

Gestaltungslehre

Gestaltungslehre

Fertigungsverfahren

- Urformen
 - Gießen
 - Pulvermetallurgische & Additive Fertigung

- Umformen
 - Schmieden
 - Biegen
(Tiefziehen, Pressen, Walzen)

- Fügen
 - Schweißen
 - Schrauben, Nieten, Zusammensetzen (Montage)
(Löten, Kleben)

- Trennen
 - Spanende Bearbeitung
 - Schneiden, Stanzen

Gestaltungslehre

Das Fertigungsverfahren beeinflusst

- die erforderliche **Gestaltung** und
- die **Kosten**

des Bauteils und ist wesentlich von der **Stückzahl** abhängig!

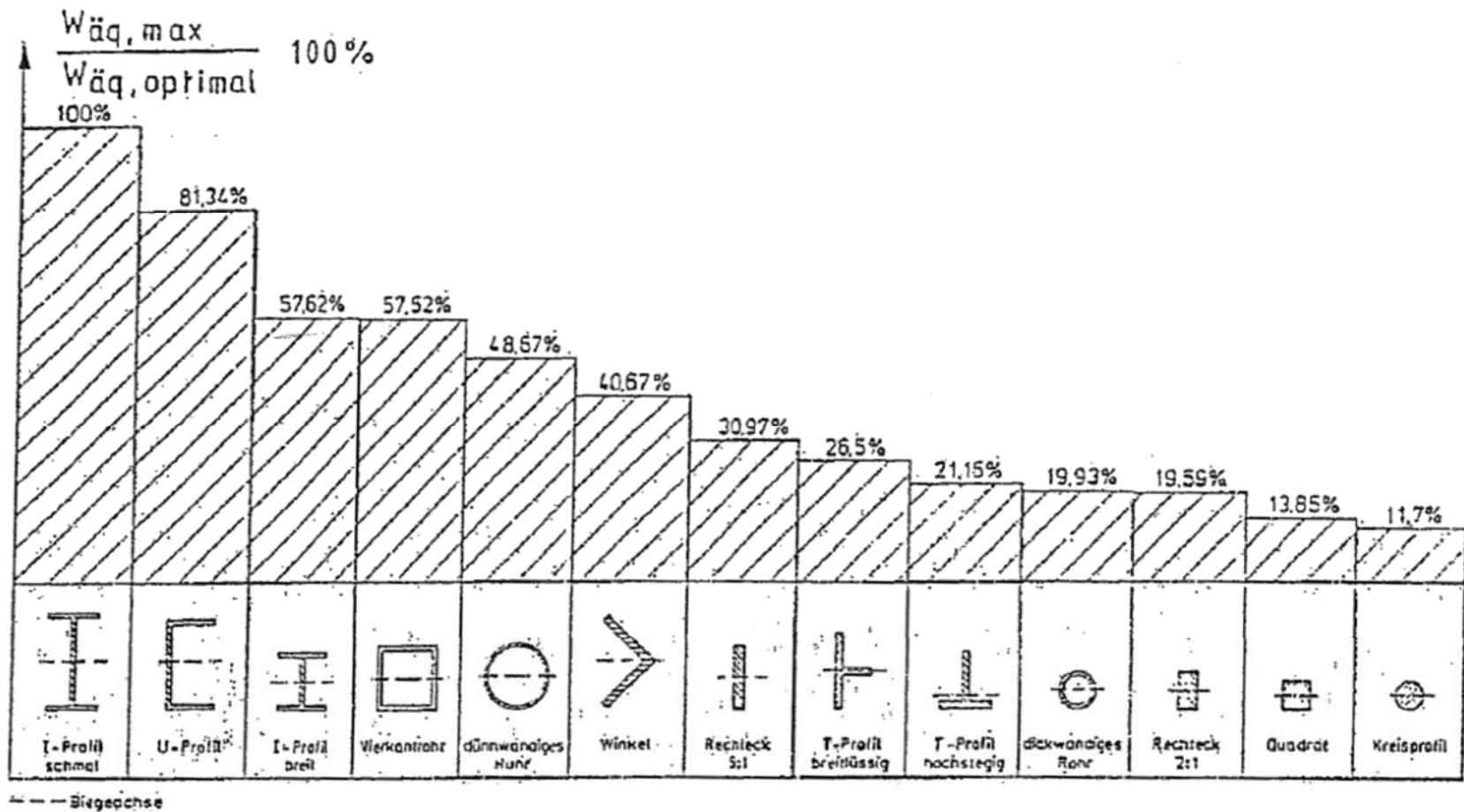
Gestaltungslehre

Auswirkungen von Widerstandsmomenten auf unterschiedliche Querschnittsformen mit gleicher Fläche

- Biegung
- Torsion
- Zug/Druck
- Knickung

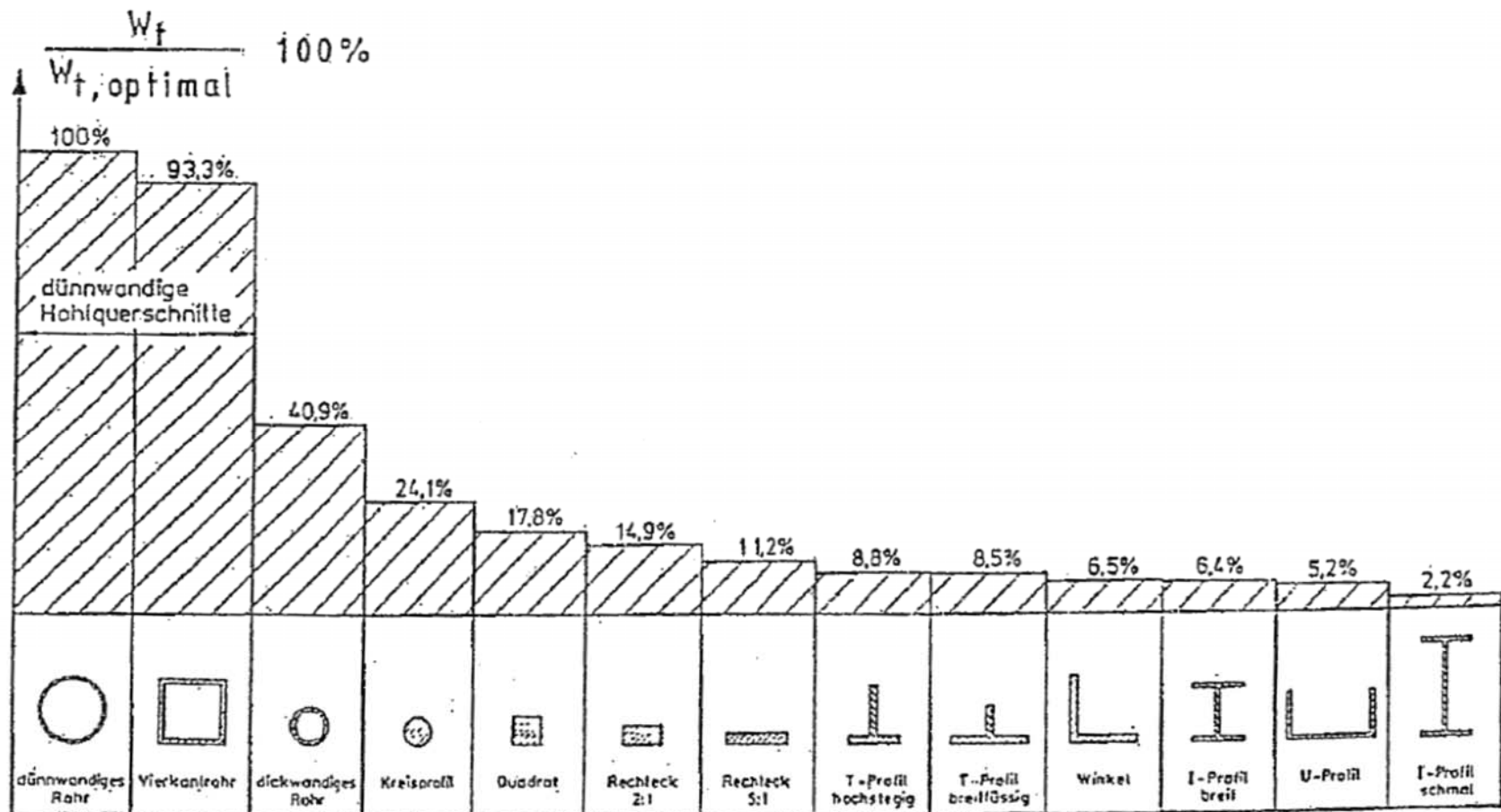
Gestaltungslehre

Widerstandsmomente gegen **Biegung** für flächengleiche Querschnittsformen



Gestaltungslehre

Widerstandsmomente gegen **Torsion** für flächengleiche Querschnittsformen



Gestaltungslehre

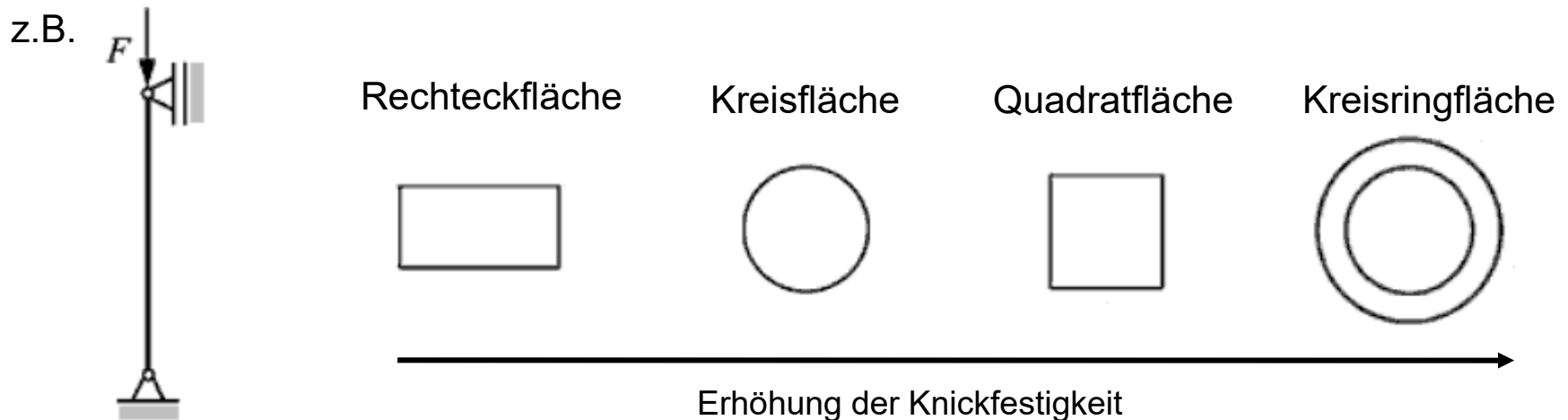
Verhalten bei Zug/Druck & Knickung

Zug/Druck:

- Querschnitte verhalten sich bei identischem Flächeninhalt gleich!

Knickung:

- Querschnitte verhalten sich je nach Lagerungsfall bei identischen Flächeninhalt unterschiedlich!

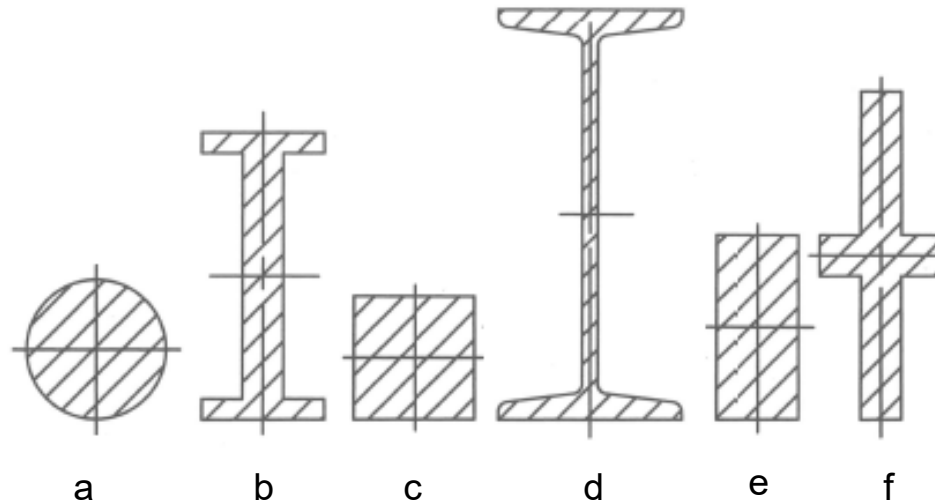


Gestaltungslehre

Widerstandsmomente

„Ihre Mitarbeit ist gefragt“

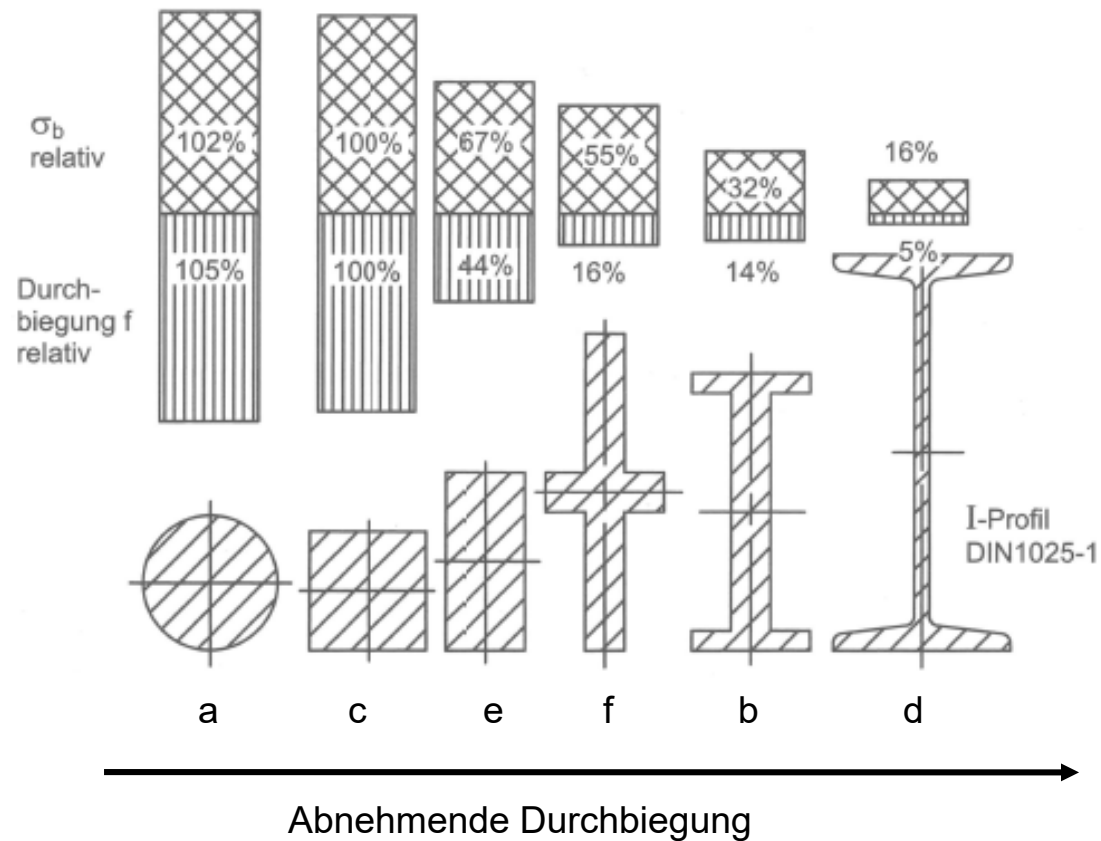
Vergleichen Sie die abgebildeten Querschnittsformen gleichen Flächeninhalts anhand deren Steifigkeit bei einer auftretenden Biegespannung. Beginnen Sie mit der schlechtesten Variante!



