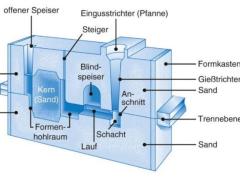


Urformen

Gießsystem

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



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

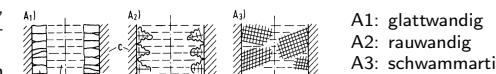
$$M = \frac{V}{A_{eff}}$$

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

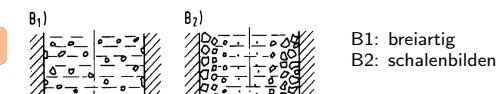
t_E : Erstarrungszeit
 C : Materielkonst. (Stahl 3, Eisen 5-6, Alu 6)
 M : Modul
 ε : Dehnung

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

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.

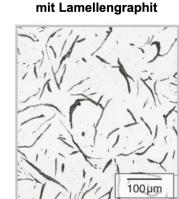
Schnellere Zyklen, legierungen mit tieferem Schmelzpunkt.

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

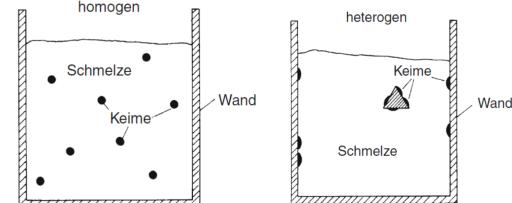
Temperguss: gute Duktilität und Verformbarkeit (dynamisch beanspruchte Bauteile)

Erstarrung

Keimbildung

Gießleitung und Querschnitt:

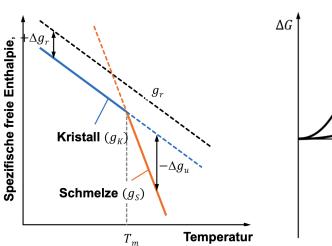
$$A = \frac{Q}{\sqrt{2 \cdot g \cdot h}}$$



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 Umwandlungsenthalpie $\Delta G_u(r)$ 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

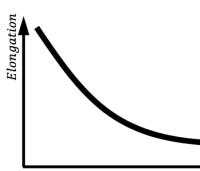
$$r^* = \frac{2\sigma}{\Delta g_u}$$

Dentritenabstand:

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

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

Mechanischen Eigenschaften und Abkühlrate



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

Auslegung Gießprozess

Formfüllungsvermögen:

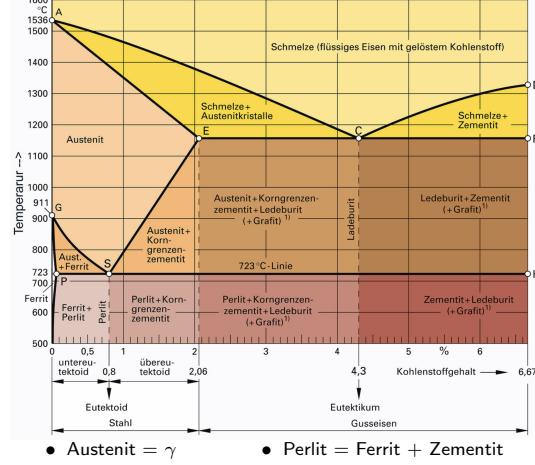
$$F = \frac{\rho \cdot g \cdot h}{2 \cdot \sigma}$$

Strömungsgeschwindigkeit:

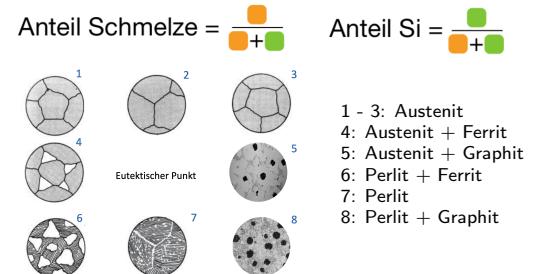
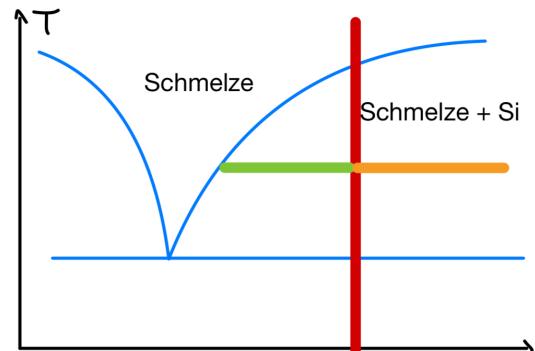
$$v_1 = \frac{\pi \cdot D^2}{4 \cdot A_1} \cdot v_K$$

