

Fertigunstechnik

Gian Maria Ernst - ernstg
Based on the work by F. Spengler
Version: January 20, 2025

Definition und Aufgaben

Definition:

- Reproduzierbare Umwandlung von Rohstoffen zu Produkten
- Herstellung Geometrisch bestimmter fester Körper

Aufgaben:

- Erzeugung eines Mehrwerts
- Minimierung der Energie, Fertigungsschritte und Umweltbelastung
- Auswahl geeigneter Werkstoffe und Fertigungsverfahren

NC-Programmiersysteme:

- Programmierunterstützung beim Drehen, Fräsen, Bohren
- Automatische Dimensionierung von Bauteilen
- Automatische Schnittaufteilung

Kostenrechnung

Maschinenstundensatz

$$K_{MH} = \frac{K_A + K_Z + K_R + K_I + K_E}{T_L}$$

$$T_L = x_s \cdot x_d \cdot x_j \cdot x_N$$

K_{MH}: Maschinenstundensatz [\$/h]

K_A: Abschreibungskosten [\$/j]

K_Z: Zinsen [\$/j]

K_R: Reparaturkosten [\$/j]

K_I: Instandhaltungskosten [\$/j]

K_E: Energiekosten [\$/j]

T_L : Nutzungsdauer [h/j]

x_s : # Schichten

x_d : Schichtdauer [h/d]

x_j : Jahresarbeitstage [d/j]

x_N : Nutzungograd

$$K_A = \frac{WBW}{T_N}, K_Z = \frac{AW + RW}{2} \cdot x_Z, K_R = w \cdot F$$

WBW: Wiederbeschaffungswert d.
Maschine [\$]

T_N: Gesamtnutzungsdauer [a]

$$w: \text{Raumkosten pro Fläche } \left[\frac{\$}{a \cdot m^2} \right]$$

AW: Anschaffungswert [\$]

$$F: \text{Grundfläche der Anlage } [m^2]$$

RW: Restwert [\$]

x_Z: kalk. Zinssatz [1/a]

Stückkosten

Stückkosten k = Variable Kosten k_V + fixe Kosten k_F

KVO: Vorbereitungskosten [\$]

K_S: Werkzeug und Messkosten [\$]

KPR: Prüfkosten [\$]

KAW: Auftr.wiederholkosten [\$]

K_{LH}: Lohnkosten [\$]

$$K_{AW} = (K_{MH} + K_{LH}) \cdot t_R + K_{RA} + K_T$$

t_R: Rüstzeit [h]

K_{RA}: Rüstkosten [\$]

K_T: Fertigungssteuerung [\$]

KFE: Fertigungskosten [\$]

KWH: Werkzeugkosten [\$]

t_e: Fertigungszeit [h]

$$K_{FE} = (K_{MH} + K_{LH} + K_{WH}) \cdot t_e$$

Prozesse und Prozessketten

Planungsprozesse:

Key Performance Dimensions: Vorlaufzeit ↓, Qualität ↑, Emissionen ↓, Kosten ↓
Concurrent engineering: Ermöglicht gleichzeitige Arbeitsschritte (nicht seq./ nicht lin.).

CAE: Computer Aided Engineering

CAM: Computer Aided Manufacturing

Lean Manufacturing: Kosten ↓ und Produktivität ↑

Fünf Prinzipien: Definition des Wertes für Kunden, Identifikation des Wertstroms, Umsetzung des Flussprinzips, Einführung des Pull-Prinzips, Streben nach Perfektion.

Verschwendungen: Überproduktion, Unnötige Bewegung, Hohe Bestände, Transport, Wartezeiten, Ineffizienz, Nacharbeit/Ausschuss.

Kanban: "Visuelle Karte". Klassisches Pull-System. Selbstregulierende Regelkreise gewährleisten Materialversorgung. Es wird alles nur auf Nachfrage ausgeführt. Verhindern von Überproduktion.

Automatisierungspyramide: Feldebene (Sensoren & Aktoren), Steuerungsebene (Steuerungen und Überwachungsanlagen), Leitebene (Erfasst und Daten und zeigt diese an), Unternehmensebene (Regelt und steuert die ganzen Systeme).

Prozesse:

- Urformen (Gießen, Sintern, 3D)
- Umformen (Schmieden, Walzen, Tiefziehen)
- Trennen (Drehen, Fräsen, Bohren, Scherschneiden)
- Fügen (Schweißen, Löten, Kleben)
- Beschichten (Galvanisieren, Lackieren, Aufdampfen)
- Stoffeigenschaften ändern (Härten, Glühen, Magnetisieren)

Messen und Prüfen:

- Messen: Quantitative und vergleichende Erfassung einer Eigenschaft
Ermitteln einer Länge/ Winkel mit einem Messgerät → Messwert
- Prüfen: Qualitative Beurteilung einer gemessenen Eigenschaft
Prüfen ob Gegenstand die geforderten Merkmale aufweist → Funktionstüchtig
- Kalibrieren: Vergleich eines Messwertes mit dem genormten Referenzstandart, Dokumentieren der Abweichung, Berechnung der Messunsicherheit und Erstellen des Zertifikates.

Berührende Messverfahren:

Geometrie der Tastspitze beeinflusst gemessene Rauheit. Empfindliche Oberflächen können durch die Berührung der Tastspitze beschädigt werden. Flächige Messung nur mit hohem Aufwand (Messzeit) realisierbar.

Optische Messverfahren:

Hohe Messgeschwindigkeit. Schwierigkeiten bei spiegelnden Oberflächen. Oberfläche muss sauber sein

Messunsicherheiten entstehen durch: Vibrationen, elektromagnetische Felder, Staub und Temperaturschwankungen.