Gestaltungslehre

Widerstandsmomente

„Lösung“



Gestaltungslehre

Gussteile

Gestaltungslehre

Gussteile

Nach dem Gieß-Verfahren als:

- Sandguss
- Kokillenguss
- Druckguss ...

Nach dem Werkstoff als:

- Grauguss
- Stahlguss
- Aluminium-/Magnesium(druck)guss ...



Gestaltungslehre

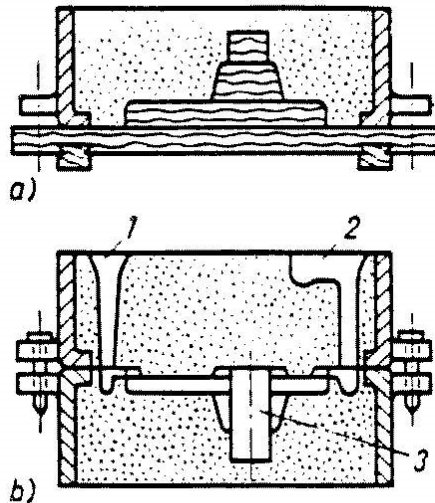
Allgemeine Gestaltung von Gussteilen

- Zweckmäßige Formgebung des Bauteiles um einfaches Einformen oder einfache Formherstellung zu gewährleisten
- Einfaches Herausheben des Modells aus der Form
- Keine sperrige Formen
- Verzicht auf Kerne aufgrund der Wirtschaftlichkeit
- Verwendung von gerade verlaufenden Begrenzungsformen für Modelle, Kokillen oder Dauerformen
- Gießbarkeit des Werkstoffes unter Berücksichtigung der Bearbeitungszugaben (Materialschrumpfung beim Erkalten)
- Vermeidung von Werkstoffanhäufungen, plötzlichen Querschnittsübergängen und scharfen Ecken aufgrund der Gefahr der Lunker- und Rissbildung
- Lunkerbildung in verlorenen Bauteilen wie Speiser, Eingusstrichter vorsehen
- Vermeidung von Gussspannungen und Anrissen durch Gestaltung zum Ausgleich dieser Spannungen, z.B. durch Anordnung gebogener Arme oder schräg liegender Flächen.

Gestaltungslehre

Sandguss

- Für geringe Stückzahlen geeignet
- Gussmodell erforderlich (z.B. aus Holz)
- Niedrige Werkzeugkosten (im Vergleich zu anderen Gussverfahren)



a) Unterkasten mit Modell

b) Oberkasten mit Unterkasten (1..Steiger, 2..Einguss, 3..Kern)

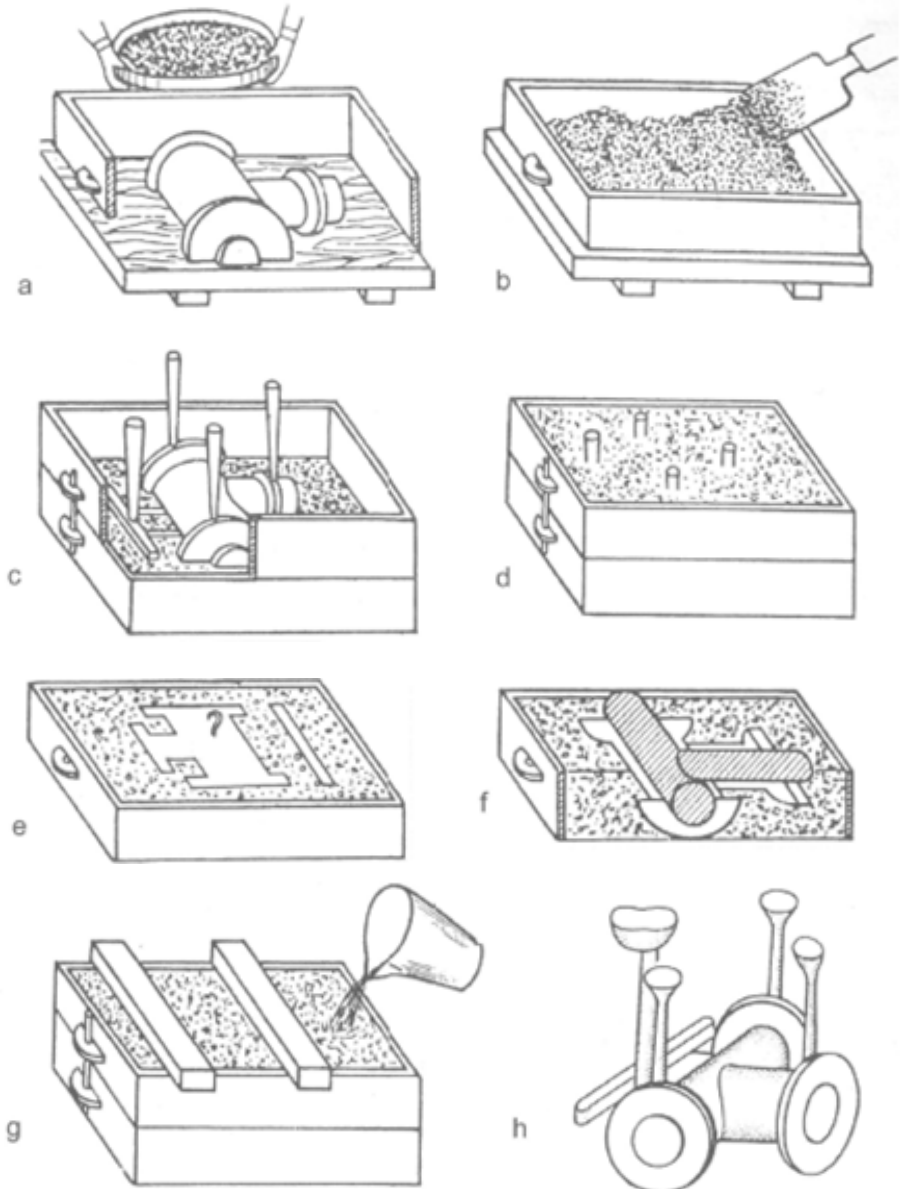


Gestaltungslehre

Sandguss - Verfahrensprinzip

(Manuelle Formherstellung)

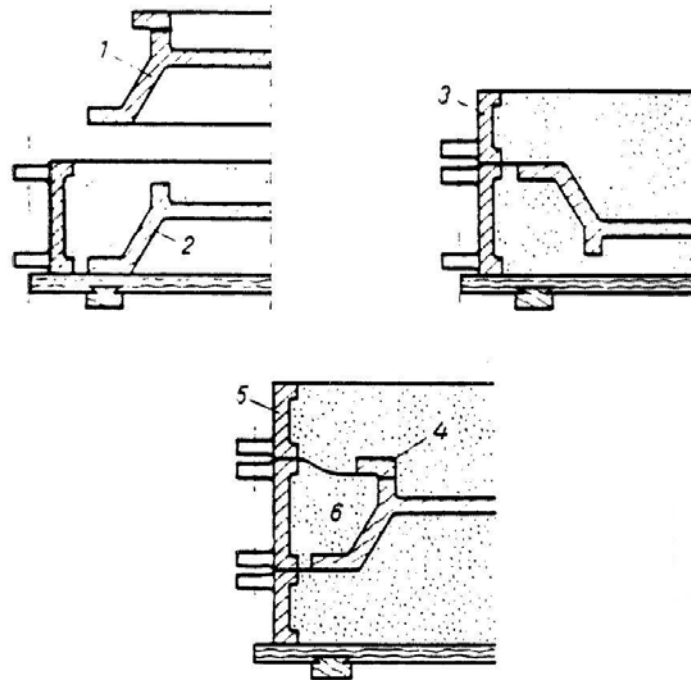
- a) Unterkasten und Modellhälfte auf die Ausstampfplatte legen (bepulvern)
- b) Formsand nach und nach einfüllen und feststampfen
- c) Kasten wenden und zweite Modellhälfte auflegen, Anguss- und Steigermodell setzen, Oberkasten aufsetzen (bepulvern)
- d) Formsand nach und nach einfüllen und feststampfen (evtl. Anguss und Steiger formen)
- e) Oberkasten abheben und Modell entfernen
- f) Kerne einlegen
- g) Formkasten schließen und verklammern (evtl. beschweren) und Abgießen
- h) Ausformen des erstarrten Gussstückes, Reinigen, Anguss und Steiger abtrennen, Entgraten



Gestaltungslehre

Sandguss

- Komplexe Gussteile (mehrtellig) werden in mehreren Kästen eingeformt

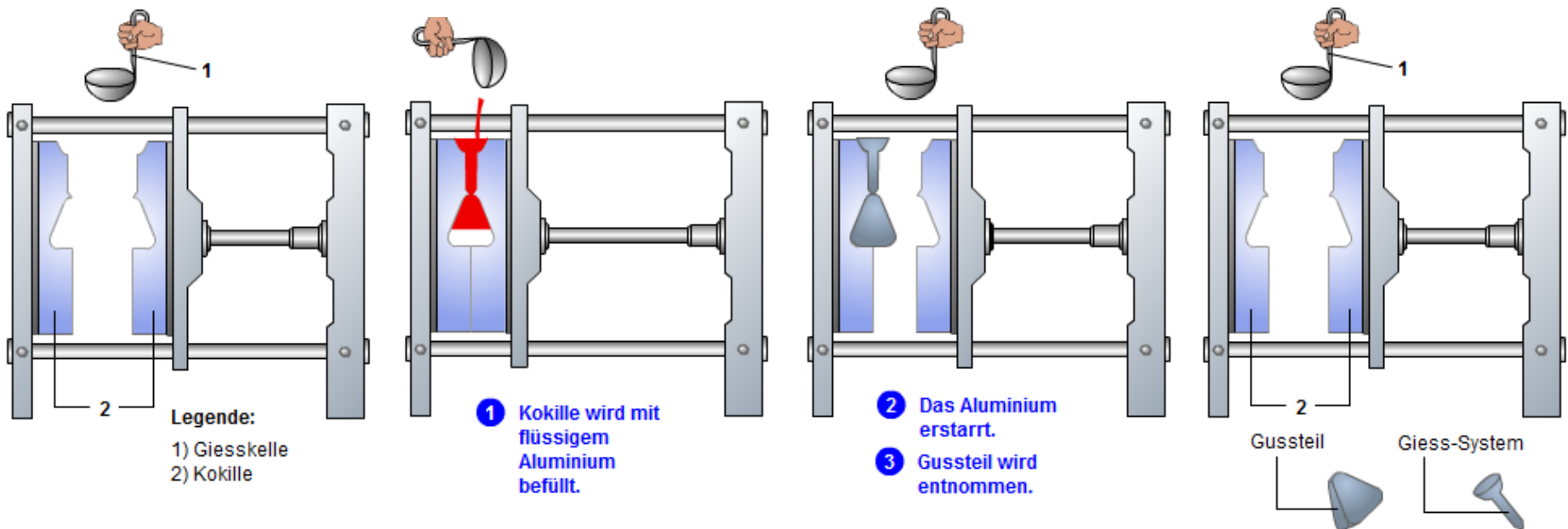


1..Modell (besteht aus 2 & 4), 3 & 5..Formkästen, 6..mehrtellige Form)

Gestaltungslehre

Kokillenguss

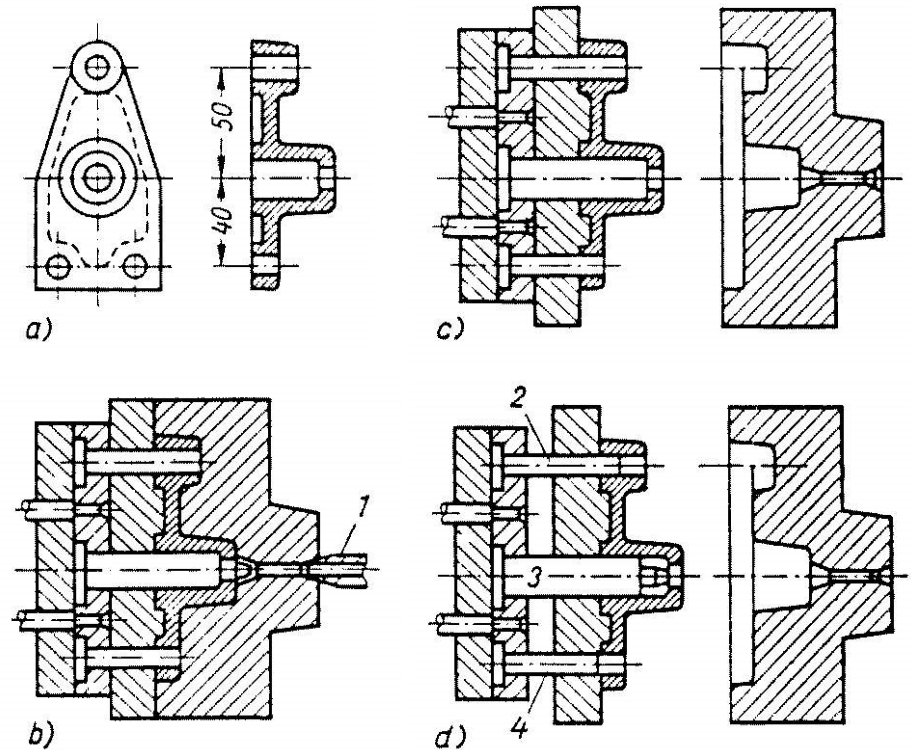
- Es wird Schmelze über einen obenliegenden Einguss in eine Kokille (metallische Dauerform) gegossen
- Hohe Maßgenauigkeit, gute Oberflächenqualität und Konturwiedergabe
- Für mittlere bis hohe Stückzahlen
- z.B. für Aluminium-, Kupfer-Zinkgussteile, usw.



Gestaltungslehre

Druckguss

- Werkstoff wird unter hohem Druck in die Formen gepresst
- Geeignet für kleine Toleranzen, glatte Oberflächen und scharfe Konturen
- Dauerformen aus hitzebeständigem Material
- Für hohe Stückzahlen (mehrere Tausend)
- Für Metalllegierungen mit niedrigen Schmelzpunkten
z.B. Al- & Cu-Legierungen

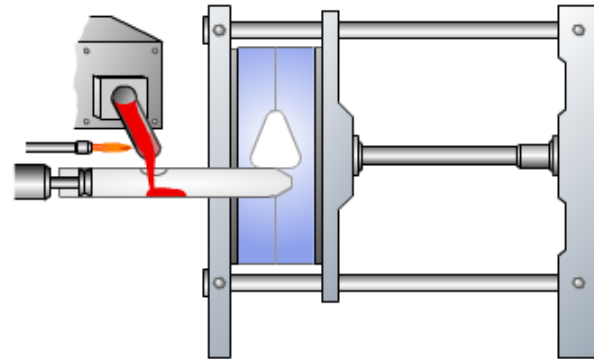


- a) Werkstück
- b) geschlossene Form mit Düse 1
- c) geöffnete Form
- d) geöffnete Form, Kerne 2, 3 und 4 zurückgezogen

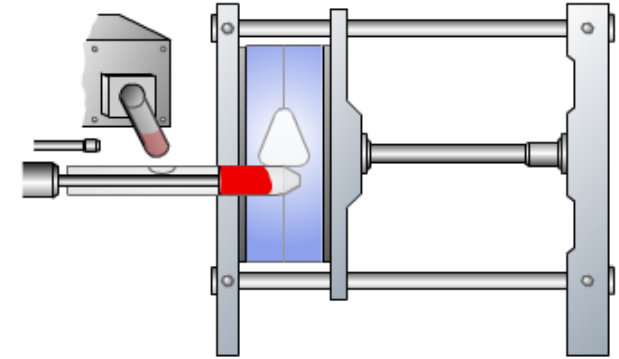
Gestaltungslehre

Druckguss

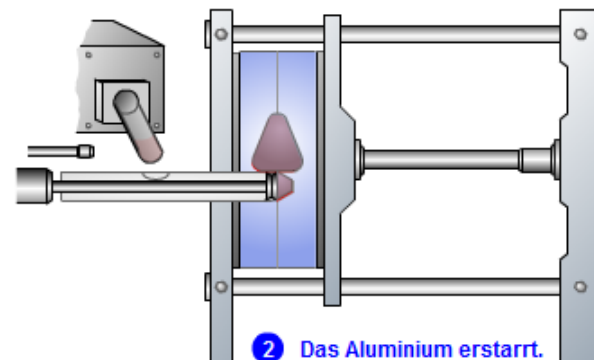
➤ Verfahrensbeispiel



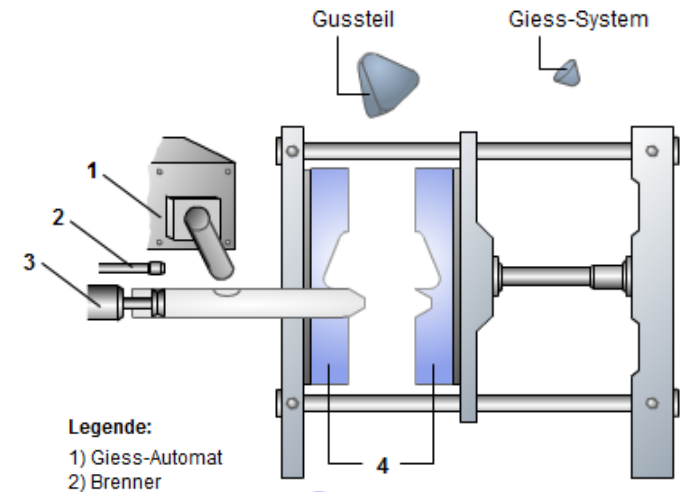
1 Das flüssige Aluminium wird mit Druck in die Form gepresst.