Eisenkohlenstoffdiagramm

♡ Eisenkohlenstoffdiagramm ♡



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



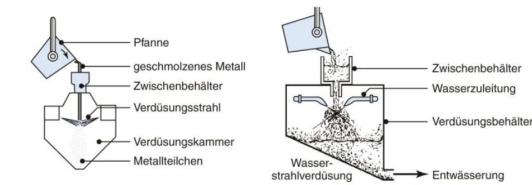
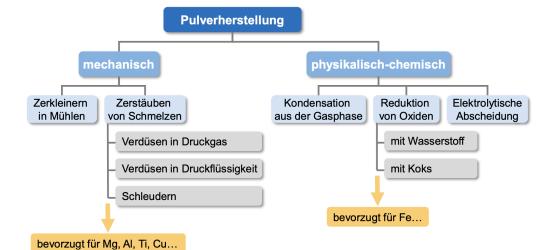
Werkstoffausnutzung	Fertigungsverfahren	Energieaufwand
90	Gießen	30-32
95	Sintern	26,5
85	Kat. oder Halbautomatisieren	41
75-80	Wärmeabschmelzen	46-49
40-50	spanende Fertigungsverfahren	66-82
100	Werkstoffherstellung	25-50
0	Energieaufwand	100

Pulvermetallurgie

Eigenschaften:

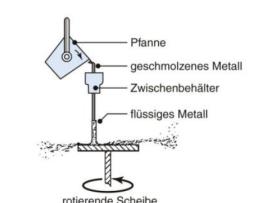
- komplexe Formen mit engen Toleranzen
- nicht Energieaufwendig
- Mechanische Eigenschaften einstellbar
- Hohe Rohstoffausnutzung
- ↑ Porosität, ↓ Bruchdehnung, ↓ Festigkeit

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

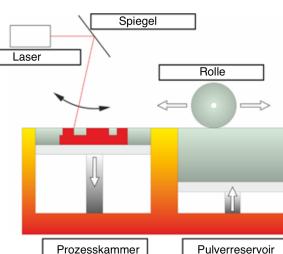
Mastersinterkurve: rel. Dichte $\rho(t, T)$ vs log. Sinterarbeit $\log \Theta$
Unabhängig der Heizrate folgen alle Kurven dem gleichen Trend

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

: Porosität

: 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

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

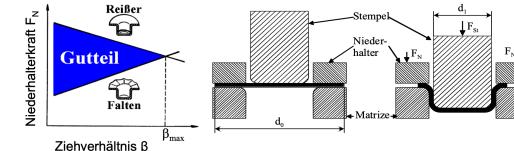
p_0 : Druck an Zylinderoberseite

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

Übung Kaltkomprimieren

Stampelabsenkung

$$h_{Stampel} = \frac{h_{100\%}}{\phi_{max}}$$

$h_{100\%}$: Zielhöhe

ϕ_{max} : Max. Füllgrad

$h_{Stampel}$: Absenkung des Stampels

Gesamtoberfläche des Pulvers

$$A_{ges} = \frac{V}{V_{Part.}} \cdot A_{Part.} = \frac{3V}{R_{Part.}}$$

V: Füllvolumen

$R_{Part.}$: Partikelradius

Relative Dichte

$$\rho_{kalt} = \frac{h_{100\%}}{h_{kalt}} = \frac{h_{100\%}}{h_{Stampel} - \Delta H}$$

ρ_{kalt} : Relative Dichte bei Kaltkomprimieren

h_{kalt} : Höhe nach Kaltkomprimieren

ΔH : Höhenänderung der Pulverfüllung

Lineare Schrumpfung

$$S_{lin} = \frac{h_{kalt} - h_{end}}{L_{kalt}}$$

S_{lin} : Lineare Schrumpfung

h_{end} : Endhöhe

Volumetrische Schrumpfung

$$S_{vol} = \frac{V_{kalt} - V_{end}}{V_{kalt}} = \frac{2\pi R_{Part.}^2 \cdot h_{kalt} [1 - (1 - S_{lin})^3]}{2\pi R_{Part.}^2 \cdot h_{end}}$$