Prozessfähigkeit

Prozessfähigkeitsindex C_p :

- Verhältnis der Toleranzbreite zur Streuung der Prozesswerte
- Ignoriert Lage der Prozesswerte
- Kann der Prozess innerhalb der Toleranzen bleiben, wenn er perfekt zentriert ist?

Prozessfähigkeitsindex mit Lagekorrektur C_{pk} :

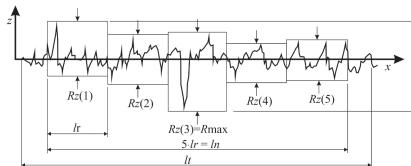
- Berücksichtigt auch die Lage der Prozesswerte
- Tatsächliche Prozessfähigkeit
- Wie gut arbeitet der Prozess tatsächlich?

$$C_p = \frac{OTG - UTG}{6\sigma}$$

$$C_{pk} = \frac{\min(OTG - \mu, \mu - UTG)}{3\sigma}$$

- $C < 1$: Prozess kann Spezifikationen nicht erfüllen
- $C = 1$: Prozess bedingt geeignet
- $C > 1$: Prozess kann Spezifikationen erfüllen

Rauheiten



R_z: gemittelte Rautiefe – Mittelwert zwischen höchstem und tiefstem Punkt aus 5 aufeinanderfolgenden Intervallen

R_{max}: maximale Rautiefe – grösste Differenz innerhalb eines Intervalls

R_t: Gesamthöhe des Profils – grösste Differenz über die gesamte Länge

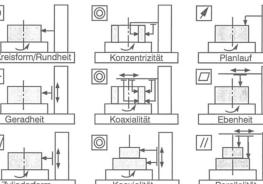
R_a: arithmetischer Mittelwert – Mittelwert der absoluten Profilwerte

R_q: Quadratischer Mittelwert – gewichtet grosse Werte stärker

$$R_t > R_{max} > R_z$$

$$R_a > R_q$$

Lagetoleranzen



Gestaltabweichungen

- 1 Ord. Form - Gerad, Eben, Rundheitsabweichung
- 2 Ord. Welligkeit - Wellen
- 3 Ord. Rauheit - Rillen
- 4 Ord. Rauheit - Riefen, Schuppen, Kuppen
- 5 Ord. Gefügestruktur
- 6 Ord. Gitterfehler

Simulation

Ziele:

Entwicklungszeit ↓, Fehler ↓, Fertigungsverfahren planen, Fertigung optimieren, Ausschuss ↓, Zusammenhänge verstehen und vorhersehen, Kosten planen

Typen:

- Analytische/nichtnumerische Simulation (CFD, FEM)
- Grafische Simulation (CAD, VR)
- Realexperimente

Möglichkeiten:

Giessprozesse (Formfüllung Erstarrung), Umformen (Kraft, Spannungen, Mikrostruktur), Zerspanen (Spanbildung, Thermik), Fügen (Schweißnähte, Verzug, Einflusszone), Werkstoffe (mikrostruktur, Gefüge, Kristalle)

Schritte zur FE Lösung:

Zu lösendes Problem → Variationsformulierung → Diskretisierung → Assemblierung → Lösung der DGL

Wahre vs FEM Lösung:

Im FEM wird nur an endlich vielen Punkten gerechnet. Mit der FEM-Lösung wird die ursprüngliche DGL nicht notwendigerweise exakt erfüllt.

Fehlerquellen: Physisches System, Mathematisches Modell, Diskretes Modell, FEM Lösung

Die **Analytische** Lösung erfüllt Feldproblem auf gesamten Lösungsgebiet.
Für **FEM bei thermischen Problemen** werden drei unabhängige Kennwerte (Wärmekapazität c , Wärmeleitfähigkeit λ , Dichte ρ) benötigt.

1D Wärmeleitung mit FEM: $\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{k}{c\rho\lambda} \Delta T$

Nichtlinearitäten:

bei **grossen Deformationen, Reibung und Zeitabhängigkeit**

Die Lösung ist dann nicht in einem Schritt möglich, sondern via Iteration (Zeitdiskretisierung).

Es gibt drei Arten von Nichtlinearitäten:

- Geometrisch: Verformung zu gross
- Materialbasiert: nichtlineares Materialverhalten
- Strukturbasiert: Lagerbedingungen verändern sich

Bei Zerspanen treten alle drei auf.

Implizite vs. explizite FEM

Implizit:

- + Grössere Zeitschritte möglich
- + stabiles Verfahren falls Konvergenz
- + Effektiv bei kleinen, linearen und statischen Problemen
- Hoher Zeitaufwand
- Keine Konvergenz bei Instabilitäten (Beulen oder Falten)

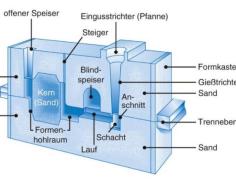
Explizit:

- + Gut für hochdynamische, grosse Systeme
- + Gut bei Nichtlinearitäten
- + Sehr effektiv bei diagonaler Massematrrix
- + schnellere Konvergenz
- kleinere Zeitschritte
- Bedingt stabil
- Skalierung von Masse oder Zeit führt zu dynamischen Effekten
- numerische Fehler schwer abschätzbar

Urformen

Gießsystem

- Anschlitt:** System der Zuleitungen. Dient zur Steuerung von Füll- und Erstarrungs- vorgang, sowie zum Auffangen von Verunreinigungen.



- Speiser:** Reservebehälter für Schmelze, die in die Hohlräume nachfliesst, um Schwindung auszugleichen. Verhältnis von Volumen zu Oberfläche sollte grösser sein als beim Gussstück.

Verlorene Formen

Sandguss in Formsand ist mengenmässig vorherrschend.

Lost-Foam Giessen oder Vollformgiessen ist sehr gut für komplexe Bauteile.