2 Das Aluminium erstarrt.



2 Das Aluminium erstarrt.



Legende:

- 1) Giess-Automat
- 2) Brenner
- 3) Druckkolben
- 4) Form

3 Gussteil wird ausgestossen.

Gestaltungslehre

Gestaltung von Graugussteilen

- Möglichst gleiche Wandstärken
- Vermeidung scharfer Ecken
- Abrundungen und Abschrägungen
- Vermeidung von Stoffanhäufungen
- Allmähliche Querschnitts-Übergänge
- Vermeidung von eingezogenen Formen und ungünstigen Hohlräumen
- Einfache Kerne und gute Kernlagerung
- Konstruktion zugunsten Druckspannungen ausführen (Druck günstiger als Zug)
- Vermeidung hoher schlag- und stoßartiger Beanspruchungen
- Keine Verwendung bei zu hohen Einsatztemperaturen (über 300°C)



Gestaltungslehre

Gestaltung von Stahlgussteilen

- Generell gelten die gleichen Richtlinien wie bei Graugussteilen

Abweichungen:

- Konstruktion zugunsten Druckspannungen nicht unbedingt erforderlich (Zug kann besser aufgenommen werden)
- Vermeidung hoher schlag- und stoßartiger Beanspruchungen nicht unbedingt erforderlich (können besser ertragen werden)
- Einsatztemperaturen durchaus höher (über 400°C)
- Größerer E-Modul (ca. doppelt dem von Grauguss)
→ Verwendung für steifere Konstruktionen
- Größeres Schwindmaß (ca. doppelt dem von Grauguss)
→ Stoffanhäufungen unbedingt vermeiden!



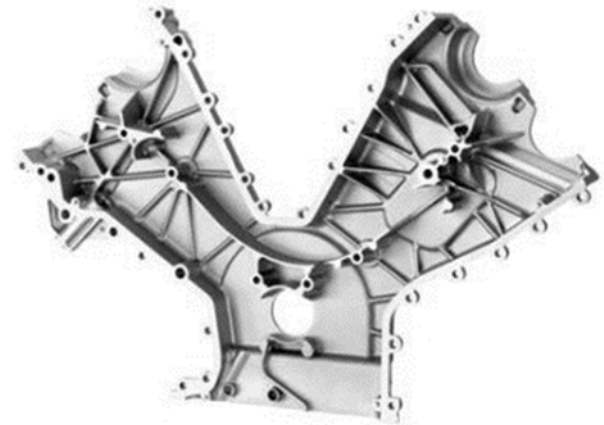
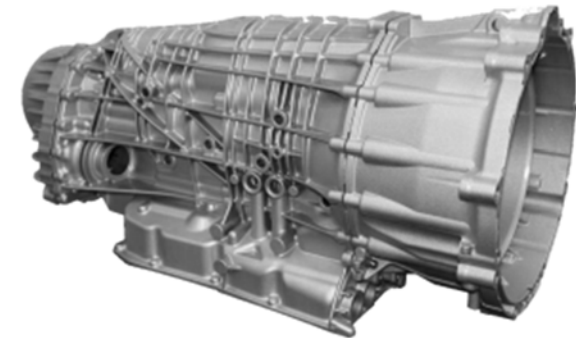
Gestaltungslehre

Gestaltung von Aluminium- und Magnesium(druck)gussteilen

- Generell gelten die gleichen Richtlinien wie bei Graugussteilen

Abweichungen:

- Größere Kerbempfindlichkeit
→ Scharfe Kerben vermeiden
→ Stoßbelastungen vermeiden
- Vermeidung von sprunghaften Übergängen
- Allgemein möglichst gleiche Wandstärken anstreben
- Beim Zusammenbau mit anderen Metallen auf Korrosion im Kontaktbereich achten!



Gestaltungslehre

... gerechtes Gestalten eines Gussteiles

Die Konstruktion muss:

- modell- und formgerecht,
- gießgerecht und
- bearbeitungsgerecht

sein.

Zudem:

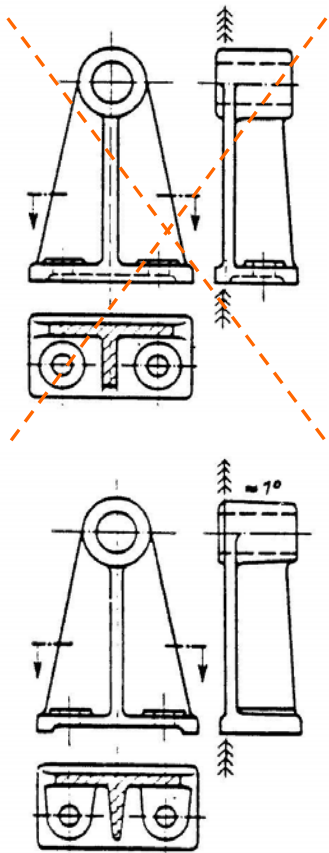
- transportgerecht,
- montagegerecht
- usw.



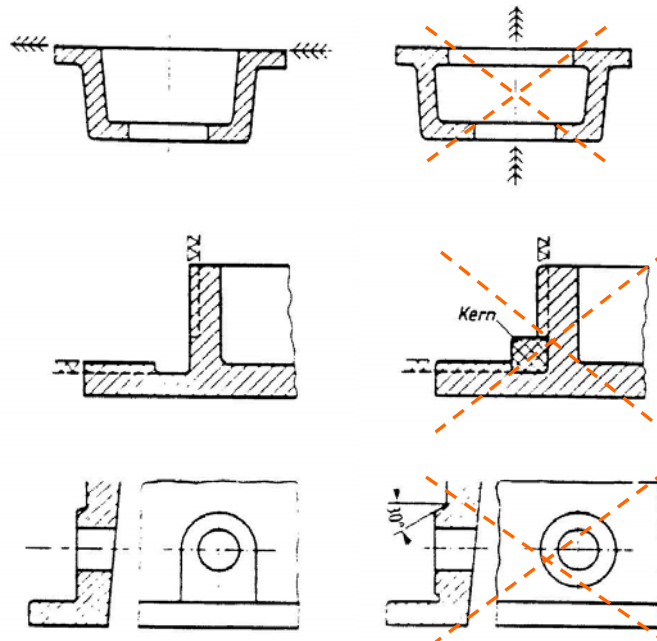
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gussteilen – modell- und formgerecht

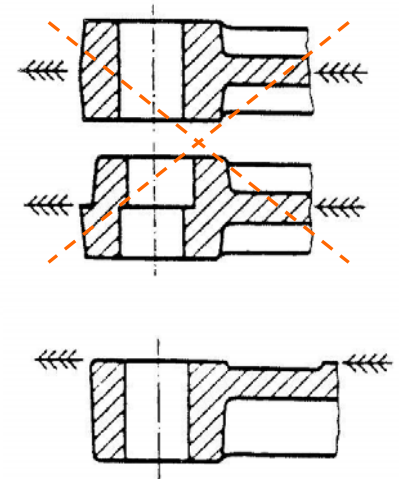
➤ Aushebeschrägen



➤ Unterschneidungen und Kerne



➤ Lage der Teilungsebene

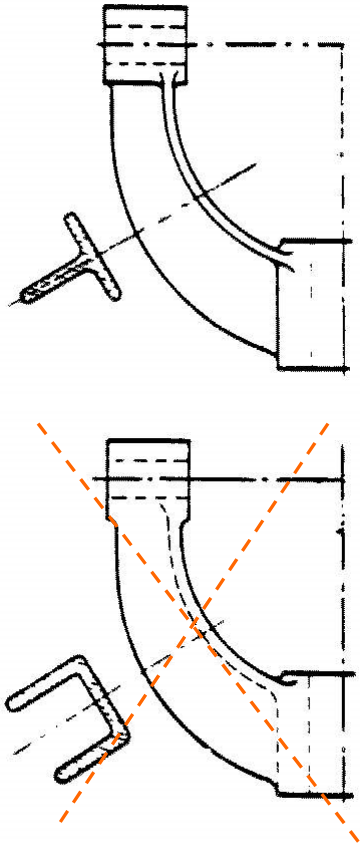


←←← Teilenebene ←←←

Gestaltungslehre

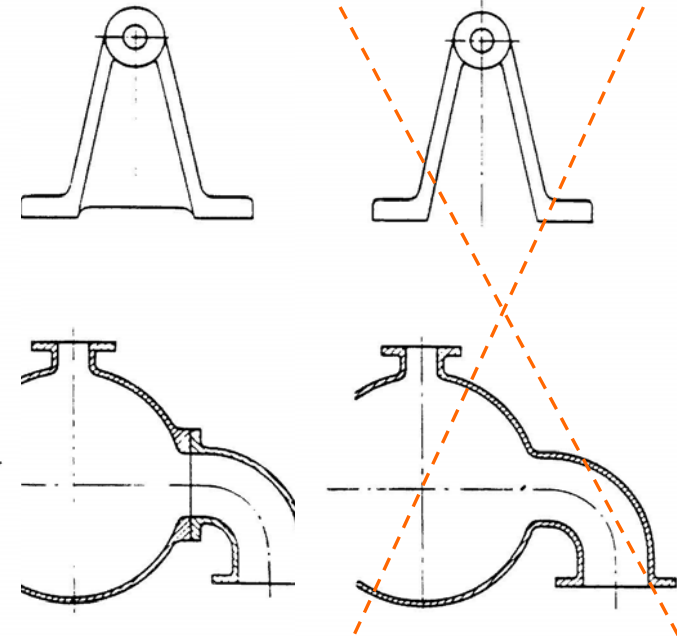
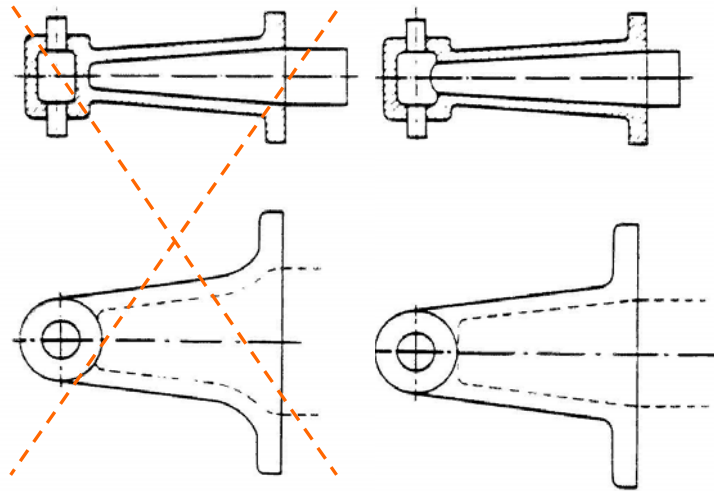
Gestaltungsrichtlinien von Gussteilen – modell- und formgerecht

➤ Einförmbarkeit des Modells



➤ Vermeiden sperriger Formen

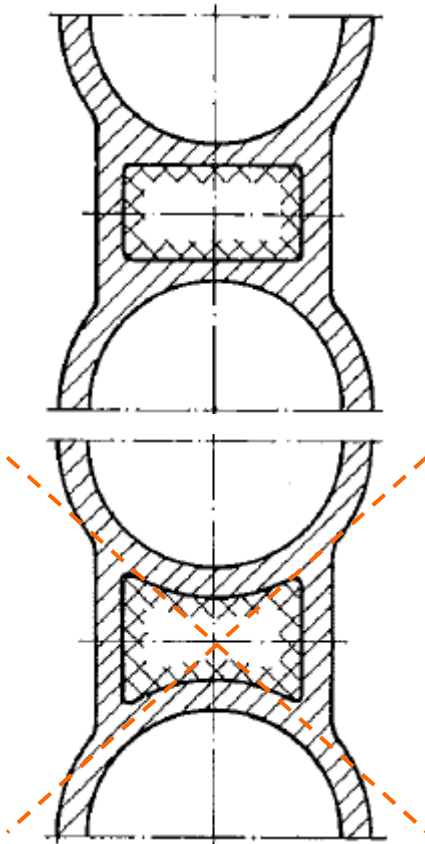
➤ Lagerung und Ausführung der Kerne



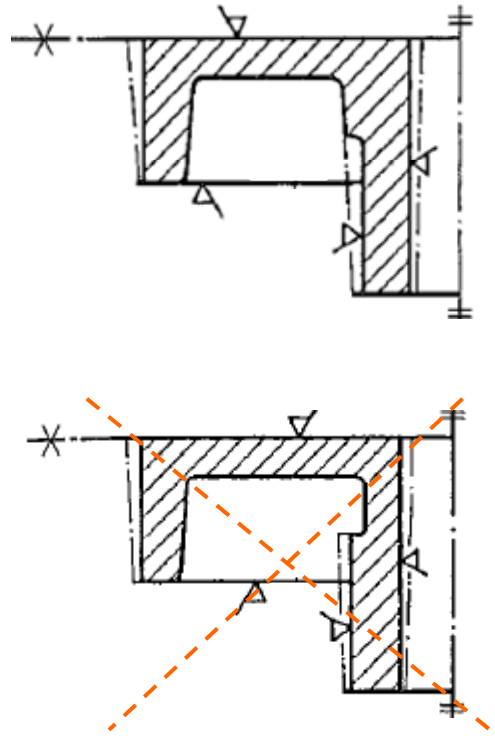
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gussteilen – modell- und formgerecht

