

Fertigungsstechnik

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: Nutzungsgrad

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

WBW: Wiederbeschaffungswert d.
Maschine [\$]

T_N: Gesamtnutzungsdauer [a]

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

AW: Anschaffungswert [\$]

F: Grundfläche der Anlage [m^2]

RW: Restwert [\$]

x_Z: kalk. Zinssatz [1/a]

Stückkosten

Stückkosten k = Variable Kosten k_V + fixe Kosten k_F

K_{VO}: Vorbereitungskosten [\$]

K_S: Werkzeug und Messkosten [\$]

K_{PR}: Prüfkosten [\$]

K_{AW}: Auftr.wiederholkosten [\$]

K_{LH}: Lohnkosten [\$]

t_R: Rüstzeit [h]

K_{RA}: Rüstkosten [\$]

K_T: Fertigungssteuerung [\$]

K_{FE}: Fertigungskosten [\$]

K_{WH}: Werkzeugkosten [\$]

t_e: Fertigungszeit [h]

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 Referenzstandard, 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

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.

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

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 Massenmatrix
- + schnellere Konvergenz
- kleinere Zeitschritte
- Bedingt stabil
- Skalierung von Masse oder Zeit führt zu dynamischen Effekten
- numerische Fehler schwer abschätzbar

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

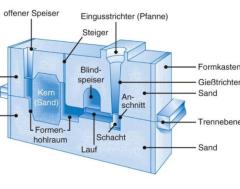
Fertigungsverfahren	erreichte Genauigkeiten														Rauheit Rz [µm]						
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	0,25	1	2,5	4	10	16	63	250	1000
Gießen																					
Sintern																					
Gesenkschmieden																					
Präzisionschmieden																					
Kaltfließpressen																					
Walzen																					
Schneiden																					
Drehen																					
Bohren																					
Planfräsen																					
Hobeln																					
Räumen																					
Rundschleifen																					

normal erreichbar durch Sondermaßnahmen erreichbar

Urformen

Gießsystem

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



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

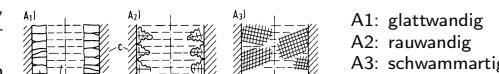
$$M = \frac{V}{A_{eff}}$$

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

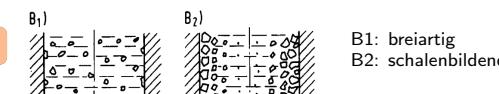
t_E : Erstarrungszeit
 C : Materielkonst. (Stahl 3, Eisen 5-6, Alu 6)
 M : Modul
 ε : Dehnung

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

Exogene Erstarrung



Endogene Erstarrung



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 $< 3\text{mm}$ 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 $< 1\text{mm}$ möglich.

Produktivität von bis zu 1000 Schuss pro Stunde.

Warmkammerverfahren:

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

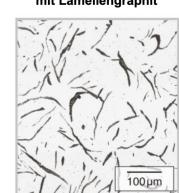
Schnellere Zyklen, legierungen mit tieferem Schmelzpunkt.

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

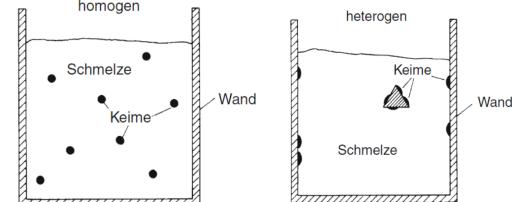
Temperguss: gute Duktilität und Verformbarkeit (dynamisch beanspruchte Bauteile)

Erstarrung

Keimbildung

Gießleitung und Querschnitt:

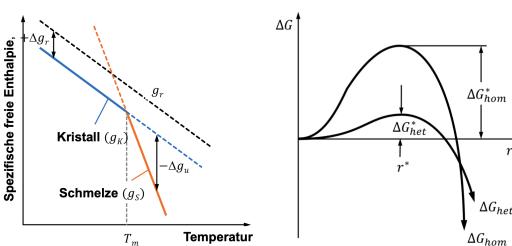
$$A = \frac{Q}{\sqrt{2 \cdot g \cdot h}}$$



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

Heterogen: Keime bilden sich um Verunreinigungen

Thermodynamik



$$\text{Unterkühlung: } \Delta g_u = g_s - g_K$$

$$\Delta G_u(r) = -\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta g_u$$

$$\Delta G_G(r) = 4\pi r^2 \sigma$$

Ein Keim kann nur dann wachsen wenn die freiwerdende Umwandlungsenergie $\Delta G_u(r)$ grösser ist als die Grenzflächenenergie $\Delta G_G(r)$

$$\left| \frac{d\Delta G_u(r)}{dr} \right| > \left| \frac{d\Delta G_G(r)}{dr} \right|$$