Dabei werden Schäumlinge in Sand eingebettet.

Vorteile: hohe Bauteilkomplexität, geringe Nachbearbeitung und hohe Automation.

Nachteile: hohe Anforderungen an Modellqualität, Zersetzung des Schaums in giftige Gase, Wandsärken < 3mm fast nicht machbar.

Feinguss mit Wachsmodellen ist sehr genau.

Toleranzen bis 0.4% vom Nennmass und $R_z \approx 6 - 30 \mu\text{m}$. Stähle auf Basis von Eisen, Titan, Kupfer, Magnesium, Kobalt, Zirkon. Wird verwendet für Einkristallinen Guss von Schaufeln.

Dauerformen (Druckguss)

Ergibt saubere Flächen und Kanten.

Geringe Wandstärken < 1mm möglich.

Produktivität von bis zu 1000 Schuss pro Stunde.

Warmkammerverfahren:

Schmelze wird aus einer gewärmten Kammer mit einem gewärmten Zylinder in die Form gepresst.

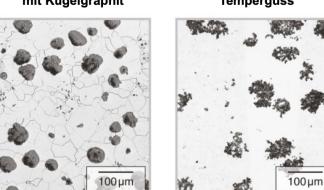
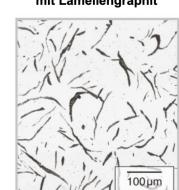
Schnellere Zyklen, legierungen mit tieferem Schmelzpunkt.

Kaltkammerverfahren:

Schmelze wird aus dem Ofen in einen kalten Zylinder gefüllt und von dort in die Form gepresst.

Langsamere Zyklen, legierungen mit höherem Schmelzpunkt, grössere Gussteile

Gusseisen



Lamellengraphit: gute Dämpfungs- und Wärmeleitfähigkeit, spröde und anfällig für Rissbildung

Kugelgraphit: hohe Festigkeit, Bruchdehnung und gute Duktilität

Temperguss: gute Duktilität und Verformbarkeit (dynamisch beanspruchte Bauteile)

Erstarrung

$$t_E = C \cdot M^n$$

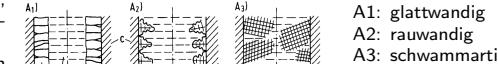
$$M = \frac{V}{A_{eff}}$$

$$A_{eff} = \varepsilon \cdot A$$

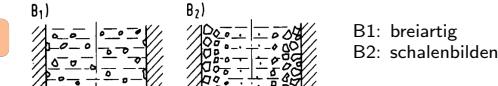
t_E : Erstarrungszeit
 C : Materielkonst. (Stahl 3, Eisen 5-6, Alu 6)
 M : Modul
 ε : Dehnung

$$M_{\text{Speiser}} > M_{\text{Gussstück}}$$

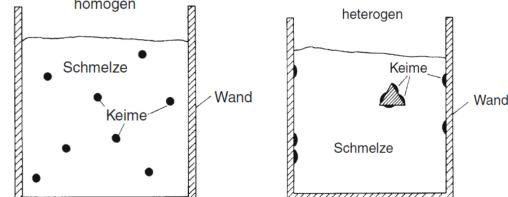
Exogene Erstarrung



Endogene Erstarrung



Keimbildung



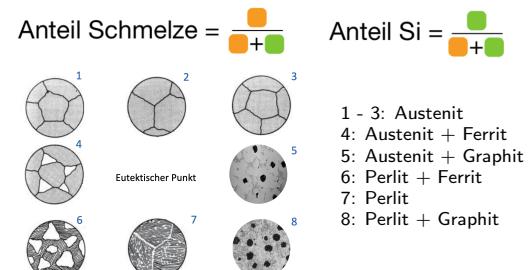
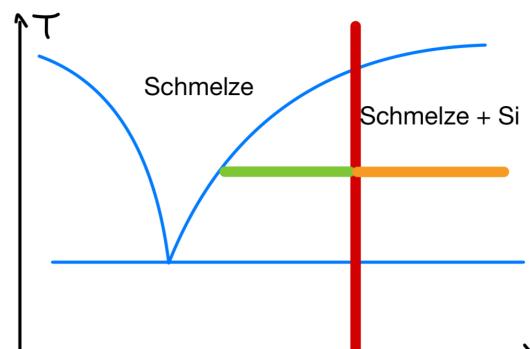
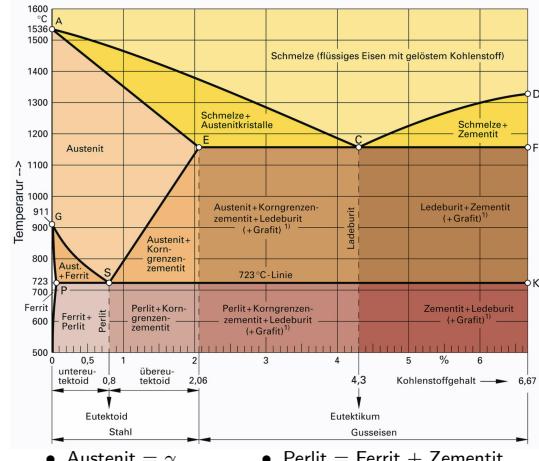
Homogen: einheitliches Gemisch (gleiche Phase), nur bei starker Unterkühlung