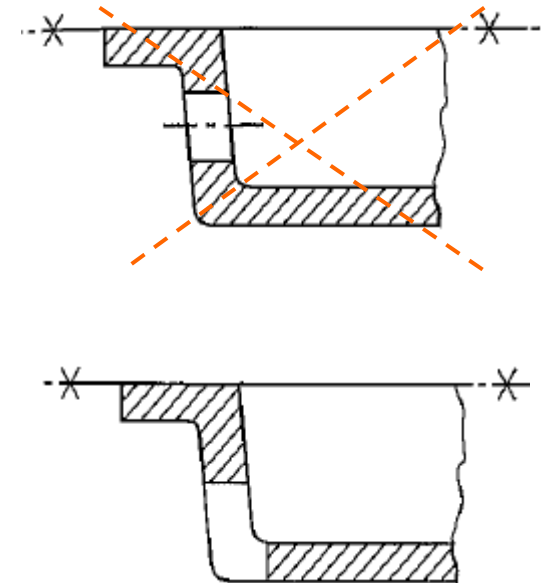
➤ Einfache Kernform anstreben



➤ Hinterschnidungen vermeiden



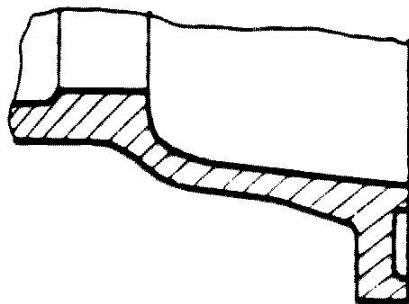
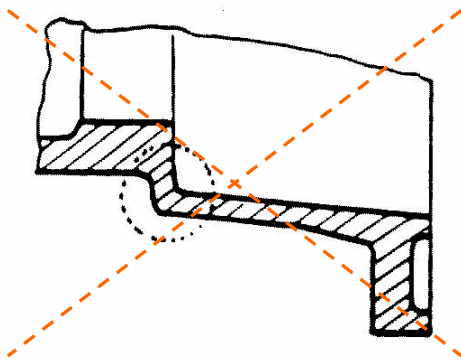
➤ Einfacheres Einformen durch Einsparen von Kernen



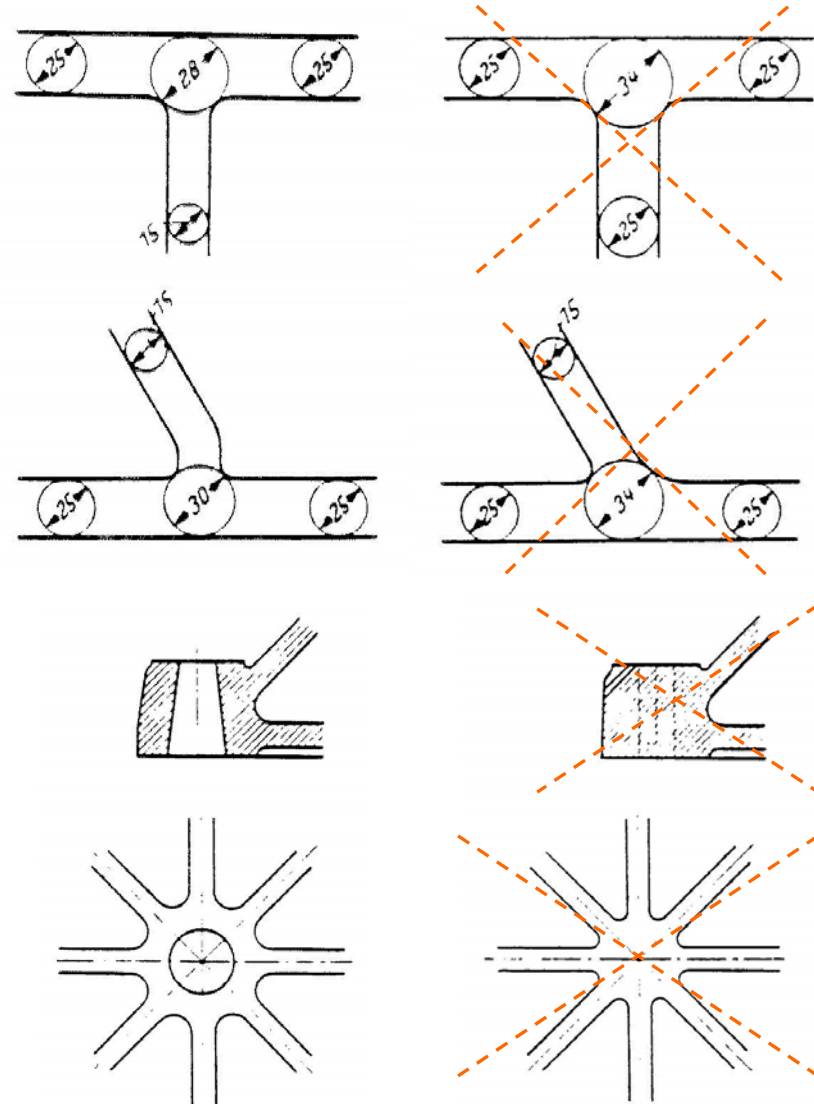
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gussteilen – gießgerecht

- Dimensionierung der Querschnitte hinsichtlich Fließen des Metalls



- Vermeiden von Werkstoffanhäufungen

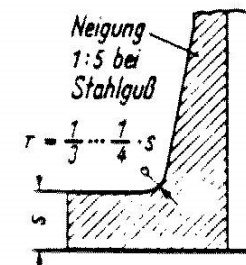
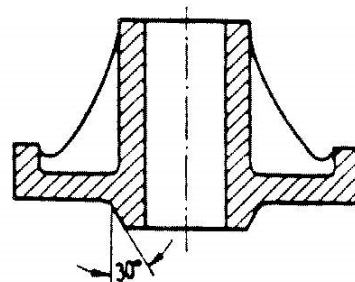
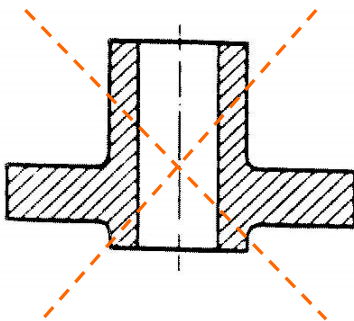
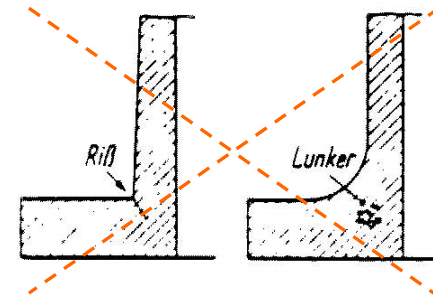
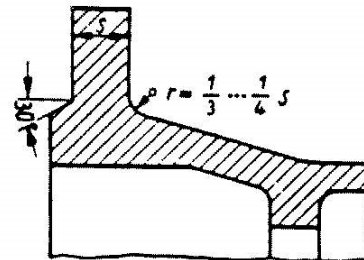
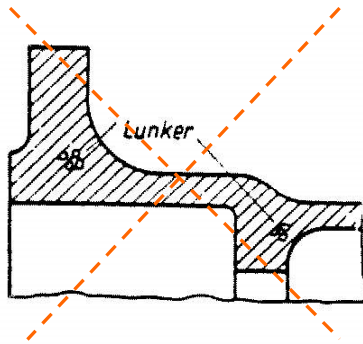


Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gussteilen – gießgerecht

➤ Vermeiden von Werkstoffanhäufungen

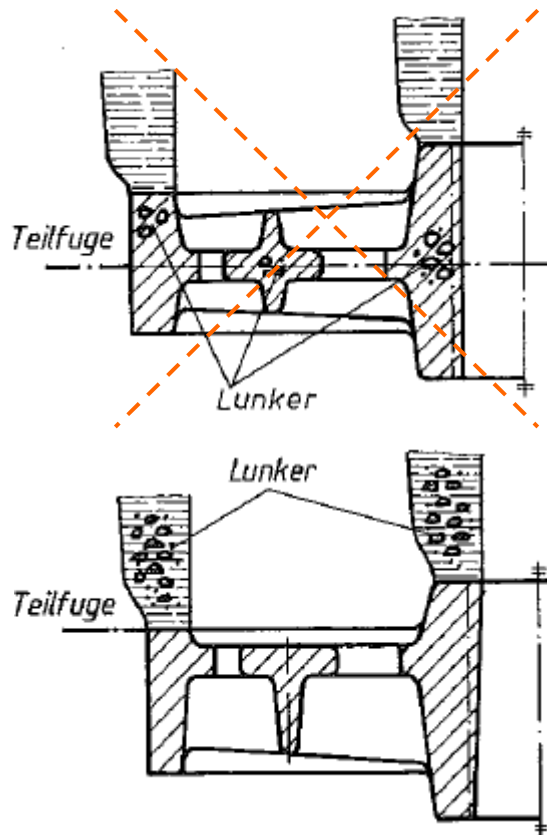
➤ Vermeidung scharfer Übergänge



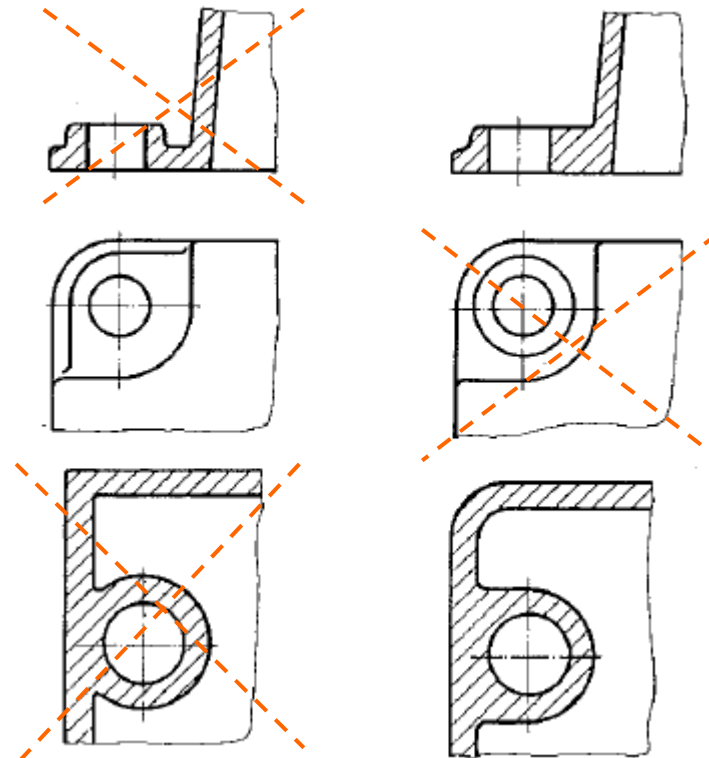
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gussteilen – gießgerecht

- Lunker im Gussteil durch geeignete Geometrie vermeiden



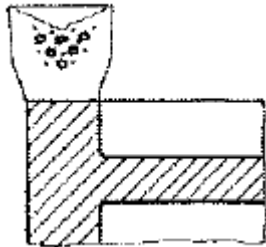
- Günstige Augenformen für Formherstellung, Ein- und Ausformen



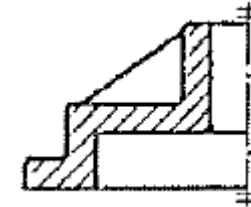
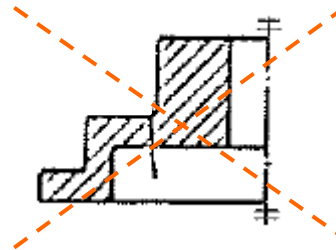
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gussteilen – gießgerecht

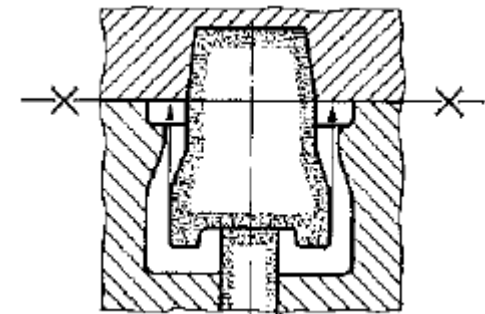
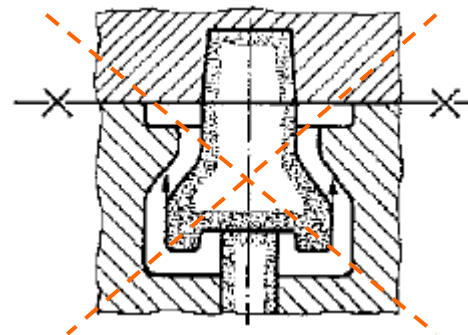
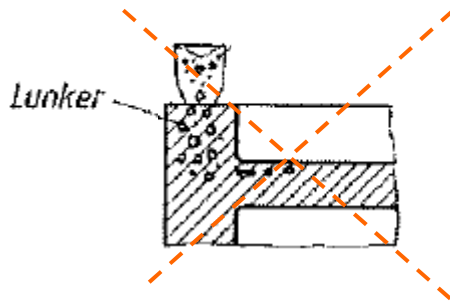
- Ausreichend große Gießtrichter und Steiger vorsehen (Lunker)



- Gleichmäßige Wandstärke anstreben



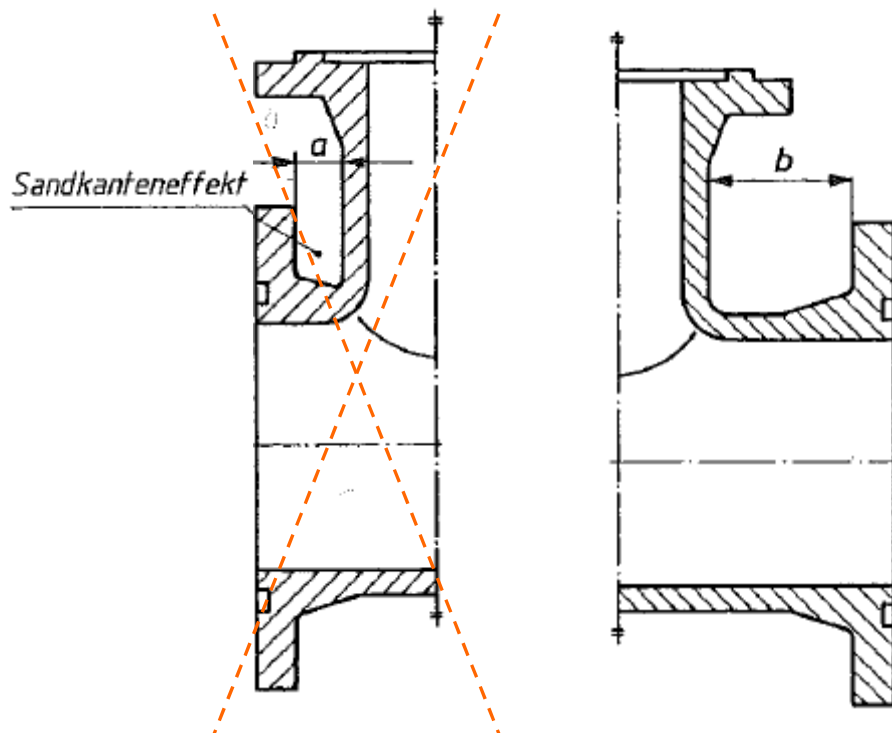
- Einlegen der Kerne ermöglichen



Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gussteilen – gießgerecht

- Sandkanteneffekt durch geeignete Gestaltung vermeiden

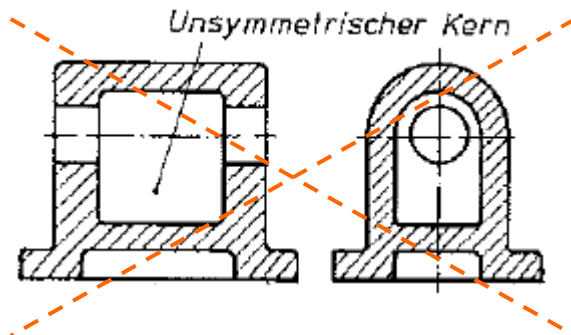
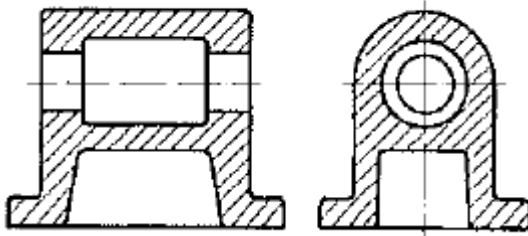


Der Sandkanteneffekt tritt bei Sandgussstücken (an hervorstehenden Sandkanten) auf und kann zu Lunkern oder Warmrissen führen.

