dot{\varphi}$ für Kurbel- bzw. Exzenterpressen

Beispiel:

Gesenkschmieden eines Schmiedeteils unter einer hydraulischen Presse

gegeben: $T = 1200\text{ °C}$
 $v = 500\text{ mm/s}$
 $h_0 = 125\text{ mm}$
 $A_d = 16000\text{ mm}^2$
Umformvorgang Nr. 7

gesucht: Umformkraft F in kN

Lösung: mit Hilfe des Nomogramms zur Ermittlung der Umformkraft
dazu w_0 - und w_m -Bestimmung:

$w_0 =$

$w_m \approx$

FÄ-Widerstand: aus Feld 1 $\rightarrow k_{wa} = 63\text{ N/mm}^2$

FÄ-Widerstand: aus Feld 2 $\rightarrow k_{we} = 630\text{ N/mm}^2$

Umformkraft: aus Feld 3 $\rightarrow F \approx 10\text{ kN}$

Abb. 258: Umformvorgänge zur Ermittlung der Umformkräfte

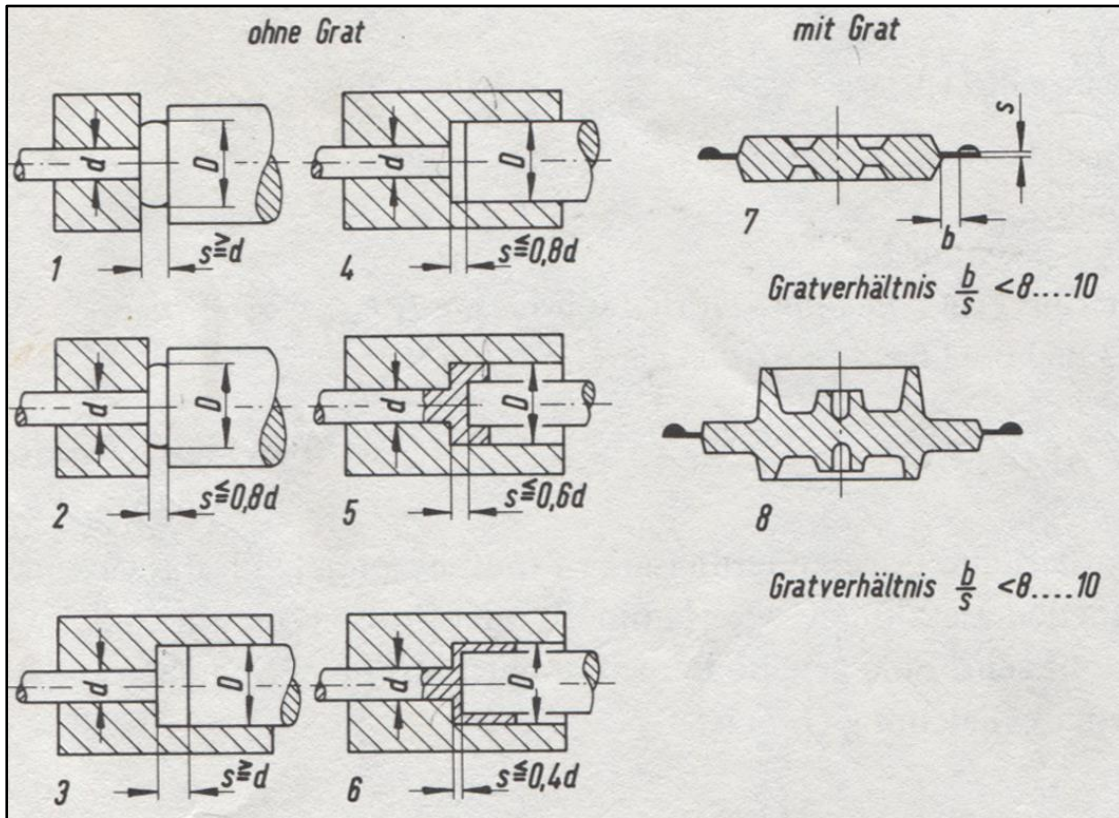
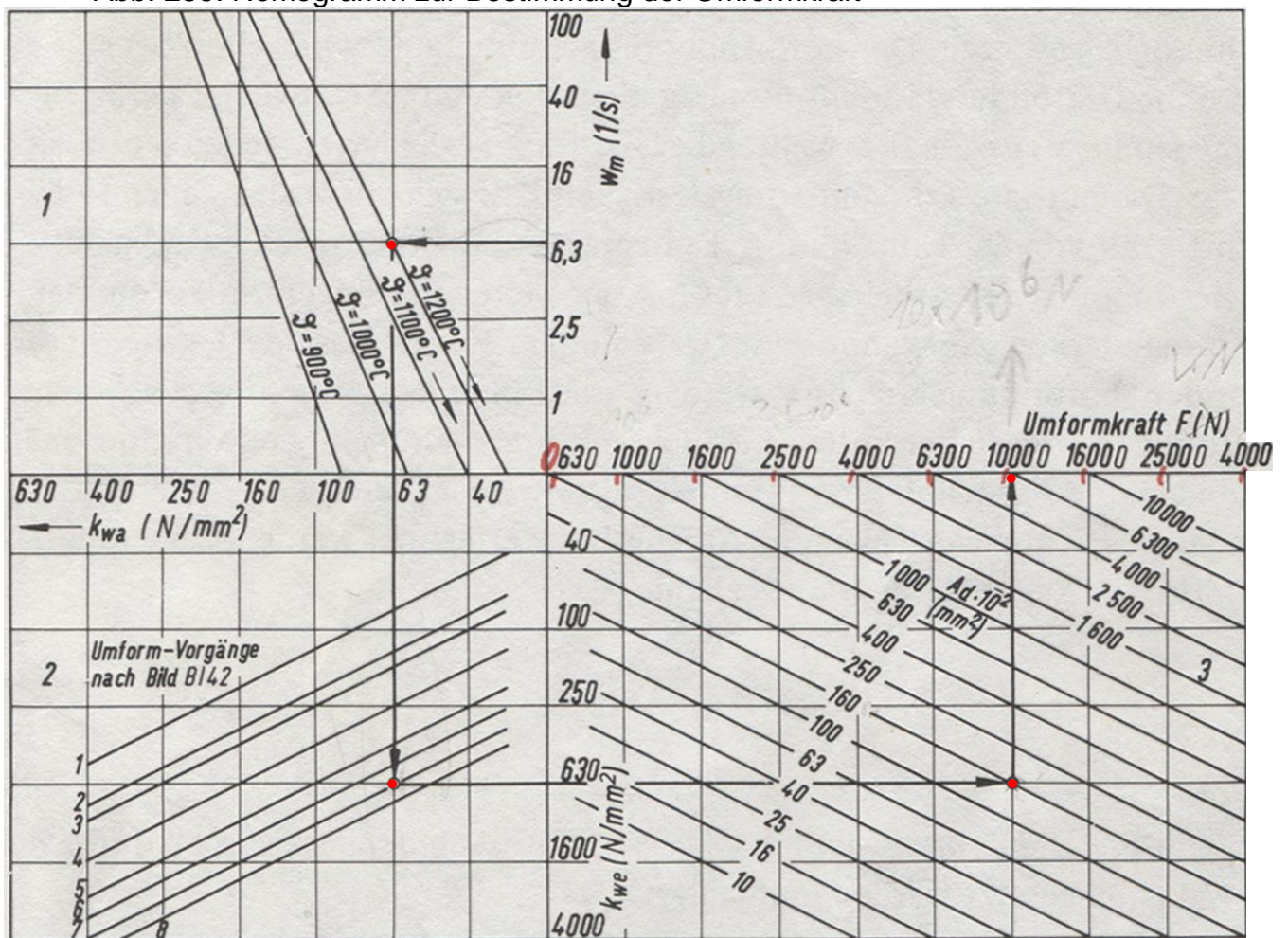