Heterogen: Keime bilden sich um Verunreinigungen

Gießleitung und Querschnitt:

$$A = \frac{Q}{\sqrt{2 \cdot g \cdot h}}$$

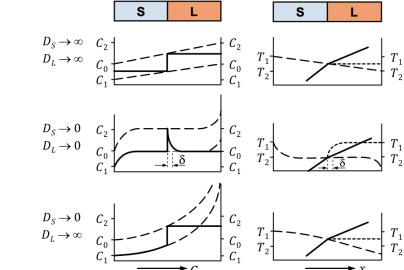
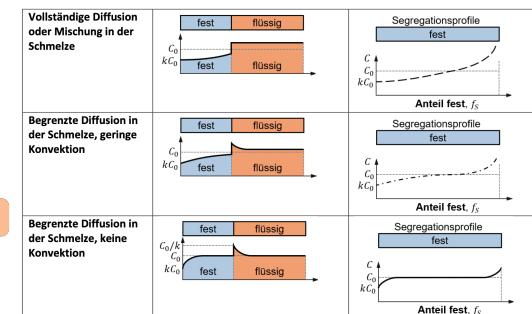
Eisenkarbonststoffdiagramm



Vollst. Konzentrationsausgl. im Festen und in der Schmelze:

$$c_s = k \cdot c_l \Leftrightarrow c_s = k \cdot c_0 \cdot \frac{l}{l - x \cdot (1 - k)}$$

Diffusion

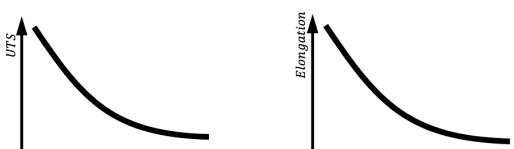


Kritischer Radius: Min. Radius damit Keim wächst

Dentritenarmabstand:

Falls Abkühlrate \uparrow : lokale Erstarrungszeit \downarrow und DAS \downarrow

Mechanischen Eigenschaften und Abkühlrate



Mit steigendem DAS nehmen die mechanischen Eigenschaften ab (Zugfestigkeit, Streckgrenze, Dehnung)

Auslegung Gießprozess

Formfüllungsvermögen:

$$F = \frac{\rho \cdot g \cdot h}{2 \cdot \sigma}$$

Strömungsgeschwindigkeit:

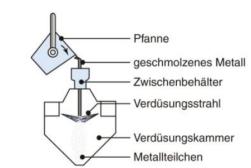
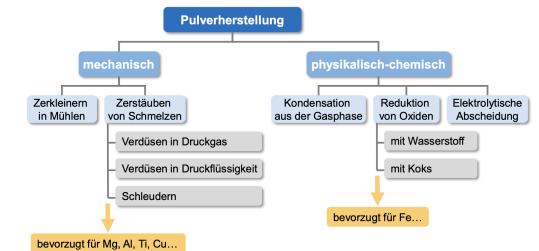
$$v_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot A_1} \cdot v_K$$

Pulvermetallurgie

Eigenschaften:

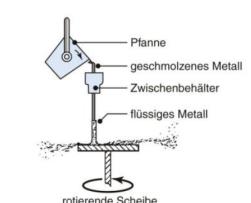
- komplexe Formen mit engen Toleranzen
- nicht Energieaufwendig
- Mechanische Eigenschaften einstellbar
- Hohe Rohstoffausnutzung
- ↑ Porosität, ↓ Bruchdehnung, ↓ Festigkeit

Pulverherstellung



Verdüsen im Druckgas

- Kugelförmig
- 1 - 150 μm



- Schleudern**
- Kugelförmig
 - 50 - 500 μm
 - Kühl Legierung schnell Abkühlrate
 - Hohe Reinheit

Kennwerte

d_{50} = Medianwert, 50% der Partikel sind kleiner als dieser Wert

d_{90} = 90% der Partikel sind kleiner als dieser Wert

d_{10} = 10% der Partikel sind kleiner als dieser Wert

$|d_{90} - d_{10}|$ = Spannweite

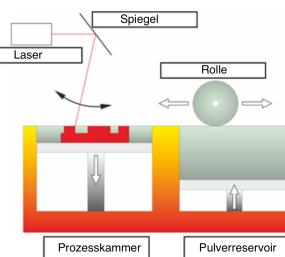
Mastersinterkurve: rel. Dichte $\rho(t, T)$ vs log. Sinterarbeit $\log \Theta$
Unabhängig der Heizrate folgen alle Kurven dem gleichen Trend

Annahmen: Es existiert nur ein einzelner Diffusionsmechanismus, Diffusion thermisch aktiviert, Korngröße/Mikrostruktur variiert nur mit der Dichte, Oberflächendiffusion vernachlässigt.

Einschränkungen: Q (Aufheizrate) hängt von der Partikelgrößenverteilung (PSD) und der Chemie ab. MSC ist empfindlich für Änderungen in der Materialzusammensetzung und Prozessbedingungen.
Bei $\rho(t, T) > 90\%$ nimmt Q ab.

Sintern

Grünkörper (fein/grobkörniges Metall/Keramikpulver) wird durch Wärmebehandlung zu einem festen Werkstück gesintert. Gesinterte Teile sind deshalb nicht homogen (im Gegensatz zu Metalllegierungen) und können eine **Porosität** aufweisen. Diese lässt sich durch Kompaktieren modifizieren. Durch Sintern lassen sich Stoffe zusammenbringen die auf andere Weise schwer oder nicht vereinbar sind. Die Pulverzusammensetzung kann während des Sinterns verändert werden.



Formeln zur Pulvermetallurgie

Ball Milling:

$$\omega_K = \frac{42.2}{D - d}$$

ω_K : Kritische Rotationsgeschw.