Kritischer Radius: Min. Radius damit Keim wächst

$$r^* = \frac{2\sigma}{\Delta g_u}$$

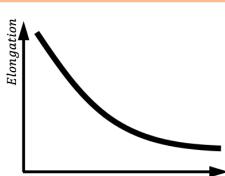
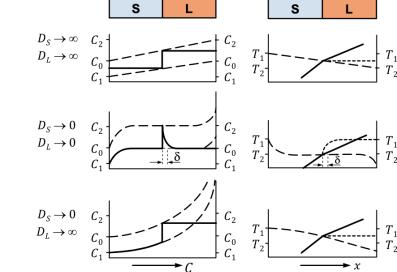
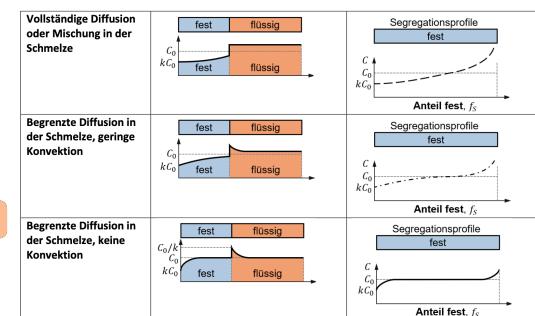
Dentritenabstand:

$$DAS = A \cdot t_E^{\frac{1}{2}}$$

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

Mechanischen Eigenschaften und Abkühlrate

Diffusion



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

Auslegung Gießprozess

Formfüllungsvermögen:

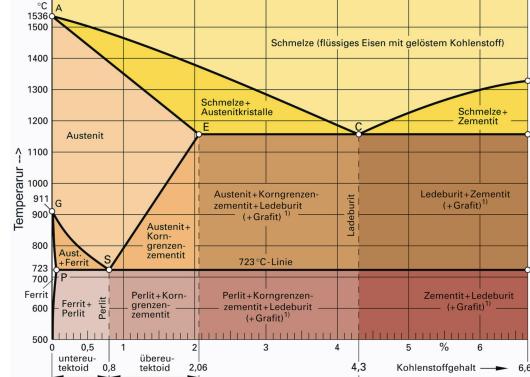
$$F = \frac{\rho \cdot g \cdot h}{2 \cdot \sigma}$$

Strömungsgeschwindigkeit:

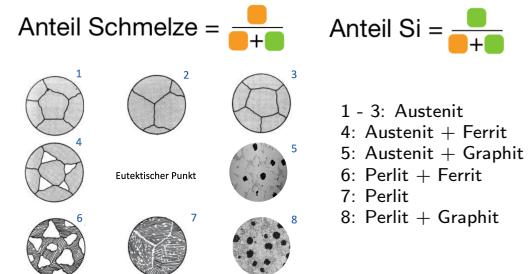
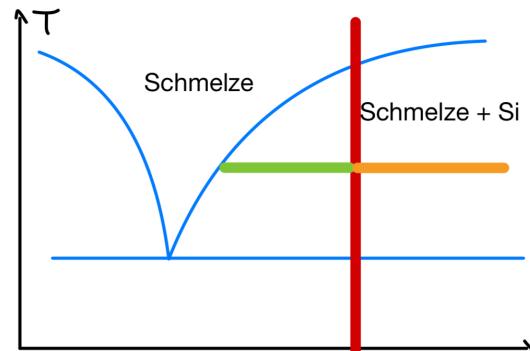
$$v_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot A_1} \cdot v_K$$

Eisenkohlenstoffdiagramm

liegt zwischen 0 und 6.67% Kohlenstoffgehalt



- Austenit = γ
- Perlit = Ferrit + Zementit
- Ferrit = α
- Ledeburit I = Austenit + Zementit
- Zementit = Fe_3C
- Ledeburit II = Perlit + Zementit



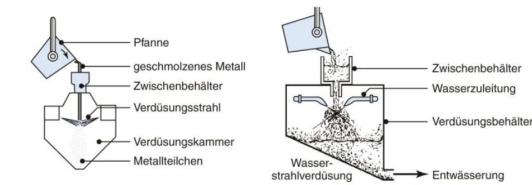
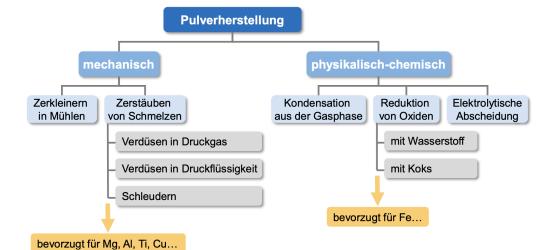
Werkstoffausnutzung	Fertigungsverfahren	Energieaufwand
90	Gießen	30-32
95	Sintern	26,5
85	Kat. oder Halbautomatisieren	41
75-80	Wärmeisen schmelzen	46-49
40-50	spanende Fertigungsverfahren	66-82
100	Werkstoffherstellung	25-50 MJ/kg
0	Energieaufwand	100