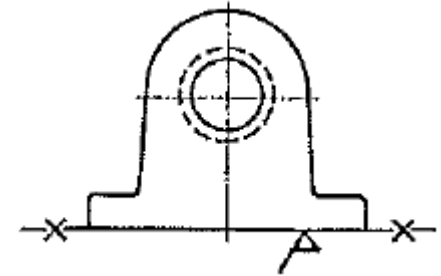
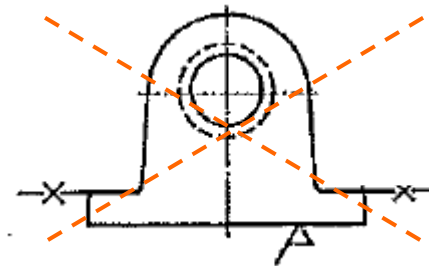
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gussteilen – gießgerecht

➤ Einfache Kernformen



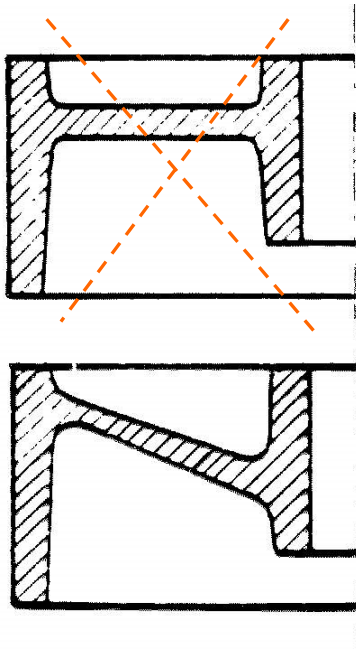
➤ Teilfugen bzw. Grat an spanend zu bearbeitende Flächen legen



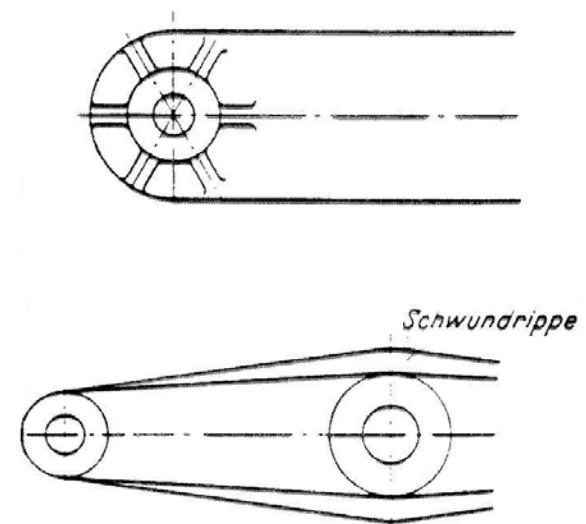
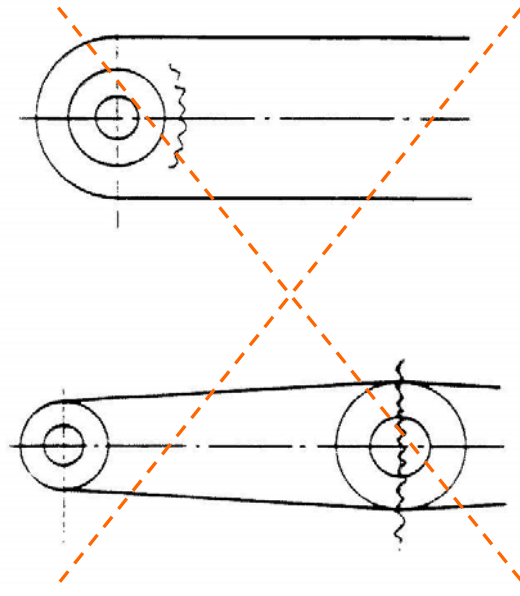
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gussteilen – gießgerecht

➤ Vermeiden waagrechter Flächen



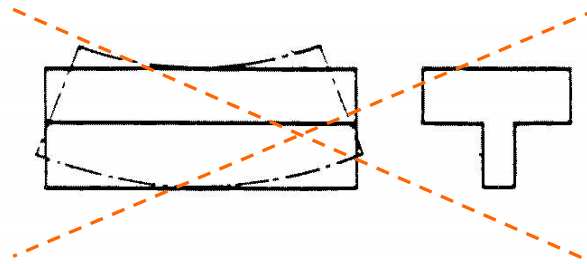
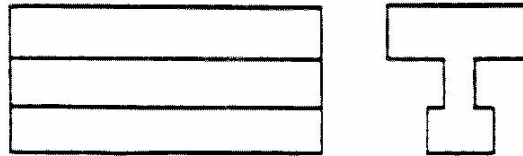
➤ Reduzieren von Spannungen und Verzug durch Rippen



Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gussteilen – gießgerecht

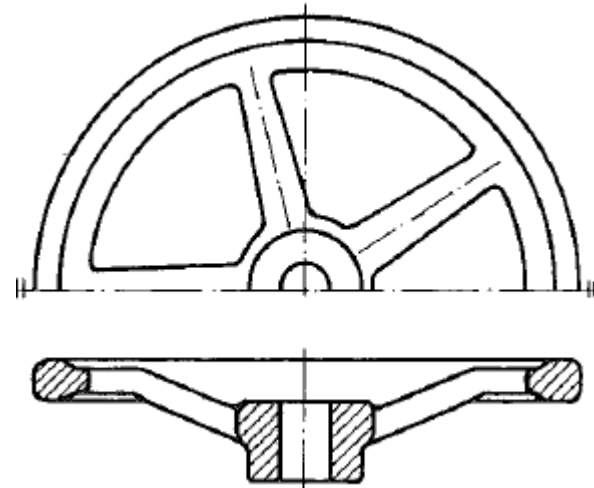
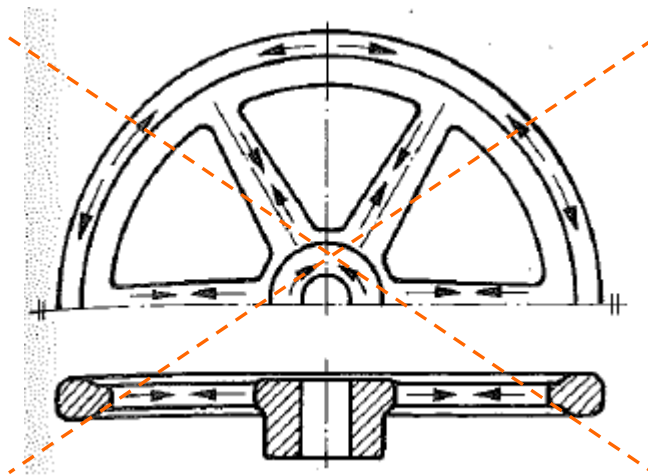
- Reduzieren von Spannungen und Verzug durch günstige Querschnittsgeometrie



Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gussteilen – gießgerecht

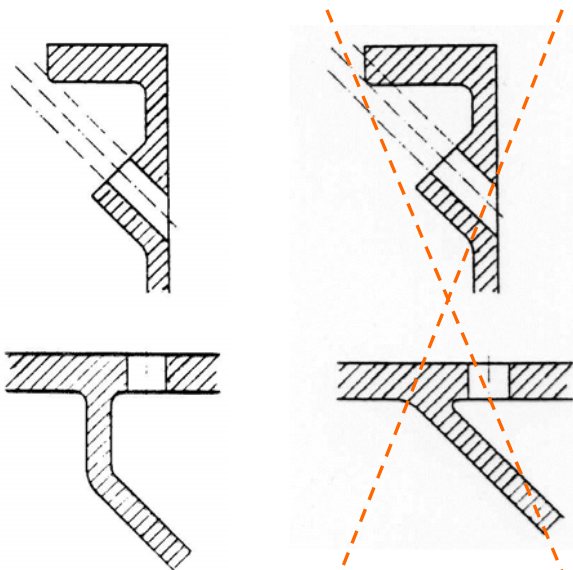
- Reduzieren von Spannungen und Verzug durch schräge und abgesetzte Formen und ungerade Speichenanzahl



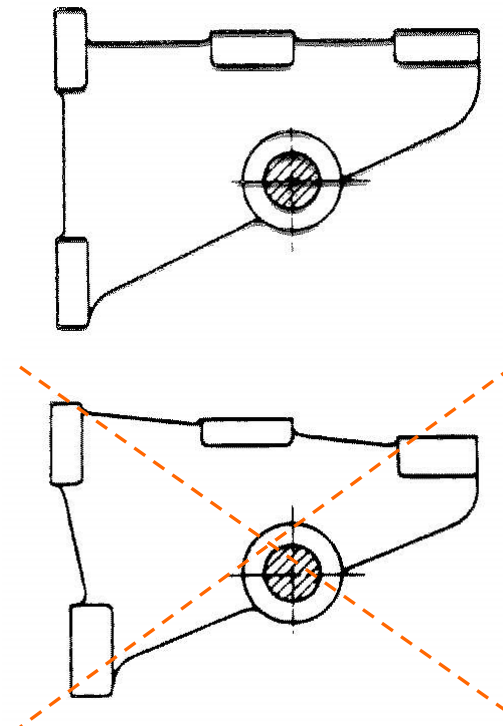
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gussteilen – bearbeitungsgerecht

➤ Zugänglichkeit für das Werkzeug



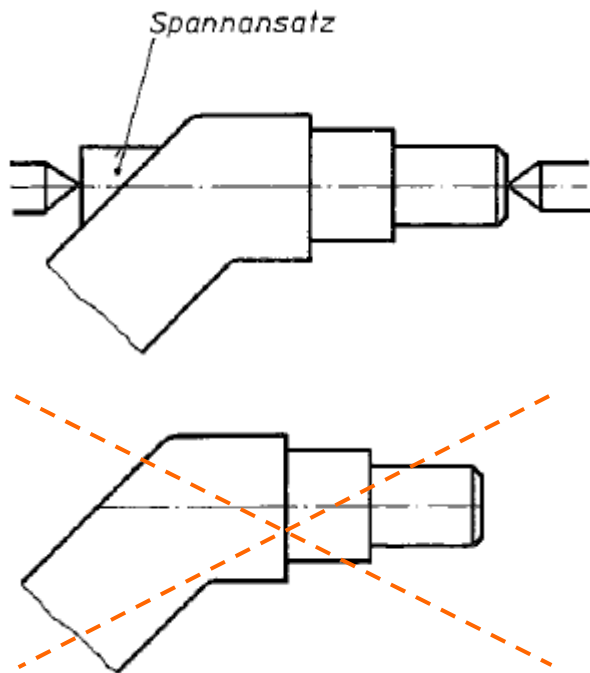
➤ Bearbeitung in einem Arbeitsgang



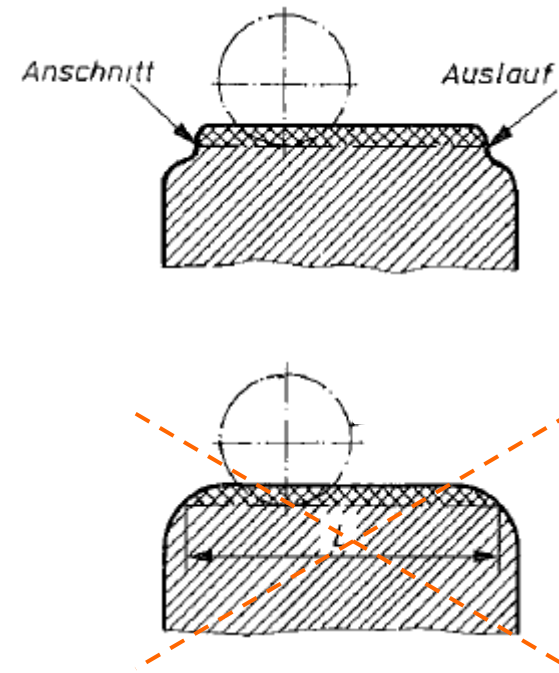
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gussteilen – bearbeitungsgerecht

- Spannmöglichkeit zur weiteren Bearbeitung vorsehen



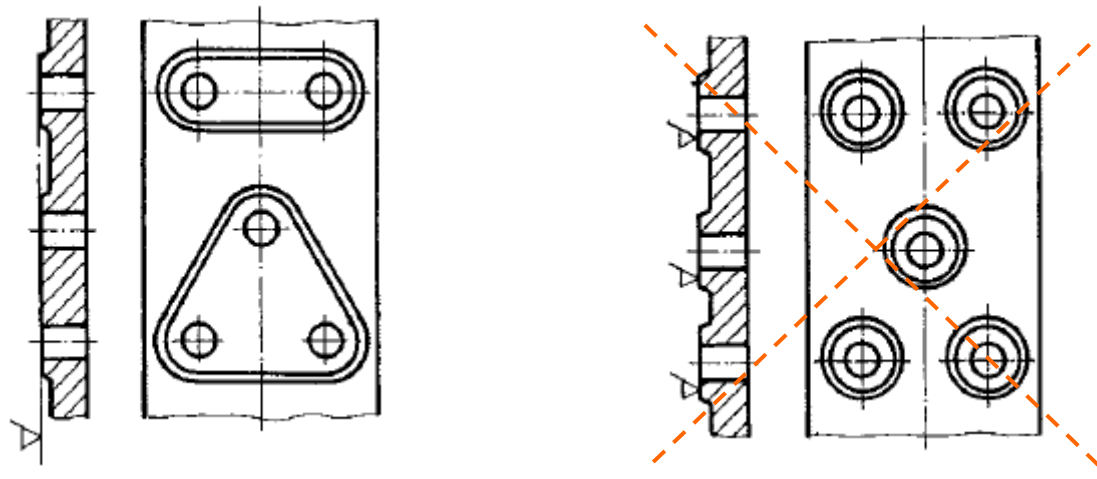
- Bearbeitungszugabe mit Auslauf (nicht durch Radien begrenzen)



Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gussteilen – bearbeitungsgerecht

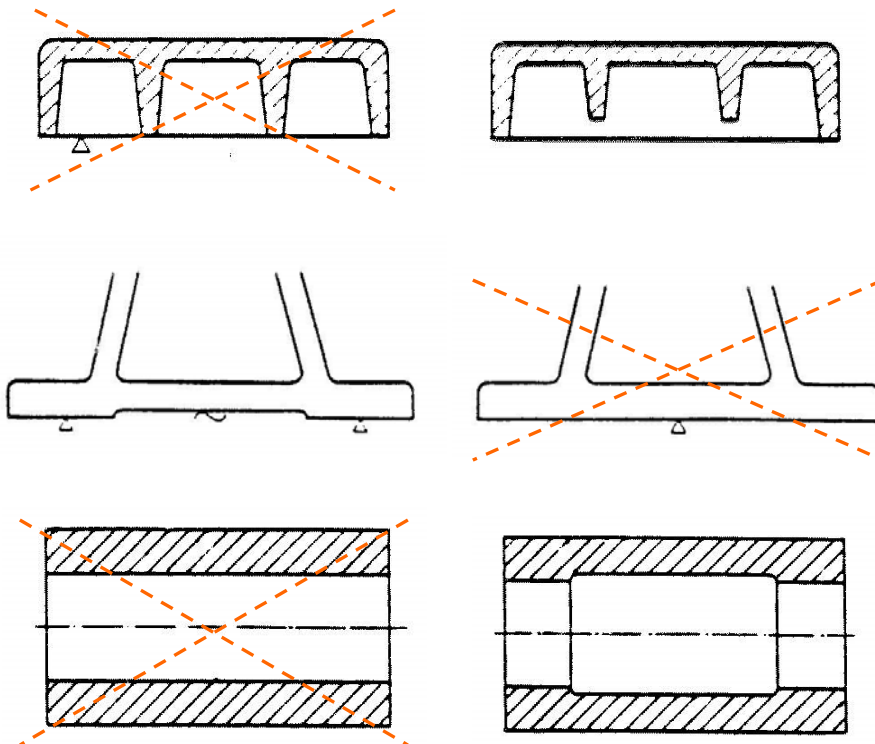
- Knapp nebeneinander liegende Bearbeitungsflächen auf einer Ebene vorsehen und zusammenfassen