Abb. 259: Nomogramm zur Bestimmung der Umformkraft



9.1.2.5 Gesenkschmieden/Arbeitsbedarf

warum ? → Auswahl der geeigneten Umformmaschine.

$$w = \frac{W_{id}}{V} \quad \text{in Nmm/mm}^3$$

$$W_{id} = \int_0^\varphi d\varphi = V \cdot k_{fm} \cdot \varphi \quad \text{in Nmm}$$

Umformarbeit: $W =$ * in Nmm

*gilt exakt nur für das Stauchen zwischen ebenen Bahnen mit $\eta_f = 0,60 \dots 0,95$

= f (Werkstoff, φ , μ , T, w_m)

Berechnung von W sehr kompliziert, da

⇒ η_f nur durch Messungen bestimmbar

⇒ $\varphi \rightarrow \varphi_m$, da $\varphi = f$ (Werkstoffzone) φ_m

[V aus Gewicht ($V = m/\rho \approx$ umgeformtes Volumen)]

⇒ k_{fm} aus Fließkurve = f (Werkstoff, φ , w_m , T)

⇒ Form- und Grat-Einflüsse (verwickelte Teile)

⇒ Aufstellung von Nomogrammen zur Ermittlung des Arbeitsbedarfs in 1. Näherung

Die Nomogramme gelten nur für Stähle bis 0,45 % C sowie für niedrig legierte Stähle

Beispiel:

Gesenkschmieden eines Schmiedeteils unter einem Gegenschlaghammer*

gegeben: $T = 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$
 $v = 5600 \text{ mm/s}$
 $h_0 = 125 \text{ mm}$
 $V = 100.000 \text{ mm}^2$
 $\varphi = 0,63^*$
Umformvorgang Nr. 6

gesucht : Umformarbeit W in kNm

Lösung : mit Hilfe des Nomogramms zur Ermittlung der Umformarbeit
dazu w_0 - und w_m -Bestimmung:

FÄ-Widerstand: aus Feld 1* $\rightarrow k_{wa} = 100 \text{ N/mm}^2$

FÄ-Widerstand: aus Feld 2* $\rightarrow k_{wm} = 315 \text{ N/mm}^2$

spez. FÄ-Arbeit: aus Feld 3* $\rightarrow w = 200 \text{ Nmm/mm}^3$

FÄ-Arbeit: aus Feld 4* $\rightarrow W = 20 \text{ kNm}$

Abb. 260: Umformvorgänge zur Ermittlung der Umformarbeit

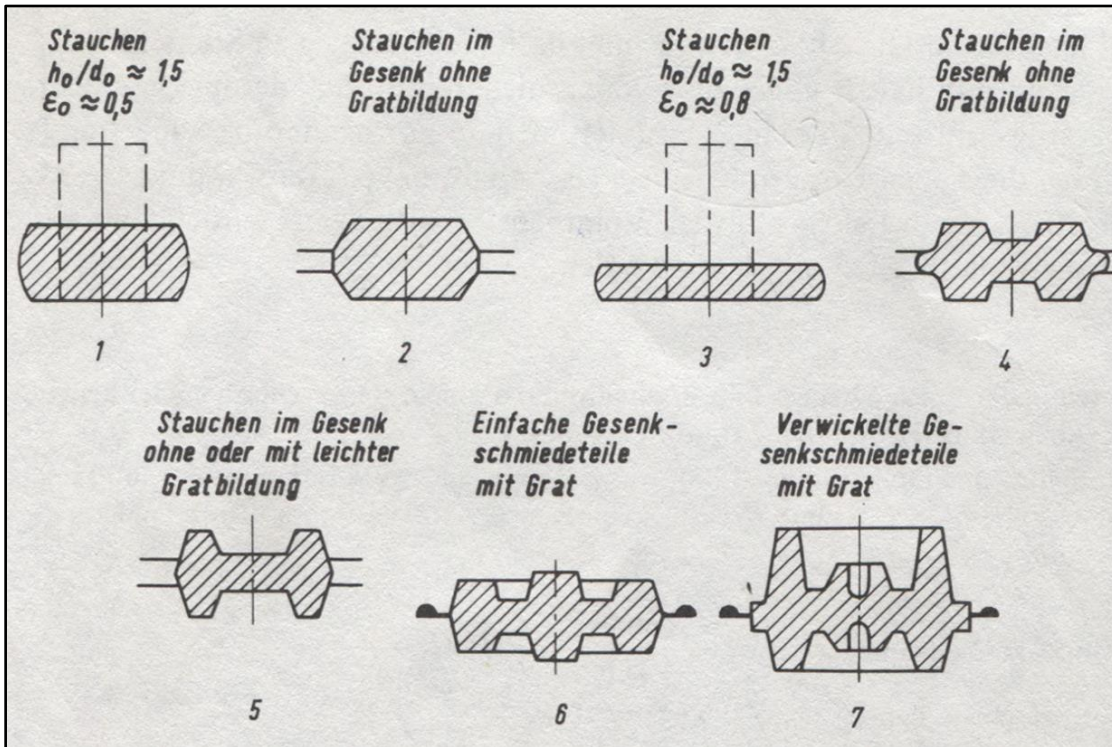
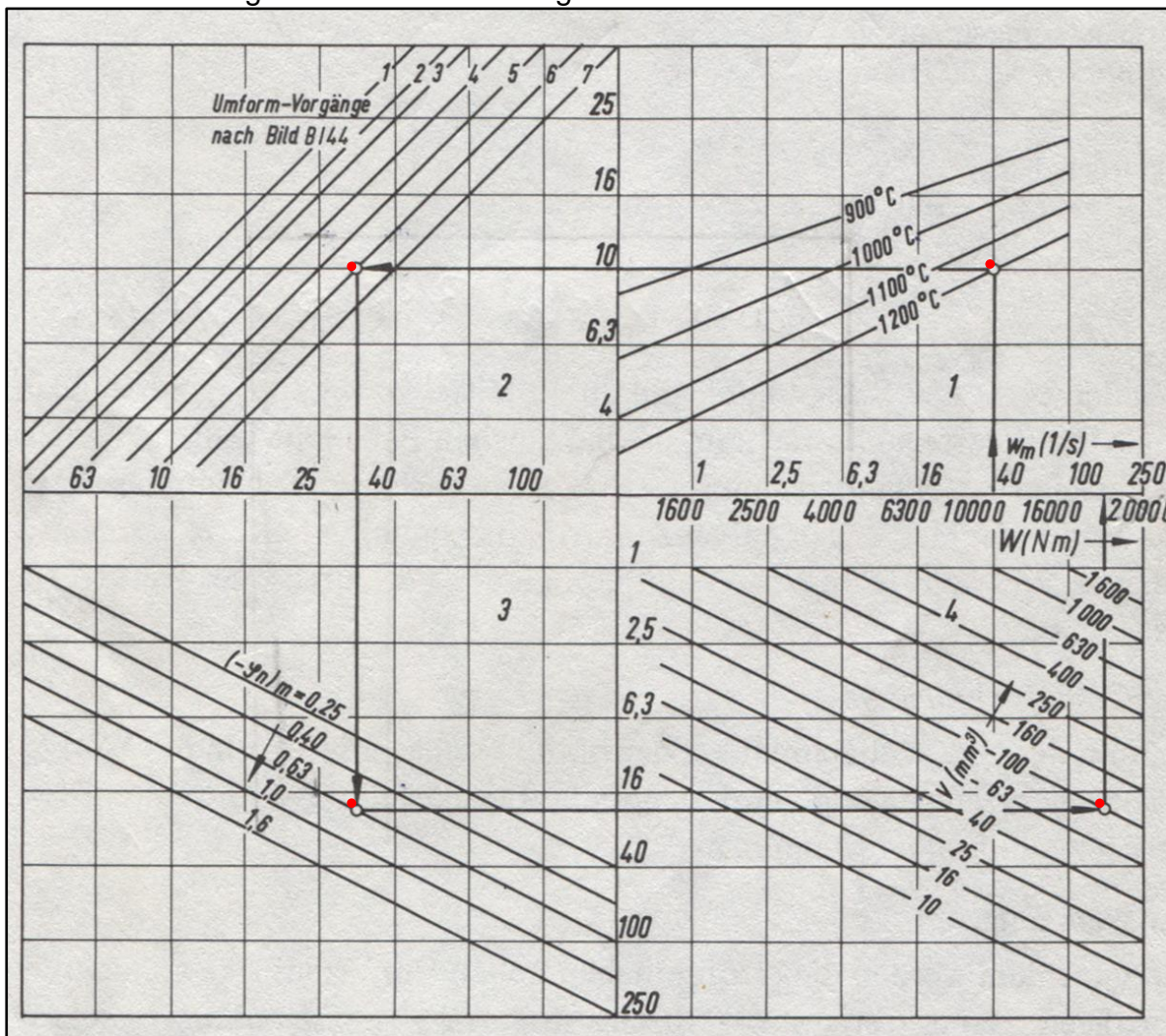