Pulvermetallurgie

Eigenschaften:

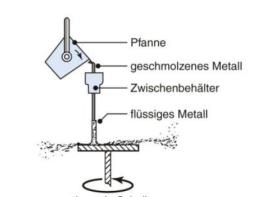
- komplexe Formen mit engen Toleranzen
- nicht Energieaufwendig
- Mechanische Eigenschaften einstellbar
- Hohe Rohstoffausnutzung
- ↑ Porosität, ↓ Bruchdehnung, ↓ Festigkeit

Pulverherstellung



Verdüsen im Druckgas

- Kugelförmig
- 1 - 150 μm



- Schleudern**
- Kugelförmig
 - 50 - 500 μm
 - Kühl Legierung schnell Abkühlrate
 - Hohe Reinheit
- Elektrolytische Abscheidung**
- Kugelförmig
 - 10 - 100 μm
 - extrem fein
 - Reines und gleichmässiges Pulver

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

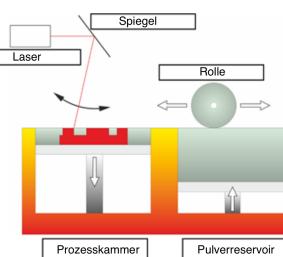
Mastersinterkurve: rel. Dichte $\rho(t, T)$ vs log. Sinterarbeit $\log \Theta$
Unabhängig der Heizrate folgen alle Kurven dem gleichen Trend

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.



Im Anfangsstadium: ↓ Oberflächenenergie ↑ Korngrenzenenergie

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 (Morphologie-abhängig)

Streckenenergiedichte beim sel. Laserschmelzen:

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

E_S : Streckenenergiedichte

P_L : Leistung des Lasers

v_s : Belichtungsgeschwindigkeit

Flächenenergiedichte beim sel. Laserschmelzen:

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

E_A : Flächenenergiedichte

h_s : Linienabstand

Volumenenergiedichte beim sel. Laserschmelzen:

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

E_V : Volumenenergiedichte

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

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

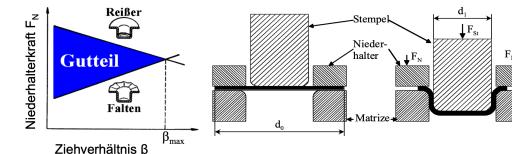
p_0 : Druck an Zylinderoberseite

μ : Reibungskoeffizient zwischen Pulver und Zylinder

x : Abstand zur Zylinderoberseite

D : Durchmesser des Zylinders

Tiefziehen



β : Ziehverhältnis

d_0 : Durchmesser vor dem Ziehen

d_1 : Durchmesser nach dem Ziehen

β_{ges} : Gesamtziehverhältnis

Warmblechumformung/ Presshärten

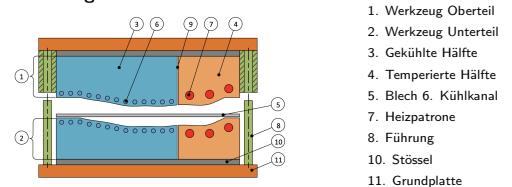
Vorteile:

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

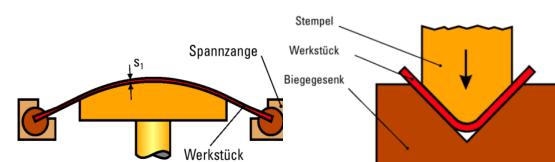
Verfahren:

Cutting, Heating, Hot stamping, Trimming, Coating

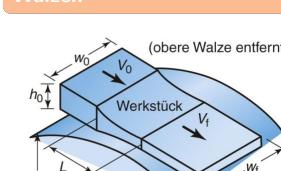
Werkzeugaufbau:



Strecken und Biegen



Walzen



Ziel:

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

Warmwalzen:

↓ der Korngroesse, ↑ mechanischen Eigenschaften.

Warmwalzen erzeugt eine schlechtere Oberfläche als Kaltwalzen.