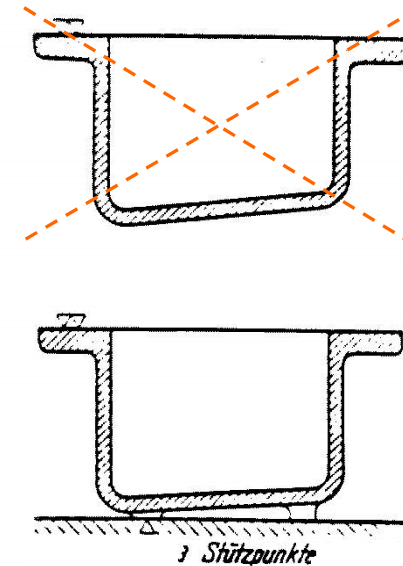
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gussteilen – bearbeitungsgerecht

➤ Minimierung der Bearbeitungsflächen



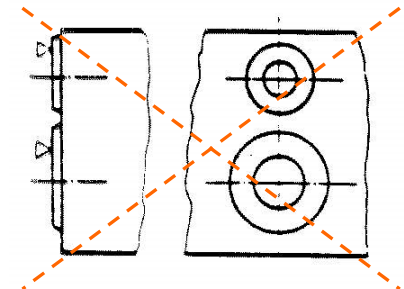
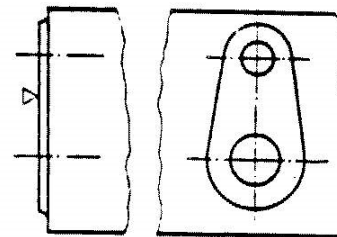
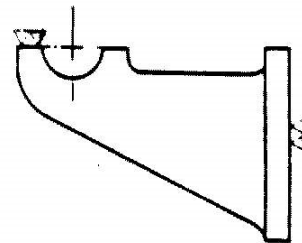
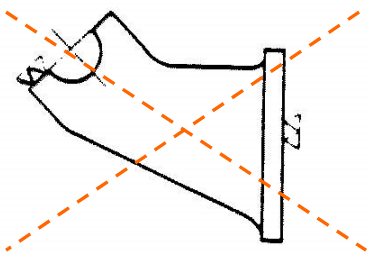
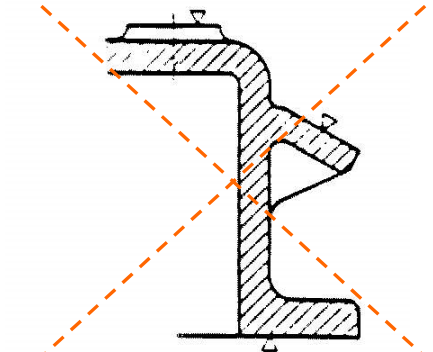
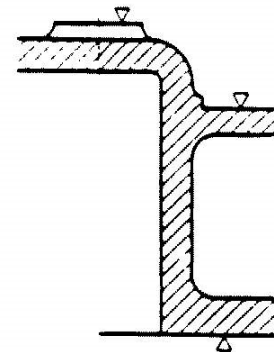
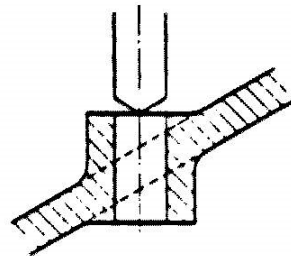
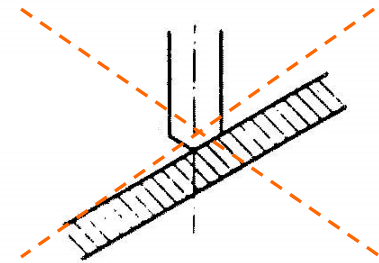
➤ Auflage des Gusswerkstücks



Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gussteilen – bearbeitungsgerecht

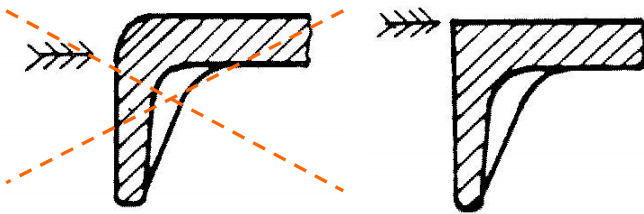
➤ Lage, Position und Ausrichtung und Ausführung von Bearbeitungsflächen



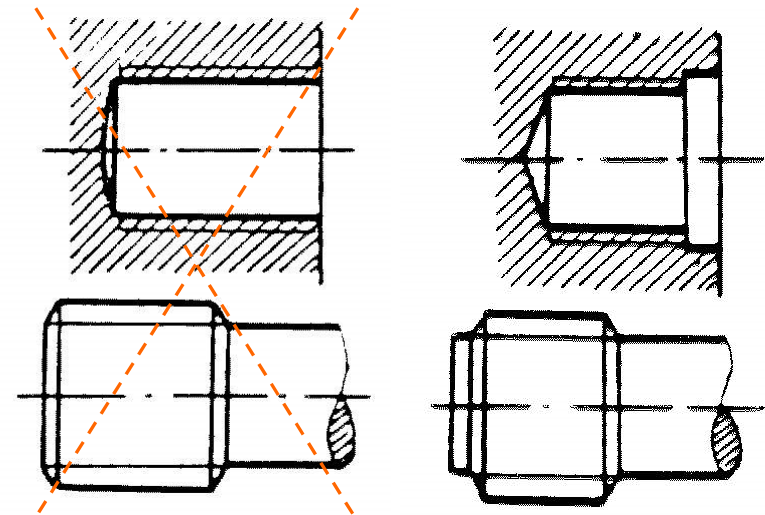
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gussteilen – zusätzliche Richtlinien für Druckgussteile

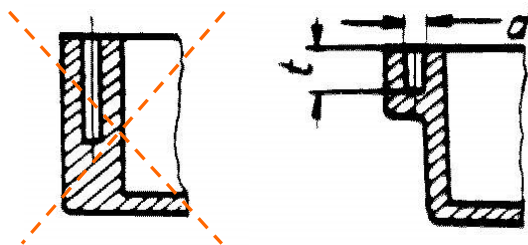
➤ Minimierung der Formbearbeitung



➤ Absetzen von Gewinden



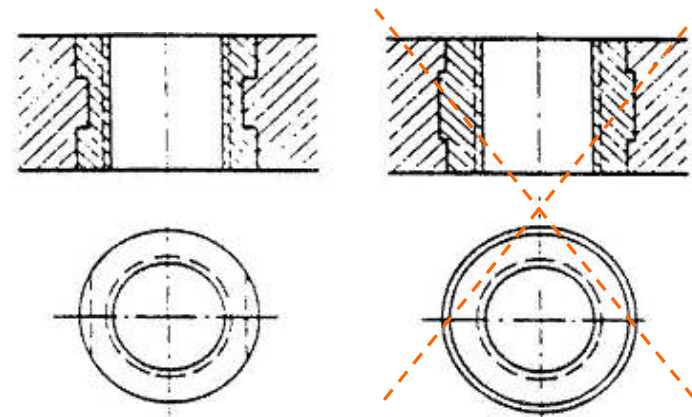
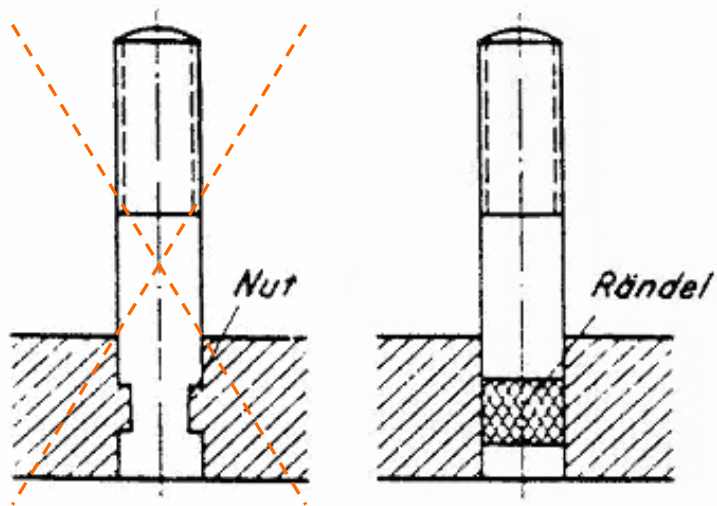
➤ Bohrungsgestaltung



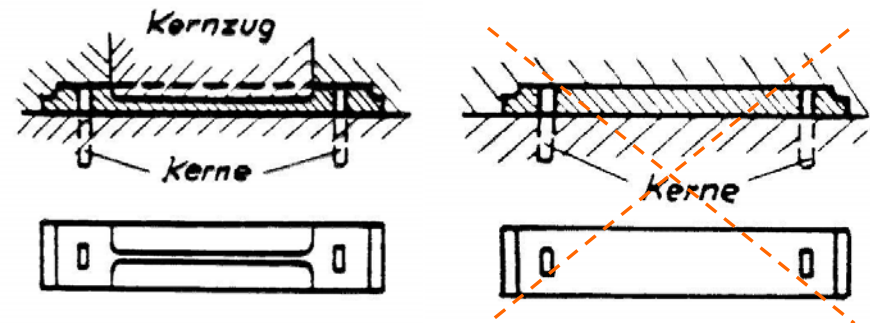
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gussteilen – zusätzliche Richtlinien für Druckgussteile

➤ Eingießen von Fremdteilen



➤ Entlastung von Schrumpfkraften

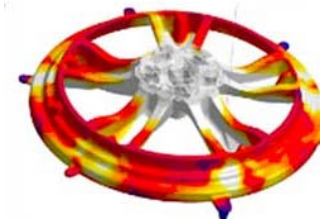
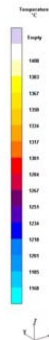
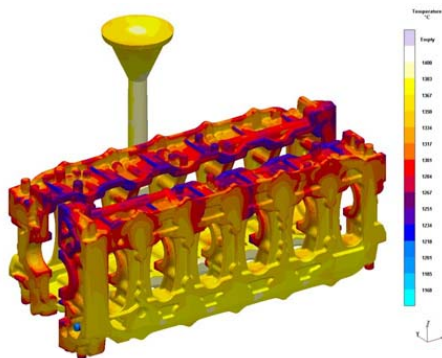
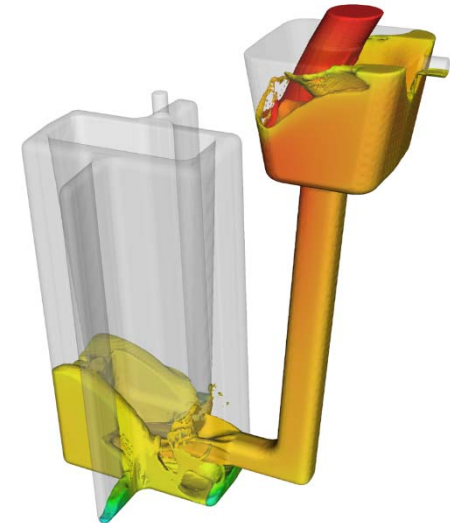


Gestaltungslehre

Softwareunterstützung für Gussteile

Simulation des Gießprozesses:

- Füllverhalten (Fließen des Metalls durch die Form)
- Temperatur- und Erstarrungsverhalten (hotspots, pores, cold shuts, shrinking ...)
- Optimierung der Bauteilgestalt (Querschnitte, Übergänge ...)
- Zusätzliche Geometrien günstig positionieren und gestalten (Anguss, Steiger, Kühlelemente ...)
- Analyse und Ermittlung geeigneter Prozessbedingungen (Formmaterial, Temperaturen Schmelze/Form, Füllgeschwindigkeit ...)



Gestaltungslehre

Pulvermetallurgische & Additive Fertigung

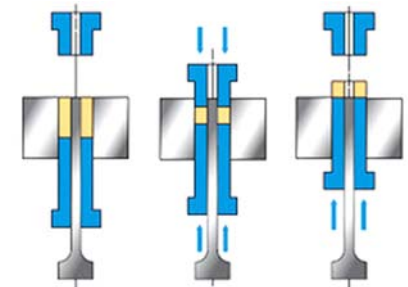
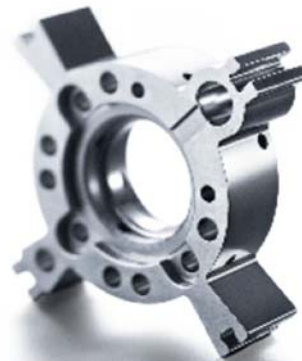
Gestaltungslehre

Sinterfertigung

- Verdichten eines Pulvergemisches in einer Negativform
- Anschließendes „Backen“ zu fertigem Bauteil

Typisch für kleine Massenteile

- Aufwändige Werkzeuge (Formen)
- Lange Vorbereitung erforderlich
- Schnelle Fertigung möglich



Gestaltungslehre

Additive Fertigung

Hinzufügen von Material an geforderten Stellen

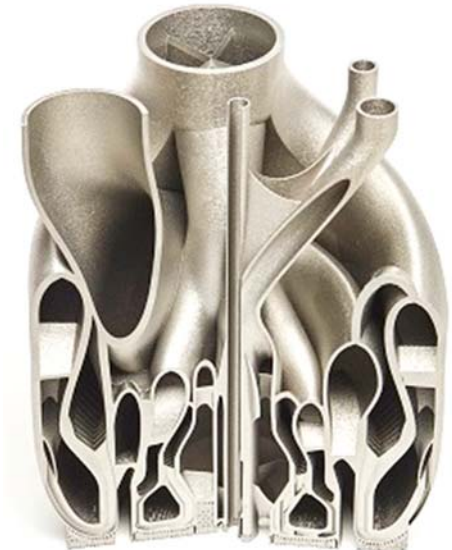
- Herstellung der komplexesten Formen möglich
- Hohlstellen, Hinterschneidungen, Freiformen...
- Reduktion mehrerer Komponenten auf ein Teil



Schwierigkeit:

- liegt vor allem VOR dem Fertigungsprozess
 - Erstellen des digitalen Modells (CAD)
 - Ggf. mit Topologieoptimierung
 - Aufbereiten zur Fertigung (Postprozessing)
- im Materialaufbau
 - Layer-Struktur durch schichtweise Auftragung
 - Bauteilfestigkeiten und Verhalten
- Beschränkungen
 - Material
 - Bauteilgröße
 - Fertigungszeit

→ Typisch für Sonderformbauteile



Gestaltungslehre

Additive Fertigung

Beispiele, Möglichkeiten und Visionen



Wearables



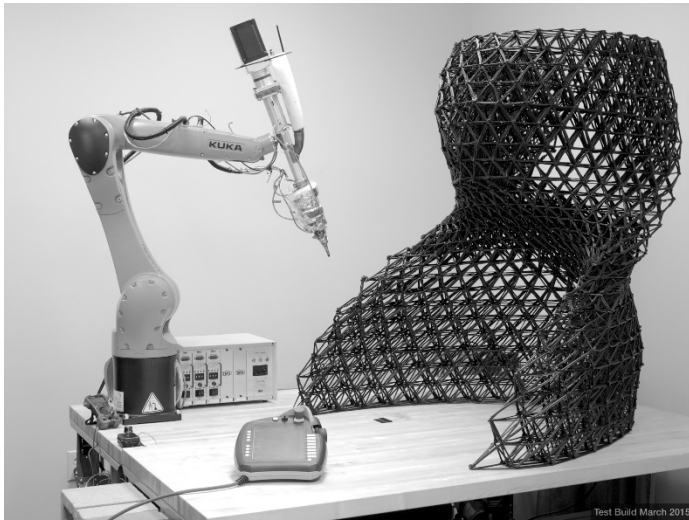
Medizintechnik (Bionik)