Abb. 261: : Nomogramm zur Bestimmung der Umformarbeit



Berechnung von Kraft und Arbeitsbedarf mit Hilfe von Nomogrammen (s. nächste Abb.)

Ablesen logarithmierter Achsen

Sowohl beim Ermitteln des "normalen" Wertes aus Diagrammen mit logarithmierten Achsen als auch beim Eintragen von "normalen" Werten in solche Diagramme kann folgender

Ansatz hilfreich sein:

$$\frac{\log 10}{l} = \frac{\log y}{x}$$

mit l = Länge einer Dekade in cm

y = "normaler" Wert in ...

x = Achsenabschnitt in cm

$$y = 10^{\frac{x}{l}} \cdot c \Rightarrow \text{Ermittlung des "normalen" Wertes in ...}$$

$$x = \log\left(\frac{y}{c}\right) \cdot l \Rightarrow \text{Ermittlung des Achsenabschnittes in cm}$$

mit c = Faktor entsprechend der untersuchten Dekade (0,1; 1; 10; 100 etc.)

s. auch Schmiedepraktikum auf meiner [homepage](#)

10. Liste der Fachausdrücke zur FEV-VL (Teil Umformtechnik)

Die Bedeutung der folgenden Ausdrücke sollte Ihnen bekannt sein:

deutsch	englisch
Allotropie	allotropy
Amboß	anvil
Arbeitswalze	roll, platen
Arrheniusgleichung	Arrhenius equation
Bandgießen	tape casting
Beschichten	coating
Block	bar, block, ingot
Bramme	slab
Burgersvektor	Burgersvektor
Dehnung	strain
dichteste Kugelpackung	most dense sphere package
Druckumformen	pressure-forming
Dünnbandgießen	light (thin) tape casting
Dünnbrammengießen	light (thin) slab casting
Durchschmieden	through-forging (?)
Durchwalzen	through-rolling
Durchziehbedingung	pull-through condition
Eingriffsbogen	arc of contact
Einziehbedingung	pulling-in condition
Elastizität	elasticity
Elementarzelle	unit cell
Erholung	recovery
Faserverlauf	fiber course
Fe-Fe ₃ C-Diagramm	Fe-Fe ₃ C-diagram
Festigkeitshypothesen	stress (strength-) hypothesis
Flachprodukt	flat product
Fließen	flow
Fließkurvenatlas	book containing flow curves
Fließspannung	flow stress (tension)
Formänderung	deformation
Formänderungsfestigkeit	deformation
Formänderungswiderstand	deformation resistance, consistency
Formänderungswirkungsgrad	theoretical to actual ratio
Frank-Read-Quelle	Frank-Read-source
Fügen	jointing, (welding)
Galvanoformung	galvanoforming
Gefüge	micro structure
Gesenkschmieden	drop forging, die stamping
Gewindewalzen	thread rolling
Gießwalzen	cast rolling
Gitterbaufehler	lattice defect
Gitterebene	lattice plane
Gitterrichtung	lattice direction
glatte Walzen	even, smooth, plain rolls
Gleichmaßdehnung	percentage elongation before reduction
Gleitebene	slip plane, gliding plane
Gleitsystem	gliding system

Greifbedingung	biting condition
Greifwinkel	angle of bite
Halbwarmumformung	semi hot deformation
Hammer	hammer
Hammerbär	hammer tup
Idealkristall	ideal crystal
Kaliberwalzen	grooved roll
Kaltumformung	cold working
Kaltverfestigung	strain hardening
Kegelstauchversuch	conical compression test
kfz	bfc
Kokille	chill, ingot mould
Kornwachstum	graingrowth
kritische Schubspannung	critical shear strain
krz	cbc
Kupplungszapfen	palm end
Längswalzen	longitudinal rolling
Laufzapfen	journal
Massenverteilung	mass ditribution
Metallbindung	metallic bond
Millersche Indizees	Miller indices
Mohrsche Schubspannungshypothese	Mohrs´ shear stress-hypothesis
Mohrscher Spannungskreis	Mohrs´ cirle of tension
nanokristalline Werkstoffe	nanograin material
Nomogramm	nomograph
Normalspannung	direct stress
Normalspannungsbruch	direct stress fracture
Packungsdichte	packing density
Pilgerschrittverfahren	reciprocation rolling process
Plastizität	plasticity
Querwalzen	transverse rolling
Realkristall	real crystal
Reckwalzen	stretch rolling
Reibungskoeffizient	coeffizient of friction
Reibungswinkel	angle of friction
Reihle	Reihle
Rekristallisation	recrystallisation
Rekristallisationsschaubild	recrystallisation graph
Schabotte	anvil bed
Schmidtsche Schubspannungshypoth.	shear stress hypothesis of Schmidt
Schmiedepresse	forging press
Schrägwalzen	rotary forging
Schubspannung	shear stress
Schubspannungsbruch	shear stress fracture
Siebel	Siebel
Sintern	sinter
Spanlose Fertigung	noncutting manufacturing (shaping)
Spannung	stress, tension
Spannungs-Dehnungs-Diagramm	stress -strain-diagramm
Spannungshypothese	stress-hypothesis
Staffelwalze	stepped roll
Stauchen	forging, metal gathering, shrinking

Stoffeigenschaftenändern	change properties of material
Stranggießen	continous casting
Streckgrenze	yield strength
Stützwalze	idele roll, backing roll
Thermomechanisches Walzen (TM)	thermomechanical rolling
Trennen	seperate, disconnect, disjoint (?)
Umformarbeit (ideal, real)	forming, shaping, deformat. work (ideal, real)
Umformgeschwindigkeit	deformation rate
Umformgrad	degree of deformation
Umformkraft (ideal, real)	force of deformation
Umformtechnik	metall working, metall forming
Urformen	moulding
Verfestigungsexponent	hardening exponent
Vergleichsspannung	effective stress, reference stress
Versetzung	islocation
Versetzungsnetzwerk	dislocation network
Verzunderung	scaling oxidation at high temperature
Volumenkonstanz	constance of volume
Vorbandgießen (CSP-Verfahren)	constant strip production (csp)
wahre Dehnung	true elongation (strain)
wahre Spannung	true stress
wahres Spannungs-Dehnungs-Diagr.m	true stress strain diagramm
Walzenballen	roll barrel, roll body
Walzengerüst	roll housing
Walzkraft	roll force
Walzleistung	roll power (performance)
Walzmoment	roll moment
Walzspalt	roll clearance
Warmumformung	hot forming, - shaping, - deformation
Zerschmieden	overforge
ZTU-Schaubild	ttt-diagram
Zugdruckumformen	tension-compression shaping
Zugumformen	tension-shaping
Zunder	scale