D : Behälterdurchmesser

d : Kugeldurchmesser

Richtwert: $\omega_K \approx 75\%$

E-Modul als Funktion der Porosität:

$$E(p) = E_0 \left(1 - \frac{p}{p_c}\right)^f$$

E : Eff. E-Modul des porösen Materials

E_0 : E-Modul des Vollmaterials

p : Porosität

p_c : Porosität wo E verschwindet

f : Parameter (Morphologieabhängig)

Streckenenergiедichte beim sel. Laserschmelzen:

$$E_S = \frac{P_L}{v_s \cdot h_s}$$

E_S : Streckenenergiедichte

P_L : Leistung des Lasers

v_s : Belichtungsgeschwindigkeit

Flächenenergiедichte beim sel. Laserschmelzen:

$$E_A = \frac{P_L}{v_s \cdot h_s \cdot s}$$

E_A : Flächenenergiедichte

h_s : Linienabstand

Volumenenergiедichte beim sel. Laserschmelzen:

$$E_V = \frac{P_L}{v_s \cdot h_s \cdot s \cdot V}$$

E_V : Volumenenergiедichte

s : Schichtdicke

Gesamtenergie des Systems

$$E_{tot} = \gamma_S A_s + \gamma_{GB} A_{GB}$$

γ_S : Oberflächenenergie

A_s : Oberfläche des Kristalls

γ_{GB} : Energie der Korngrenze

A_{GB} : Fläche der Korngrenze

Dihedralwinel

$$\frac{\gamma_{GB}}{\gamma_S} = 2 \cos\left(\frac{\phi_e}{2}\right)$$

ϕ_e : Gleichgewichtswinkel

Verdichtungsdruck

$$p(x) = p_0 \exp\left(-\frac{4\mu x}{D}\right)$$

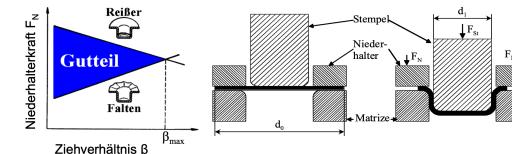
p_0 : Druck an Zylinderoberseite

μ : Reibungskoeffizient zwischen Pulver und Zylinder

x : Abstand zur Zylinderoberseite

D : Durchmesser des Zylinders

Tiefziehen



β : Ziehverhältnis

$$\beta = \frac{d_0}{d_1} = \frac{d_{n-1}}{d_n}$$

$$\beta_{ges} = \beta_1 \cdot \beta_2 \dots \leq 6.5$$

$$\beta_1 \leq 2$$

$$\beta_2 \leq 1.6$$

Warmblechumformung/ Presshärten

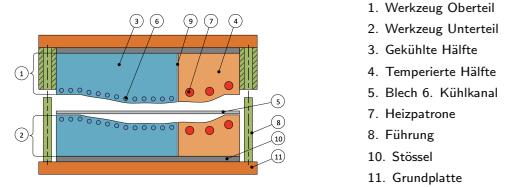
Vorteile:

Vermindert Rückfederung, Werkstoffe gut umformbar, Nach Härtung Werkstoffe hochfest, auch für grosse Serien geeignet, Materialeigenschaften lokal einstellbar.

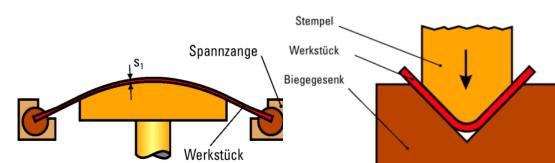
Verfahren:

Cutting, Heating, Hot stamping, Trimming, Coating

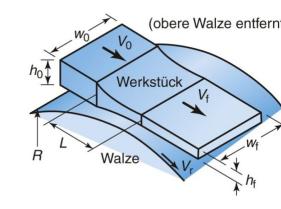
Werkzeugaufbau:



Strecken und Biegen



Walzen



Ziel:

↓ Dicke, ↓ Fehler aus dem Giessprozess, Einstellen mechanischer Eigenschaften (Festigkeit, Textur).

Warmwalzen:

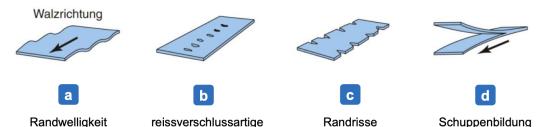
↓ der Korngroß, ↑ mechanischen Eigenschaften. Warmwalzen erzeugt eine schlechtere Oberfläche als Kaltwalzen.

Durchbiegung:

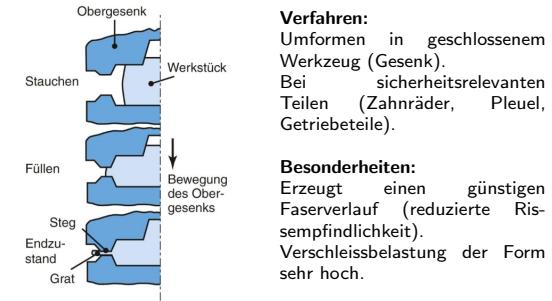
Führt zu Ausbauchung im Werkstoff.

Gegenmaßnahmen: Stützwalzen, Vorspannung oder konvexe Walzen

Walzfehler



Gesenkschmieden



Verfahren:

Umformen in geschlossenem Werkzeug (Gesenk). Bei sicherheitsrelevanten Teilen (Zahnräder, Pleuel, Getriebeteile).

Besonderheiten:

Erzeugt einen günstigen Faserverlauf (reduzierte Rissempfindlichkeit). Verschleißbelastung der Form sehr hoch.