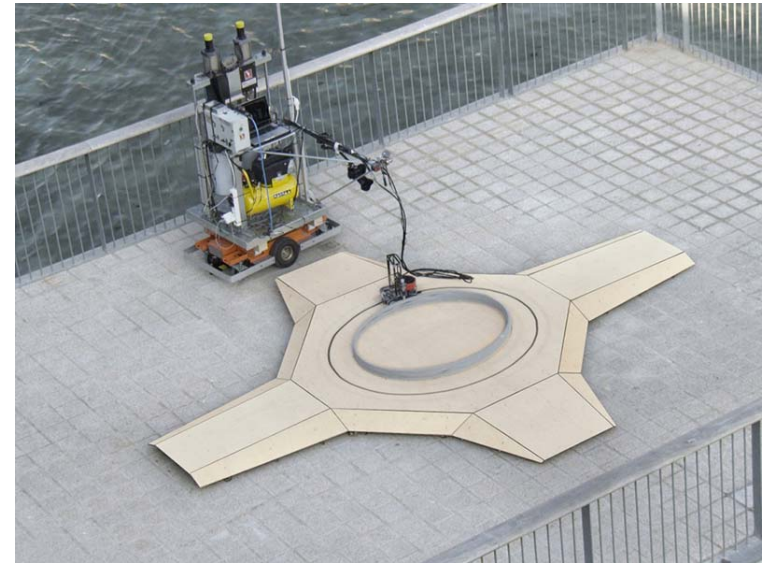
Gestaltungslehre

Additive Fertigung

Beispiele, Möglichkeiten und Visionen



Groß(struktur)bauteile



Bautechnik



Gestaltungslehre

Schmiedeteile

Gestaltungslehre

Gestaltung von Schmiedeteilen

Man unterscheidet:

➤ Warmumformung

- Oberhalb der Rekristallisationstemperatur
- Verzundern der Oberfläche
- Gute Umformbarkeit
- Geringe Umformkräfte
- Geringe Festigkeitsänderung durch die Umformung

➤ Kaltumformung

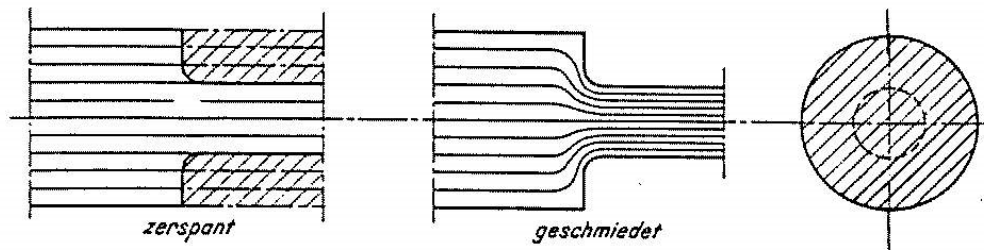
- Unterhalb der Rekristallisationstemperatur
- Kein Verzundern der Oberfläche
- Enge Maßtoleranzen und gute Oberflächen
- Kaltverfestigung – Erhöhen der Festigkeit und Abnahme der Bruchdehnung (Versprödung)

Gestaltungslehre

Gestaltung von Schmiedeteilen

Vergleich mit anderen Herstellungsverfahren (z.B. Zerspanen)

- Gute Materialausnutzung → geringere Materialkosten (kein bzw. wenig Verschnitt)
- Faserverlauf wird nicht unterbrochen → günstig bei kraftflussgerechten Formen
- Hohe Energiekosten bei der Warmumformung
- Kostenschwerpunkt beim Gesenkschmieden liegt in den Werkzeugkosten
→ für hohe Stückzahlen wirtschaftlich



Gestaltungslehre

Gestaltung von Schmiedeteilen

Schmiedeverfahren:

- Freiformschmieden
- Gesenkschmieden



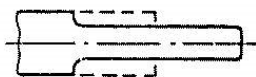
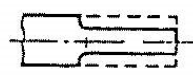
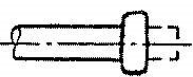

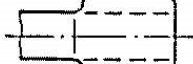




Gestaltungslehre

Gestaltung von Schmiedeteilen

➤ Freiformschmieden

- Manuelle Formgebung von Hand oder maschinenunterstützt
- Werkstoff kann zwischen Schlag- & Auflagefläche frei ausweichen (fließen)
- Sehr geringe Stückzahlen und sehr geringe Genauigkeit

➤ Arbeitsverfahren

	Strecken	Breiten	Stauchen
Seitenansicht			
Draufsicht			
Faserverlauf			

Gestaltungslehre

Gestaltung von Schmiedeteilen

➤ Gesenkschmieden

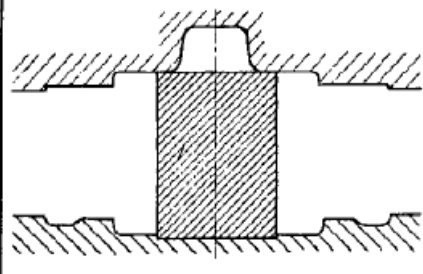
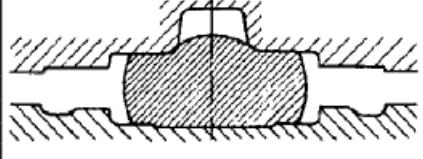
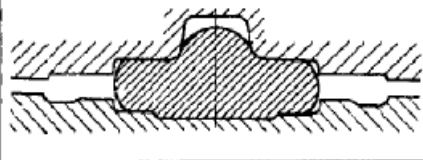
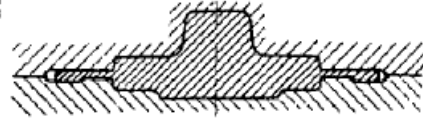
- Je nach Genauigkeit unterteilt man in:
Gesenkschmieden mit Grat, ohne Grat und Präzisionsschmieden
- Formgebung erfolgt durch Werkzeugformen (Gesenke)
mit der negativen Form des Schmiedestücks
- Wirtschaftlich für hohe Stückzahlen



Gestaltungslehre

Gestaltung von Schmiedeteilen

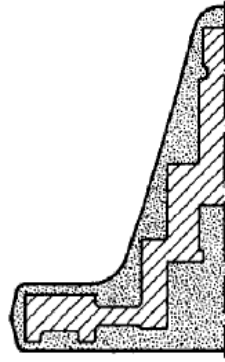
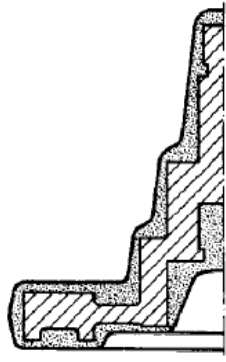
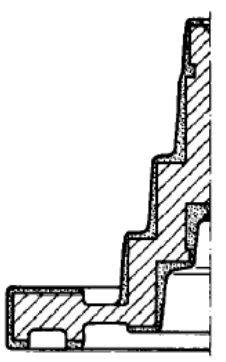
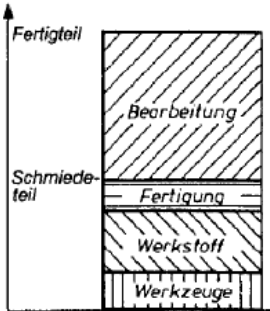


- Gesenkschmieden
 - Werkstoffvorgänge im Gesenk

	Vorgänge im Gesenk	Hinweise
Stauchen		Werkstoff fließt überwiegend in Richtung der Werkzeugbewegung, kurze Gleitwege
Breiten		Werkstoff fließt überwiegend quer zur Werkzeugbewegung, lange Gleitwege, größere Reibung
Steigen		Werkstoff fließt überwiegend entgegen der Werkzeugbewegung, letzte Umformphase im Gesenk
		Werkstoff hat die Gravur und die Gratrille ausgefüllt

Gestaltungslehre

Gestaltung von Schmiedeteilen

- Gesenkschmieden
 - Stückzahlabhängigkeit
in Bezug auf die Kosten

Stückzahl	klein < 50 Stück	mittel ca. 500 Stück	groß > 5000 Stück
Kontur Schmiedeteil			
Anpassung an Fertigteil	gering	mäßig	gut
Kosten			

Gestaltungslehre

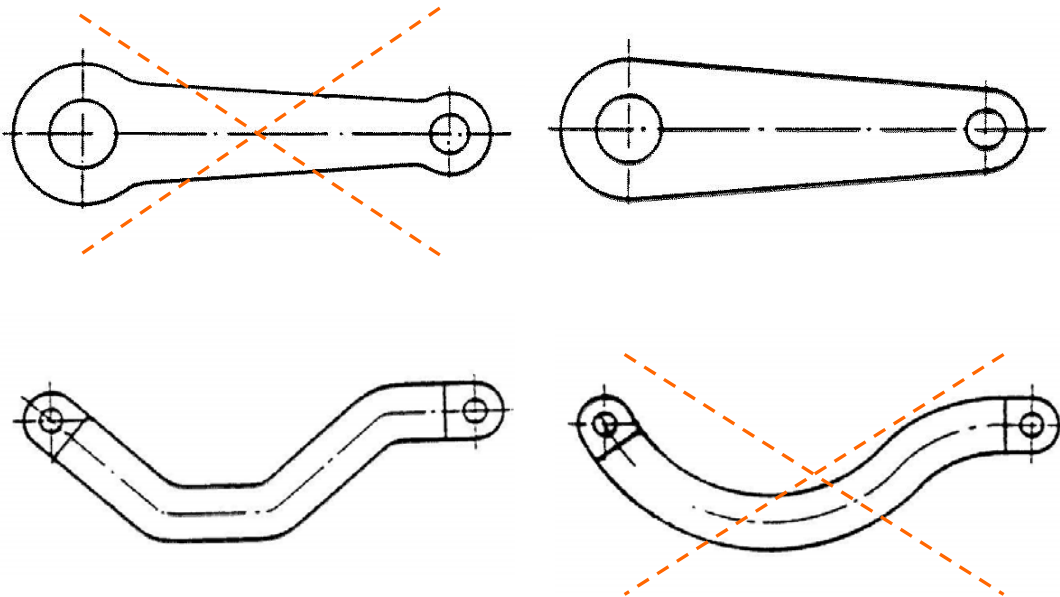
Gestaltung von Gesenkschmiedeteilen

- Keine Hinterschneidungen
- Abschrägen von Flächen in Schlag- bzw. Pressrichtung
(damit die Stücke leicht aus dem Gesenk herausgehoben werden können)
- Vermeiden scharfer Kanten, schroffer Querschnittsübergänge und große Werkstoffanhäufungen
- Achten auf einfache Entfernbarkeit des Grades
(durch günstige Wahl der Teilfugen)
- Werkstücke sind umso schwieriger herzustellen,
je größer und je flacher sie sind
- Oft ist angepasstes Vorformen des Rohteiles bzw.
Umformen in mehreren Stufen erforderlich

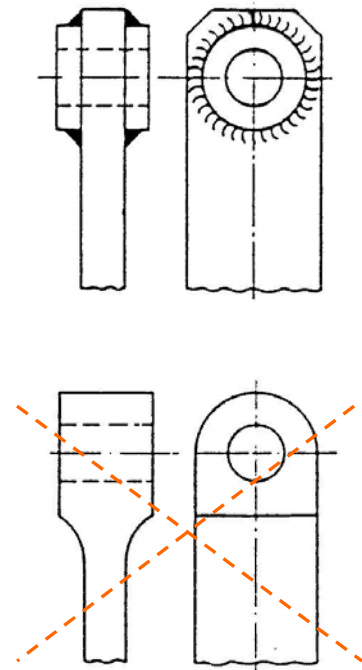
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Freiformschmiedeteilen

➤ Einfache Formen anstreben



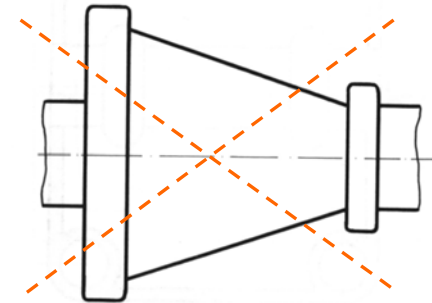
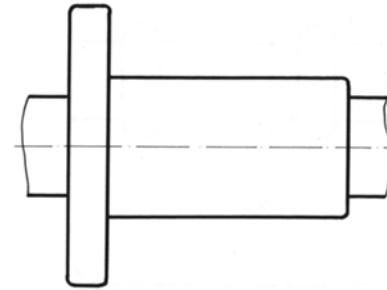
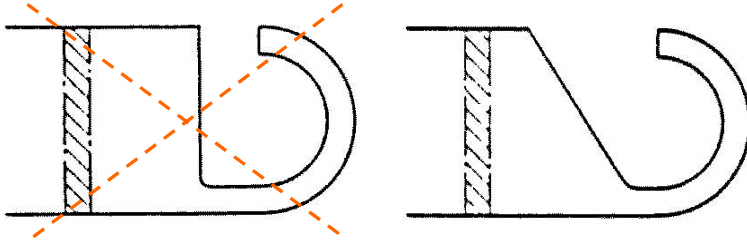
➤ Staucharbeiten meiden



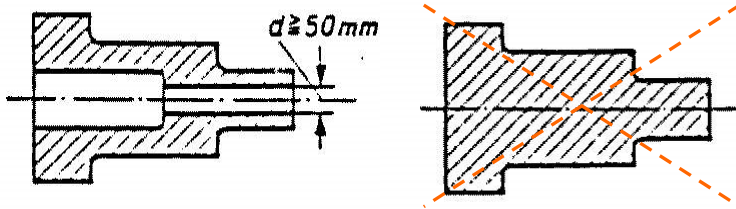
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Freiformschmiedeteilen

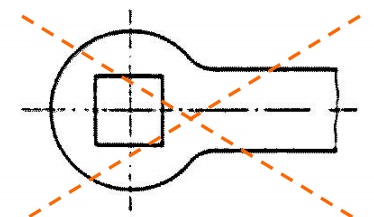
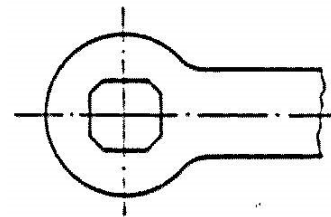
➤ Materialreduzierung an Übergängen



➤ Materialreduzierung durch Hohlstellen
(Dornen und Lochen)



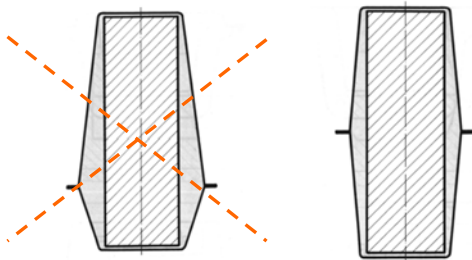
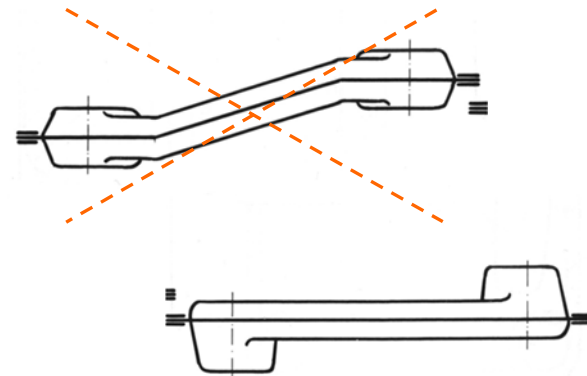
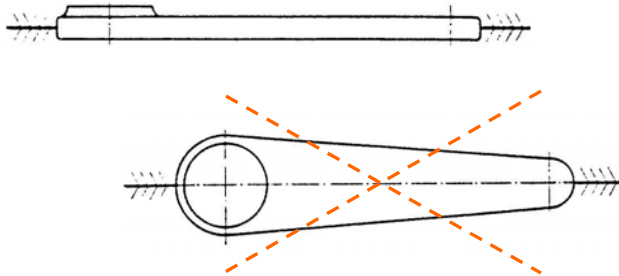
➤ Scharfe Kanten vermeiden