Übersetzung ohne Gewähr

Ergänzend zu den Arbeitsblättern werden folgende Unterlagen zur Verfügung gestellt:

- Veröffentlichung auf meiner Homepage ,
<http://homepages.fh-regensburg.de/~heh39273/aufsatz.shtml>,
- ca. 15 „Merkfolien“, die in der Vorlesung als Zusammenfassung einzelner Kapitel zum Abschreiben angeboten werden (keine Kopien)

c) Gesenkschmieden: F- und W- Bestimmung mit Hilfe von Nomogrammen

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{v}{h_0} = w_0 \quad \Leftrightarrow \quad \text{Umformgeschwindigkeit in 1/s}$$

Umformkraft: $F = A_d \cdot k_{we}$ in N

Anfängliche Umformgeschwindigkeit: $w_0 = v/h_0$ in 1/s

Mittlere Umformgeschwindigkeit w_m in Abhängigkeit von der benutzten Werkzeugmaschine:

1. arbeitsgebundene Maschinen

Hammer und Reibspindelpresse: $w_m = (0,85 \dots 0,9) \cdot w_0$ in 1/s

Hammer:

$v = 5 \dots 7 \text{ m/s}$
 $w_0 = 40 \dots 160 \text{ 1/s}$

Spindelpresse:

$v = 0,3 \dots 0,4 \text{ m/s}$
 $w_0 = 4 \dots 25 \text{ 1/s}$

2. kraftgebundene Maschinen

hydraulische Presse: $w_m = (1,3 \dots 1,6) \cdot w_0$ in 1/s

$v = 0,2 \dots 0,5 \text{ m/s}$
 $w_0 = 0,01 \dots 10 \text{ 1/s}$

3. weggebundene Maschinen:

Kurbel- bzw Exyzenterpresse : $w_m = (0,3 \dots 0,4) \cdot w_0$ in 1/s

$v = 0,4 \dots 0,6 \text{ m/s}$
 $w_0 = 4 \dots 25 \text{ 1/s}$

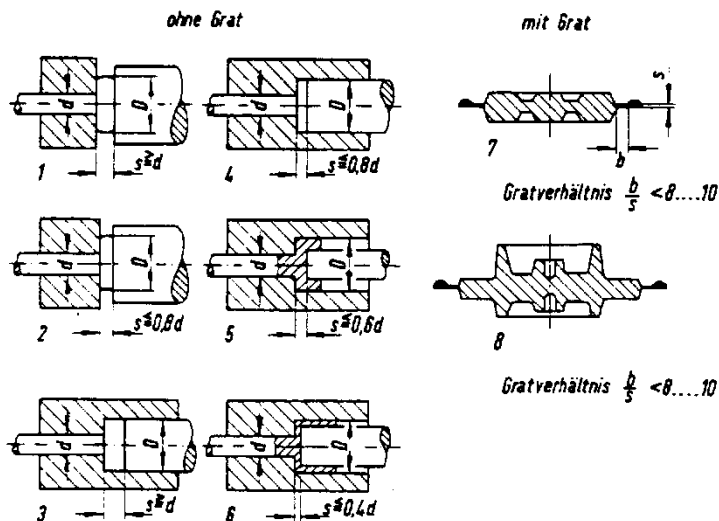
c1) Auswertungshilfe für Diagramme mit logarithmierten Achsen:

$y = 10^{\frac{x}{l}} \cdot c \quad \Leftrightarrow \quad \text{"normaler" Wert in ...}$