Relative Enddichte

$$\rho_{end} = \frac{m}{V_{end} \cdot \rho} = \frac{m}{V_{kalt} \cdot \rho_{kalt} \cdot (1 - S_{vol})}$$

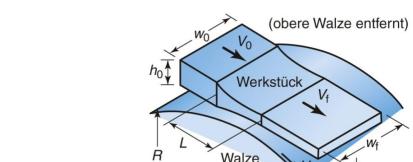
Umformen

Änderung der Form, Oberfläche und Eigenschaften bei gleicher Masse und Stoffzusammensetzung.

Eigenschaften:

- Energieeffizient
- Hohe Oberflächengüte
- grosse Kräfte nötig
- teure Werkzeuge
- Verschleiss und Korrosion durch Reibung
- Entstehung innerer Spannungen → nachfolgende Wärmebehandlung

Walzen



Ziel:

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

Warmwalzen:

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

Einfluss des Einstellwinkels:

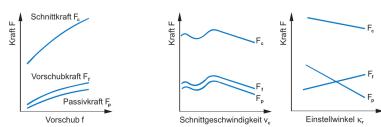
$$b = \frac{a_p}{\sin(\kappa_r)}$$

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

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

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

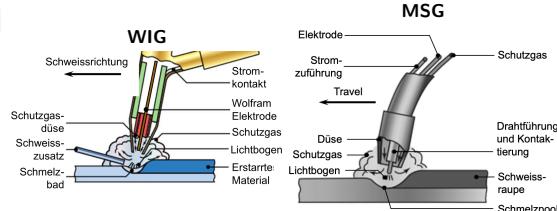
Fügen ist das auf Dauer angelegte Verbinden von Werkstücken mit geometrisch bestimmter Form. Verfahren sind dabei Punktschweißen, Laserschweißen, Stanznieten, Clinchen oder Kleben.

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

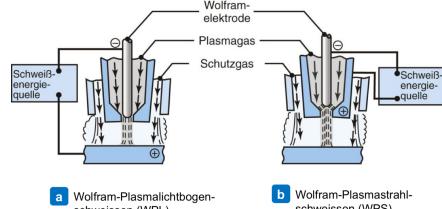
Definition: Das Schweißen ist das schmelzflüssige Vereinigen von Werkstoffen in der Schweiszone unter Anwendung von Wärme und/oder Kraft mit oder ohne Schweißzusatz.



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:

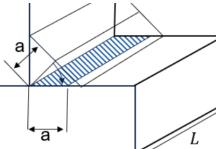


Cold Metal Transfer (CMT): Draht wird mit 50-130 Hz hin und her bewegt. CMT erkennt einen Kurzschluss und zieht Draht zurück. Vorteile sind kontrollierte und spritzerfreie Materialablagerung, geringe Wärmeeinwirkung und gute Energieeffizienz.

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:

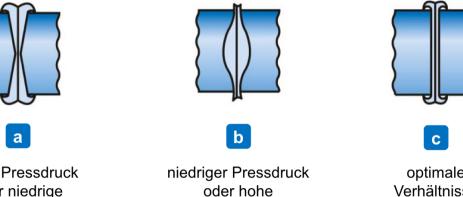


$$\sigma_{eq} = \frac{F}{A_f}$$

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

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

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:

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

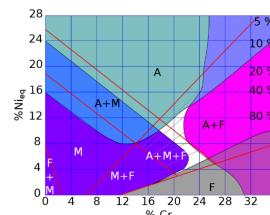
Bsp. "80% Aufmischung" bedeutet, dass 80% vom Grundmaterial und 20% vom Füllmaterial stammen.

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 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.

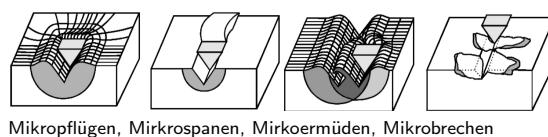
Chemisch abbindende Klebstoffe:

- 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 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:



Mikroplügen, 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