Wahre Dehnung/Spannung/Querschnitt:

$$\sigma_w = \sigma \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0}\right) = \sigma(1 + \epsilon)$$

$$\epsilon_w = \ln \left(\frac{L_1}{L_0}\right) = \ln \left(1 + \frac{\Delta L + L_0}{L_0}\right) = \ln(1 + \epsilon)$$

$$A = A_0 \cdot e^{-\epsilon_1}$$

Volumenkonstanz :

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

σ_w : Wahre Spannung

σ : Technische Spannung

ΔL : Längenänderung

L_0 : Anfangslänge

L_1 : Endlänge

ϵ : Wahre Dehnung

ϵ : Technische Dehnung

A : Querschnitt

A_0 : Anfangsquerschnitt

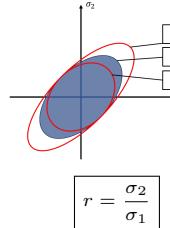
ϵ_1 : Dehnung in x-Richtung

E : E-Modul

Vergleichsspannung Mises:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2] + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)} \\ 0 \text{ falls eben. Sp.zs.}$$

An/Isotropie



Isotropisches Material verformt sich in alle Richtungen gleich gut.
 $r = 1$

Anisotropisches Material verformt sich in verschiedene Richtungen unterschiedlich gut.
 $r > 1 \downarrow$ Dickenänderung, \uparrow Breitenänderung (weniger Rissbildung)

$r < 1 \uparrow$ Dickenänderung, \downarrow Breitenänderung

Ebene Anisotropie: Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften in einer Ebene.

Senkrechte Anisotropie: Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften senkrecht zur Ebene.

Formeln zur Umformung

Biegelinie (einer Walze):

$$\omega = \frac{5 \cdot F \cdot b^4}{384 \cdot E \cdot I} \\ I = \frac{\pi \cdot D^4}{64}$$

- ω : Biegelinie
- F : Streckenlast
- b : Blechbreite
- I : Flächenträgheitsmoment
- D : Walzendurchmesser

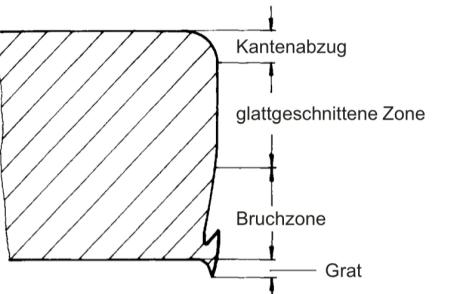
Zipfelbildung:

$$\Delta r = \frac{1}{2} \cdot (r_0^\circ - 2 \cdot r_{45}^\circ + r_{90}^\circ) = 2 \cdot (\bar{r} - r_{45}^\circ)$$

$\Delta r > 0$: Zipfel in 0° und 90° -Richtung

$\Delta r < 0$: Zipfel in den beiden Diagonalrichtungen

Scherschneiden



Verfahren:

Aufsetzen des Stempels auf dem Blech, Plasitsche Verformung des Werkstoffs, Rissbildung, Durchreißen.

Feinschneiden:

Beim Feinschneiden wird das Blech besonders gut eingespansnt, so dass die Schnittkante rechtwinklig zur Planfläche des Werkstücks liegt.

Vorteile: hoher Rationalisierungsgrad, minimaler Kanterverzugs, glatte und abrissfreie Schnittfläche.

Schmale Rand- und Stegbreiten sind möglich. Für Feinschneiden ist eine gewisse Rauheit der Oberflächen nötig, um viel Reibung und genügend Halt zu gewährleisten.

Masse:

Beim Lochen (Innenformen) ist der Lochstempel bestimmt und erhält das Sollmaß der Schnittteile.

Beim Ausschneiden (Außenformen) ist der Scheidplattendurchbruch bestimmt und erhält das Sollmaß des Schnittteils.

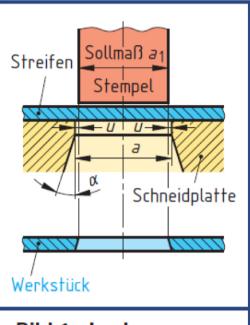


Bild 1: Lochen

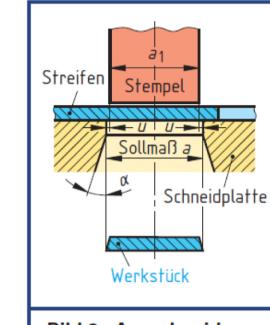
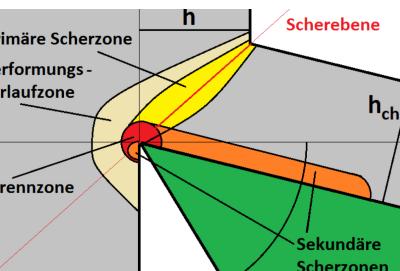


Bild 2: Ausschneiden

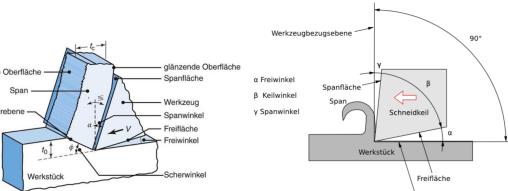
Voraussetzungen: hohe Härte des Werkzeugs und eine minimale Eindringtiefe.
Höhere Produktivität aber auch höhere Ungenauigkeit.
Rauheit 3. Ordnung, $R_z > 2.5\mu m$



Geometrisch Unbestimmt: (Schleifen)
Abrasivkörner dringen in Werkstoff ein, elastische und plastische Verformung, duktile Werkstoffe fließen und bilden Mikro-Späne, spröde Werkstoffe bilden Risse und Brechen aus.

Voraussetzungen: hohe Härte der Abrasivkörner sowie eine minimale Eindringtiefe.
Geringere Produktivität aber mehr Genauigkeit.
Eine grosse Porosität gibt Raum für die Späne und dient der Kühlung.
Rauheit 5-6. Ordnung, $R_z < 2.5\mu m$

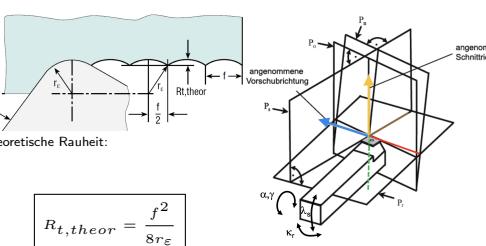
Drehen



Verfahren:

Spanen mit geschlossener, meist kreisförmiger Schnittbewegung und beliebiger, quer zur Schnittrichtung liegender Vorschubachse. Die Drehachse behält ihre Lage zum Werkstück unabhängig von der Vorschubachse bei.