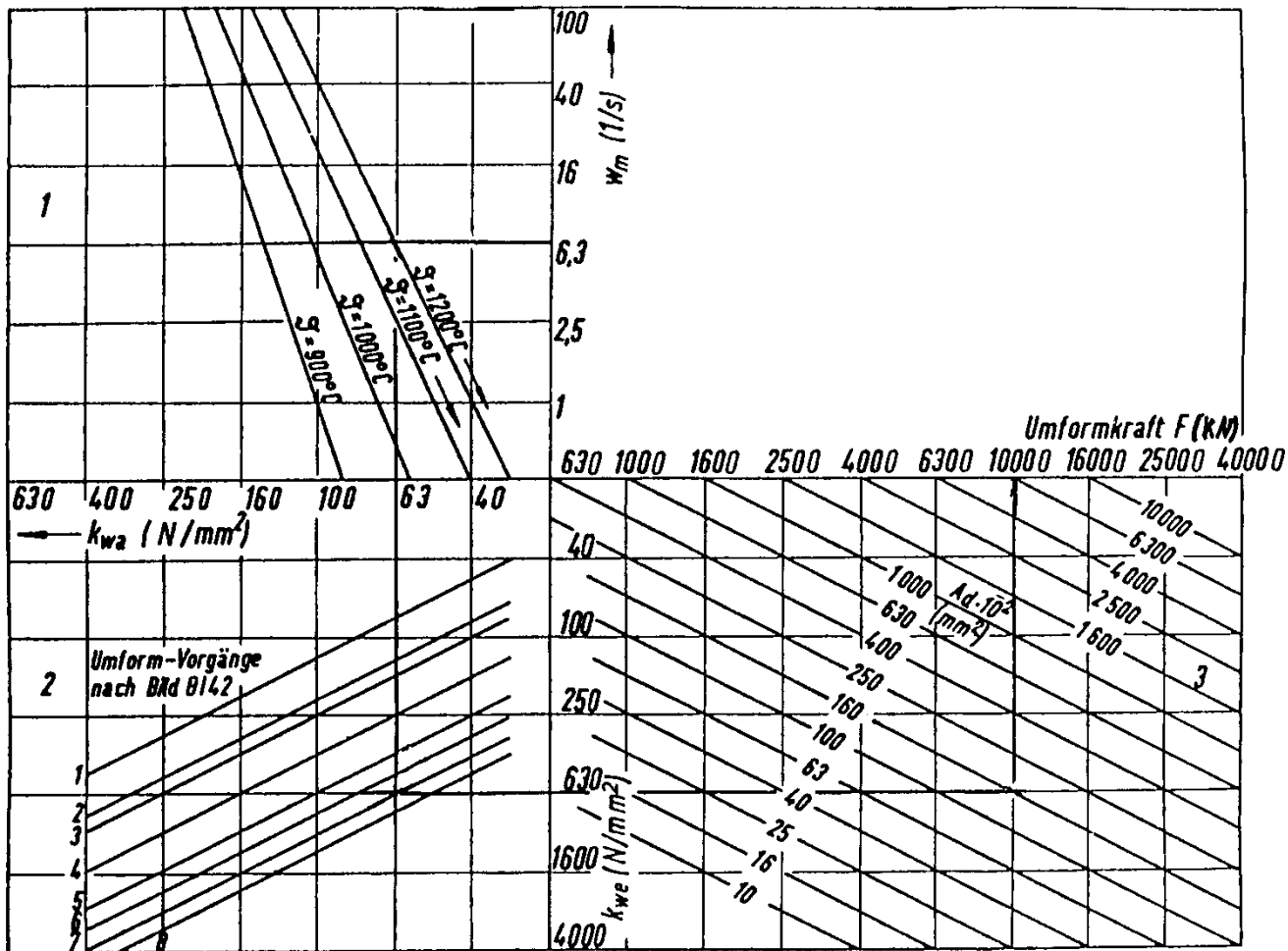
$x = \log\left(\frac{y}{c}\right) \cdot l \quad \Leftrightarrow \quad \text{Achsenabschnitt in mm}$

mit $l =$ Länge einer Dekade
 $c =$ unterster Wert der Dekade (10,100,1000 etc.)

c2) Umformvorgänge zur Ermittlung der Umformkräfte



Nomogramm zur Bestimmung der Umformkraft:



d) Walzen:

$$\alpha_0 \leq \rho$$

⇒ Greifen

$$\alpha_0 \leq 2\rho$$

⇒ Durchwalzen

$$\mu = \operatorname{tg} \rho$$

⇒ Reibungskoeffizient

$$\Delta h = 4 \cdot r \cdot \sin^2 \frac{\alpha_0}{2} \approx r \cdot \alpha_0^2$$

⇒ Anstellung in mm

$$F_{id} = \frac{1}{2} \cdot k_{fm} \cdot A_1 \cdot \left| \ln \frac{h_1}{h_0} \right|$$

⇒ ideale Umfangskraft in N

$$F_{tr} = \frac{1}{\eta_f} \cdot F_{id}$$

⇒ reale Umformkraft in N

$$M_r = F_{tr} \cdot r = \frac{r}{2\eta_f} \cdot k_{fm} \cdot A_1 \cdot \left| \ln \frac{h_1}{h_0} \right|$$

⇒ Walzen-Drehmoment in Nm

$$P_r = \frac{1}{\eta_f} \cdot k_{fm} \cdot A_1 \cdot \left| \ln \frac{h_1}{h_0} \right| \cdot v_t$$