Einfluss des Einstellwinkels:

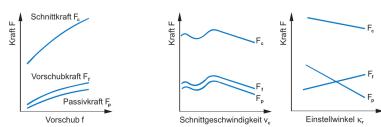
$$b = \frac{a_p}{\sin(\kappa_r)}$$

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

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

b: Spannbreite
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

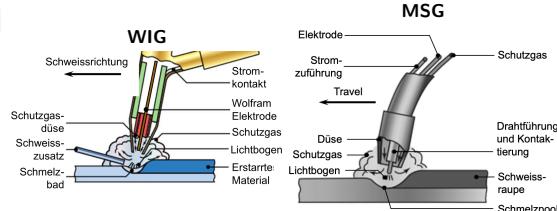
Fügen ist das auf Dauer angelegte Verbinden von Werkstücken mit geometrisch bestimmter Form. Verfahren sind dabei Punktschweißen, Laserschweißen, Stanznieten, Clinchen oder Kleben.

Verbindungsarten:

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

Schweißen

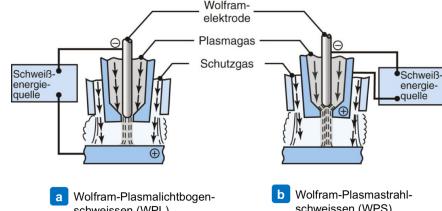
Definition: Das Schweißen ist das schmelzflüssige Vereinigen von Werkstoffen in der Schweiszone unter Anwendung von Wärme und/oder Kraft mit oder ohne Schweißzusatz.



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:

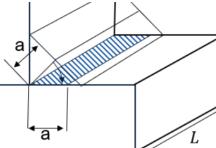


Cold Metal Transfer (CMT): Draht wird mit 50-130 Hz hin und her bewegt. CMT erkennt einen Kurzschluss und zieht Draht zurück. Vorteile sind kontrollierte und spritzerfreie Materialablagerung, geringe Wärmeeinwirkung und gute Energieeffizienz.

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:

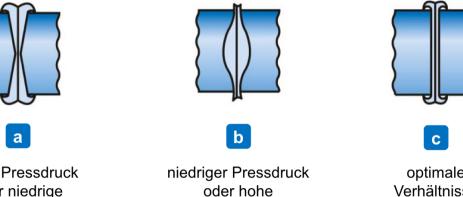


$$\sigma_{eq} = \frac{F}{A_f}$$

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

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

Reibschweißen:



Schweissnähte:

Breite und Dicke der Schweissnaht nimmt mit der Drahtvorschubgeschwindigkeit 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:

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

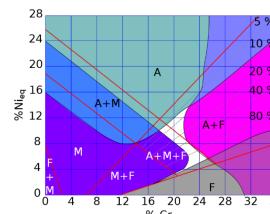
Bsp. "80% Aufmischung" bedeutet, dass 80% vom Grundmaterial und 20% vom Füllmaterial stammen.

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, Ungenügende Durchschweisung, Nahtunterschreitung, unvollständige Verbindungen. Entstehen durch zu geringen Schutzgasfluss, instabile Keyholes, Kontamination der Oberflächen.



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

Löten

- Weichlöten (unterhalb 450°C, SnAg5, PbAg5, Au4Sn)
- Hartlöten (oberhalb 450°C, CuZn, AgCuZn, AlSi12)
- Hochtemperaturlöten (über 900°C)

Beim Löten ist es einfacher, zwei unterschiedliche Materialien zu verbinden als beim Schweißen. Außerdem wird beim Löten immer ein Füllmaterial benötigt.

Vgl. Schweißen: ↓ Temperatur, ↓ Wärmeeinflusszone

Fügen durch Umformen

- Clinchen (Verfalten von Blechen)
- Nieten
- Schnappverbinder
- Walzplattieren
- Rührreibschweißen

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 **Gütekörpern** und der **Kohäsionskraft** im Innern der Klebeschicht. Klebstoffe können gut Scherkräfte aufnehmen.

Vorteile:

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

Nachteile:

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

Physikalisch abbindende Klebstoffe:

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

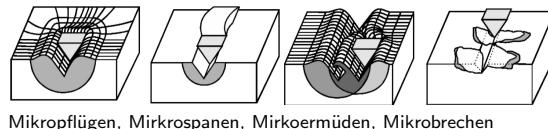
Chemisch abbindende Klebstoffe:

- 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 40N/cm und oft erhöhte Temperaturen.

Verschleiss von Werkzeugen

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

Abrasion:



Mikroflügen, Mirkrospanen, Mirkoremüden, 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

Kienze-Gleichung:

$$F_s = \frac{F_c}{b}$$

F_s: Spankraft

F_c: Schnittkraft

b: Schnittbreite/Spannbreite

Stumpfe Werkzeugspitze:

↑ Spitzendurchmesser → ↓ Schnitttiefe, → ↑ Schnittkraft

↑ Oberflächenspannung, Risse

↑ Neigung der Aufbauschneidenbildung