Kinematische Rauheit, Schnittwinkel – Drehen:



Einfluss des Einstellwinkels:

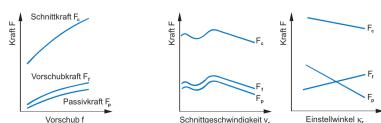
$$b = \frac{a_p}{\sin(\kappa_r)}$$

$$h = f \cdot \sin(\kappa_r)$$

$$A = a_p \cdot f = b \cdot h$$

b: Spannungsbreite
a_p: Schnitttiefe
κ_r: Einstellwinkel
h: Spannungsdiöce
f: Vorschub
A: Spannungsquerschnitt

Ursachen zur Bildung von diskontinuierlichen Spänen:
Spröder Werkstoff, sehr hohe oder niedrige Schnittgeschwindigkeit, grosse Schnitttiefe, geringer Spanwinkel, eiernde (nicht steife) Werkzeugmaschine

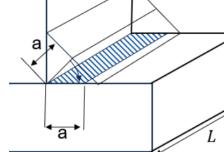


Fügen

Fügen ist das auf Dauer angelegte Verbinden von Werkstücken mit geometrisch bestimmter Form. Verfahren sind dabei Punktschweißen, Laserschweißen, Stanznielen, Clinchen oder Kleben.

Verbindungsarten:

- Formschlüssig (Passfeder, Keilwelle, Passschraube, Stift, Bolzen, Nieten)
- Vorgespannt formschlüssig (Keil, Stirnahn, Kegel mit Scheibenfeder)
- Kraftschlüssig (Schrauben, Klemmen, Kegelverbindung, Einscheibenkopplung)
- Stoffschlüssig (Schweißen, Löten, Kleben)

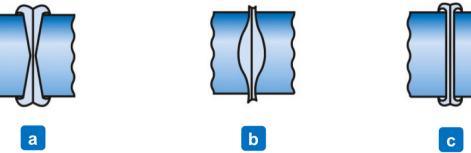


$$\sigma_{eq} = \frac{F}{A_f}$$

$$A_f = l_{eff} \cdot a$$

$$l_{eff} = L - 2 \cdot a$$

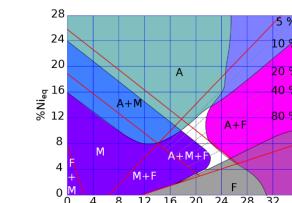
Reibschweißen:



hoher Pressdruck oder niedrige Relativgeschwindigkeit

niedriger Pressdruck oder hohe Relativgeschwindigkeit

optimale Verhältnisse



Schäfflerdiagramm: Das Schäfflerdiagramm kann die resultierende Phasenzusammensetzung eines Chrom-Nickel-Stahls abgeschätzt werden. Dabei berücksichtigt werden Ni, C, Mn, N, Mo, Si, Nb, Ti.

Fräsen

Beim Fräsen wird die notwendige Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück durch eine kreisförmige Schnittbewegung des Werkzeugs und eine Vorschubachse erzielt. Die Schneide ist nicht ständig im Eingriff und unterliegt daher thermischen und mechanischen Wechselbelastungen.

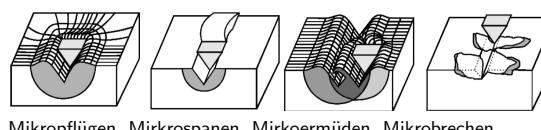
Hochgeschwindigkeitszerspanung (HSC):

Geringe Schnitttiefe, hohe Zerspanleistung hohe Schnittgeschwindigkeit, hohe Vorschubgeschwindigkeit. Bedingungen sind kurze kurze Werkzeugeingriffszeiten und hohe Eingriffsfrequenzen. Vorteile sind hohe Zeitspanvolumina, geringere Gratbildung, verminderte Randzonenbeeinflussung, gesteigerte Massgenauigkeit, Bearbeitung dünnwandiger Teile, kaum Schwingungen.

Verschleiss von Werkzeugen

Adhäsion: Ist bestimmt durch stoffliche Wechselwirkungen, durch lokale Pressungen an einzelnen Rauheitshügeln, es entstehen Kaltverschweissungen.

Abrasion:



Mikroplügen, Mikrospanen, Mirkovermüden, Mikrobrechen

Verschleiss nach Archard:

$$V = k \frac{LF}{3H}$$

V: Verschleissvolumen

k: Verschleisskoeff.

L: Gleitstrecke

F: Normalkraft

H: Härte

Standzeit nach Taylor:

$$T_c = C_v \cdot v_c^k$$

T_c: Standzeit

v_c: Schnittgeschwindigkeit

C_v und k: Werkzeugspez. Konstante

F_s: Spankraft

F_c: Schnittkraft

b: Schnittbreite/Spannbreite

Spumpe Werkzeugspitze:

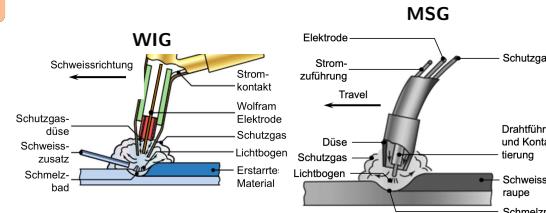
↑ Spitzradius r_t ↴ Schnitttiefe

↑ Oberflächenspannung, Risse

↑ Neigung der Aufbauschneidenbildung

Schweißen

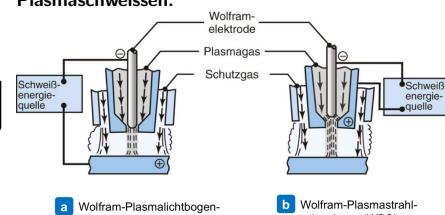
Definition: Das Schweißen ist das schmelzflüssige Vereinigen von Werkstoffen in der Schweisszone unter Anwendung von Wärme und/oder Kraft mit oder ohne Schweißzusatz.