⇒ Walzen-Leistung in kW

(v_t = Umfangsgeschw.) in m/s
da gilt:

$$P_r = M \cdot \omega = F_{tr} \cdot r \cdot \omega = F_{tr} \cdot v_t$$

$$v_t = \omega \cdot r = d \cdot \pi \cdot f$$

d1) Bestimmung des Reibungskoeffizienten μ für Stahl:

$$\mu = 1,05 - 0,5 \cdot 10^{-3} T - 0,05 \cdot v_t \quad (= F_R/F_N)$$

mit T = Temperatur des Walzgutes in °C ($700 \text{ °C} \leq T \leq 1200 \text{ °C}$)

v = Walzgeschwindigkeit ($5 \geq v \geq 0 \text{ m/s}$)

für Hartgußwalzen: $\mu_H = \mu - 0,1$

für geschliffene und Stahlgußwalzen: $\mu_S = \mu - 0,21$

e) Galvanoformen:

$$\Delta m = \frac{M \cdot I \cdot t}{z \cdot F}$$

⇒ abgeschiedene Masse in g

mit $F = 96480 \text{ As/mol}$

$$\text{pH} = -\log c_H^+$$

⇒ pH-Wert

$$n = m/M$$

⇒ Anzahl der Mole

$$Q = I \cdot t = z \cdot \Delta n \cdot N_L \cdot e_0 \quad \Rightarrow \text{Ladungsmenge in C mit}$$

$$N_L = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ 1/mol}, e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\eta = Q_{\text{real}} / Q_{\text{ideal}}$$

$$1 \text{ Mol} \hat{=} 22,4 \text{ lit (unter Normalbedingungen)}$$

f) Tiefziehen:

$\beta = \frac{D_0}{d_1}$	\Rightarrow	Ziehverhältnis	in 1
$\beta_{\text{ges}} = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \dots \cdot \beta_n$	\Rightarrow	Gesamtziehverhältnis	in 1
$p_N = \left[(\beta_1 - 1)^3 + \frac{d_1}{200 \cdot s} \right] \cdot \frac{R_m}{400}$	\Rightarrow	Niederhalter-Druck	N/mm ²
$F_N = \frac{\pi}{4} \cdot (D_0^2 - d_N^2) \cdot p_N$	\Rightarrow	Niederhalter-Kraft	in N
$F_B = \pi \cdot (d_1 + s) \cdot s \cdot R_m \geq F_Z$	\Rightarrow	Bodenreiß-Kraft	in N
$F_{Zg} = F_{id} + F_{RN} + F_{RZ} + F_B = \frac{F_{id}}{\eta_F}$	\Rightarrow	Ges. Stempel-Kraft	in N
$F_{id} = \pi \cdot d_1 \cdot s \cdot k_{fm} \cdot (\ln \beta_1 - c)$	\Rightarrow	Ges. id. Stempel-Kraft (nach Siebel)	in N
$F_{Zg} = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot s \cdot k_{fm} \cdot (\ln \beta_1 - c)}{\eta_f}$	\Rightarrow	Ges. Stempel-Kraft (nach Siebel)	in N
$F_{Zg} = 5 \cdot d_1 \cdot s \cdot k_{fm} \cdot \ln \beta_1$	\Rightarrow	Ges. Stempel-Kraft (nach Siebel, vereinfacht)	in N
$F = F_Z + F_N$	\Rightarrow	Werkzeugmaschinen-Kraft	in N
$r_z = 0,035 \cdot [50 + (D_0 - d_1)] \cdot \sqrt{s_0}$	\Rightarrow	Ziehkanten-Radius	in mm
$u_z = s_0 + 0,07 \cdot \sqrt{10 \cdot s_0}$	\Rightarrow	Ziehspalt-Breite (Stahl)	in mm
$u_z = s_0 + 0,02 \cdot \sqrt{10 \cdot s_0}$	\Rightarrow	Ziehspalt-Breite (Al)	in mm
$u_z = s_0 + 0,04 \cdot \sqrt{10 \cdot s_0}$	\Rightarrow	Ziehspalt-Breite (NE-Metalle)	in mm
$u_z = s_0 + 0,2 \cdot \sqrt{10 \cdot s_0}$	\Rightarrow	Ziehspalt-Breite (h.-warmfest)	in mm
$D_0 = \sqrt{d_1^2 + 4 \cdot h \cdot (d_1 + s)}$ mit $s_0 = s_1 = s$	\Rightarrow	Zuschnitt - f	in mm
$D_0 = \sqrt{\frac{s_1}{s_0} \cdot [d_1^2 + 4 \cdot h \cdot (d_1 + s)]}$ mit $s_1 < s_0$	\Rightarrow	Zuschnitt - f	in mm
$\beta' = (\beta_{100} + e) - \frac{e \cdot d_1}{100 \cdot s_0}$ mit $0,05 < e < 0,15$	\Rightarrow	Grenz-Ziehverhältnis	in mm
$y = a \cdot \ln \frac{a + \sqrt{a^2 - x^2}}{x} - \sqrt{a^2 - x^2}$	\Rightarrow	Tractrix - Kurve	