WIG: Verwendet einen Gleichstromlichtbogen. Wolframelektrode hat negative Polarität und fungiert als Kathode. Das Werkstück ist die Anode.

MSG (MIG/MAG) Schweißen: Bei niedriger Spannung und Stromstärke treten Spritzer auf. Es wird kontrolliert zwischen globularem Materialübergang und Sprühtransfer gewechselt, um einzelne Tropfen zu übertragen.

Plasmaschweißen:



Cold Metal Transfer (CMT): Draht wird mit 50-130 Hz hin und her bewegt. CMT erkennt einen Kurzschluss und zieht Draht zurück. Vorteile sind kontrollierte und spritzerfreie Materialablagerung, geringe Wärmeeinwirkung und gute Energieeffizienz.

Gleich- und Wechselstromschweißen: Beim Gleichstromschweißen und negativ gepolter Elektrode ergeben sich die längsten Elektrodenstandzeiten. Im Werkstück bildet sich eine Art Kegel. Beim Wechselstromschweißen fließen die Elektronen vom Werkstück zur Elektrode und reissen dabei die hochschmelzende Oxidschicht auf. Im Werkstück bildet sich eine Art Erhebung.

Impulsschweißen: Strom wird in Impulse unterteilt, weniger Wärme ins Material "gezielt zwischen globularem Materialübergang und Sprühtransfer gewechselt, um einzelne Tropfen zu übertragen" - whatever

Auslegung Schweissnaht:

Breite und Dicke der Schweissnaht nimmt mit der Relativgeschwindigkeit zu.

Schweissgeschwindigkeit:

$$v_t = \frac{v_w \cdot A_w}{A_b}$$

v_t: Schweissgeschwindigkeit
v_w: Drahtvorschubgeschwindigkeit
A_w: Drahtquerschnitt
A_b: Raupenquerschnitt
A_e: Einbrandzone

Schweissraupen: Querschnittsform mit Parabel approximierbar. Querschnittsfläche aus Kontinuitätsgleichung:

Schutzgasschweißen Leistung Auslegung:

$$P = V \cdot I \cdot \eta$$

$$= V \cdot K \cdot v_w \cdot \eta$$

P: Leistung beim Schweißen
V: Spannung
I: Strom
η: Wirkungsgrad
K: Proportionalitätsfaktor

Aufmischung D:

$$D = \frac{\text{Zusatzmateriale}}{\text{Zusatzmateriale} + \text{Grundmaterial}} = \frac{A_b}{A_b + A_e}$$

Bsp. "80% Aufmischung" bedeutet, dass 80% vom Grundmaterial und 20% vom Füllmaterial stammen.

Schmelzbad:

- DC, Elektrode negativ:** Tiefes Schmelzbad, keine Oberflächenreinigung
- DC, Elektrode positiv:** Seichtes Schmelzbad, Oberflächenreinigung
- AC: Intermediate**

Störungsfaktoren - Schmelzbad: Auftrieb, Oberflächenspannung, Lorentzkraft, Scherspannung des Schutzgasstroms

Fehler in Schweissnähten: Längsrisse, Querrisse, Kerbrisse, Überlappungen, Einrankkerben, Einschlüsse, Porosität, Unzureichende Durchschweissung, Nahtunterschreitung, unvollständige Verbindungen.

Entstehen durch zu geringen Schutzgasfluss, instabile Keyholes, Kontamination der Oberflächen.

Kleben

Definition:

Beim Kleben werden gleiche oder unterschiedliche Stoffe durch eine aushärtende Zwischenschicht stoffschlüssig und nicht lösbare verbunden. Die Klebewirkung beruht auf der **Adhäsionskraft** des Klebstoffes an den Fügeflächen und der **Kohäsionskraft im Innern der Klebeschicht**. Klebstoffe können gut Scherkräfte aufnehmen.

Vorteile:

Keine Gefügeänderung, gleichmäßige Spannungsverteilung, viele Werkstoffkombinationen, dichte Verbindungen, wenig Passarbeit nötig, grossflächige Verbindungen.

Nachteile:

grossé Fügeflächen nötig, geringe Festigkeit, geringe Temperaturbeständigkeit, lange und komplizierte Aushärtung, keine zerstörungsfreie Prüfung möglich, anfällig für Schälfälle.

Physikalisch abbindende Klebstoffe:

- Lösungsmittelklebstoffe härtet durch Ablüften des Lösungsmittels. Sie basieren auf gelösten Kautschuken.
- Schmelzklebstoffe härtet durch Abkühlung
- Dispersionsklebstoffe benötigen Wärmeeinwirkung zum Aushärteten. Sie basieren auf PVC, Weichmachern, Füllstoffen und Haftvermittlern.

Chemisch abbindende Klebstoffe:

- Polmerisationsklebstoffe werden katalytisch durch Feuchtigkeit ausgelöst.
- Bei Polyadditionsklebstoffen reagieren mindestens zwei unterschiedliche Stoffe miteinander verbunden.
- Polykondensationsklebstoffe reagieren unter der Abspaltung von flüchtigen Stoffen. Benötigen Pressdruck von mindestens 40 N/cm und oft erhöhte Temperaturen.