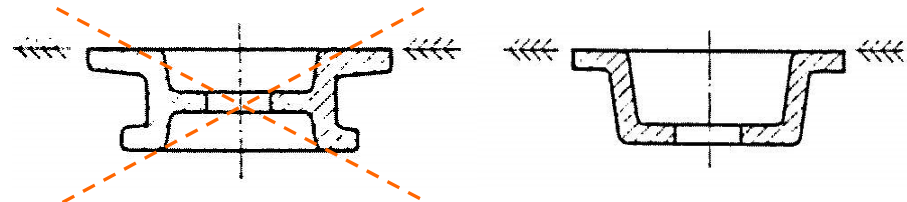
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gesenkschmiedeteilen

➤ Lage der Gesenkteilfuge



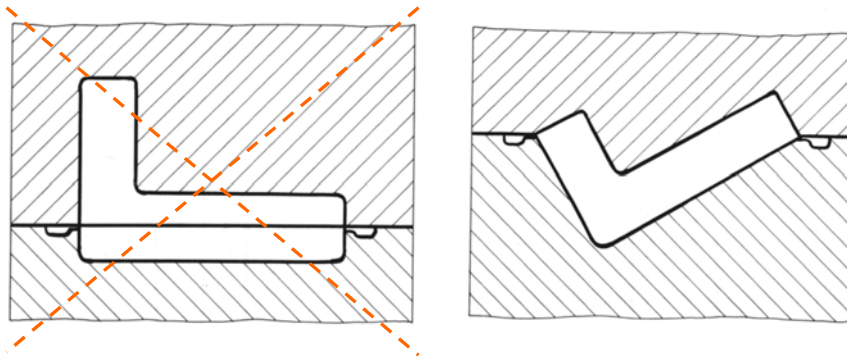
➤ Keine Hinterschneidungen



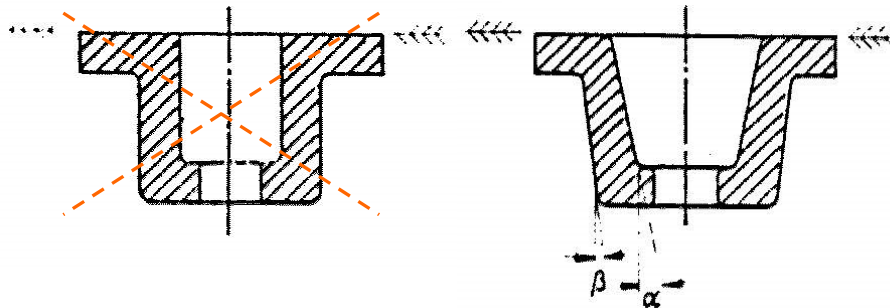
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Gesenkschmiedeteilen

➤ Lage der Gesenkteilfuge



➤ Aushebeschrägen

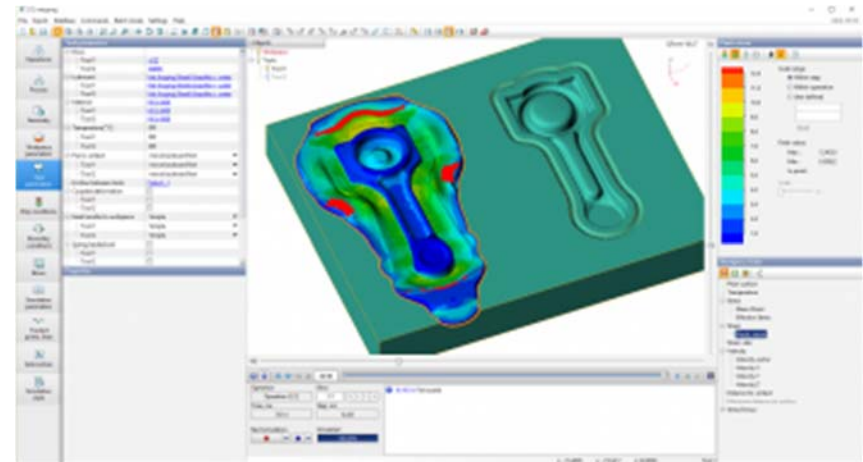
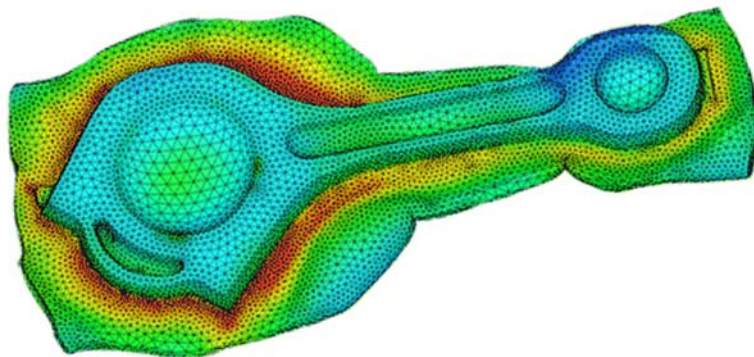
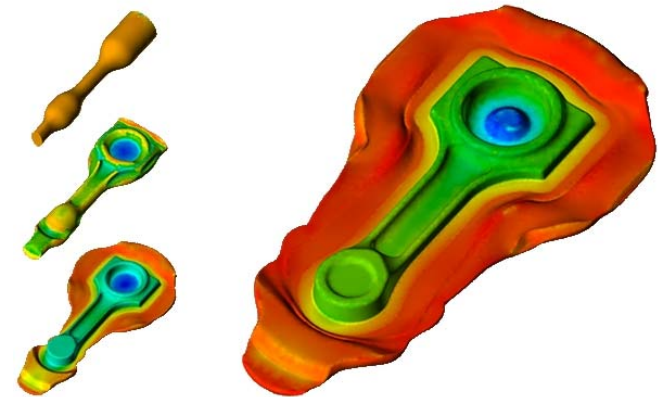


Gestaltungslehre

Softwareunterstützung für Schmiedeteile

Simulation des Gesenkschmiedeprozesses:

- Füllverhalten im Gesenk
- Umformvorgänge
- Kraftverhältnisse und Belastungen
- Optimierung der Bauteil- bzw. Gesenkform
- Materialausnutzung und Anpassen der Vorform



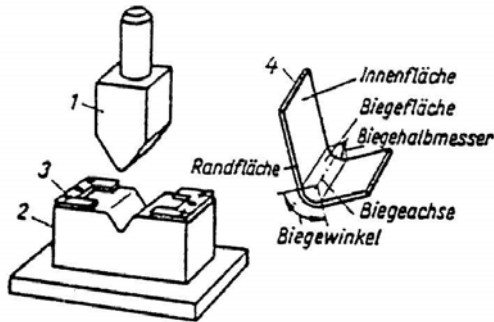
Gestaltungslehre

Biegekonstruktionen

Gestaltungslehre

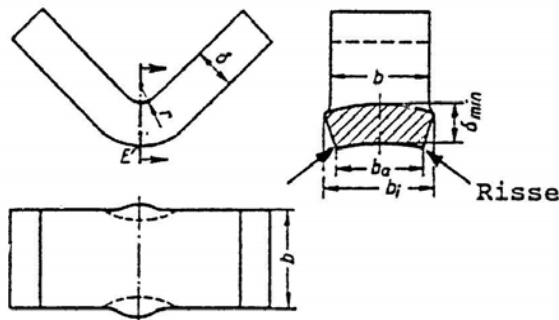
Biegen

- Typischerweise zur Herstellung einer 3D-Geometrie aus Blechen (Blechumformung)
- Werkstoff wird gezogen (Außenfläche) und gestaucht (Innenfläche)



- 1 ... Oberstempel mit innerer Biegekante
- 2 ... Unterstempel mit äußerer Biegekante
- 3 ... Zuschnittsaufnahme
- 4 ... Biegeteil

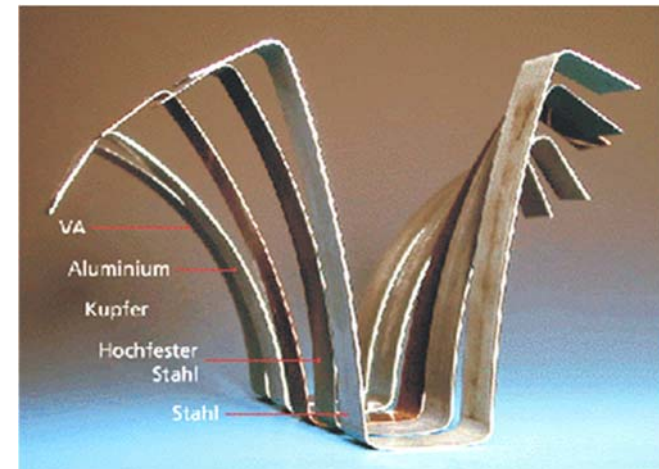
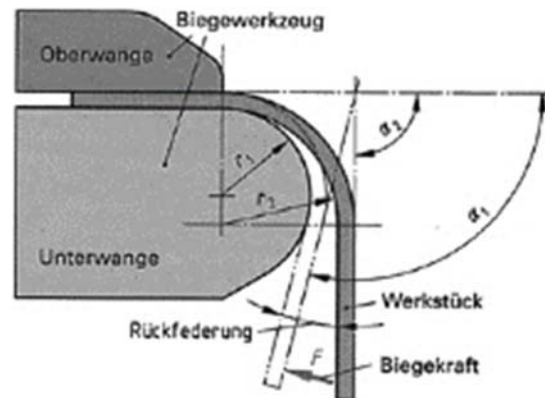
- Veränderung des Gefüges in der Biegezone (Kaltverfestigung)
- Bei dicken Blechen werden die an der Innenfläche liegenden Fasern gestaucht und weichen zum Rand hin aus (Materialanhäufung). An den Randkanten der Außenfläche besteht Rissgefahr.



Gestaltungslehre

Biegen

- Rückfederung beim Biegen
 - Entsteht durch den Anteil der elastischen Verformung
 - Werkstoffabhängig
 - Abhilfe durch Überbiegen

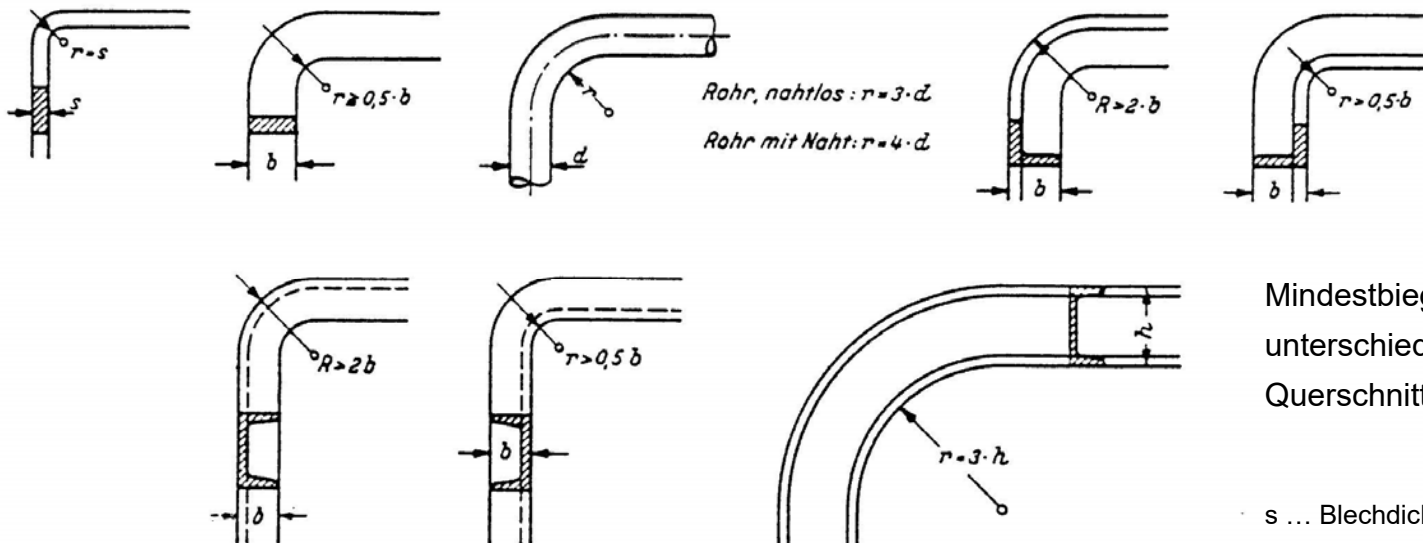


Gestaltungslehre

Biegen

➤ Richtwerte für Mindestbiegeradien (zur Vermeidung von Überbeanspruchungen in der Biegezone)

- weiche Blechwerkstoffe $r_{i.min} = 0,5 \cdot s$,
- harte Blechwerkstoffe (Stanz-, Ziehbleche) $r_{i.min} = s$
- federharte Blechwerkstoffe $r_{i.min} = 3 \cdot s$



Rohr, nahtlos: $r = 3 \cdot d$
Rohr mit Naht: $r = 4 \cdot d$

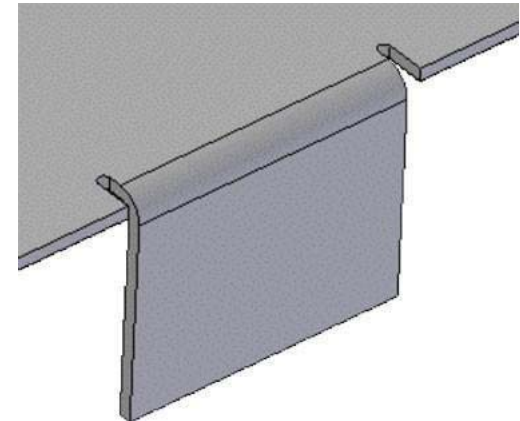
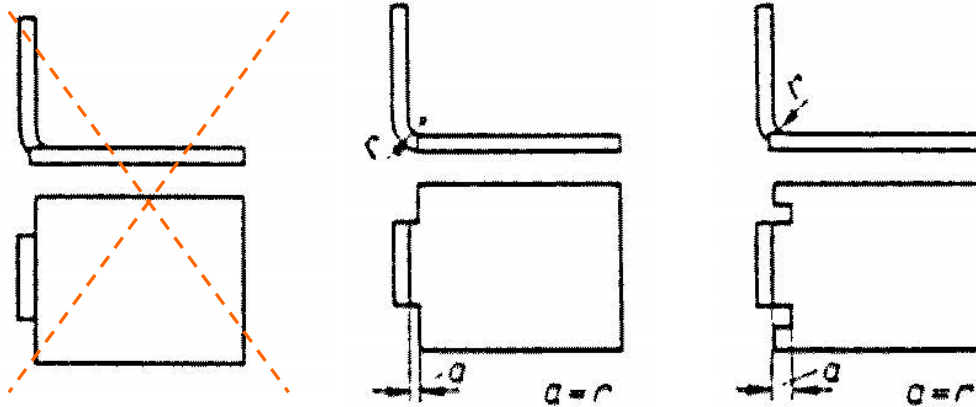
Mindestbiegeradien für
unterschiedliche
Querschnitte

s ... Blechdicke
b / h ... Profilbreite / -höhe
d ... Durchmesser

Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Biegekonstruktionen

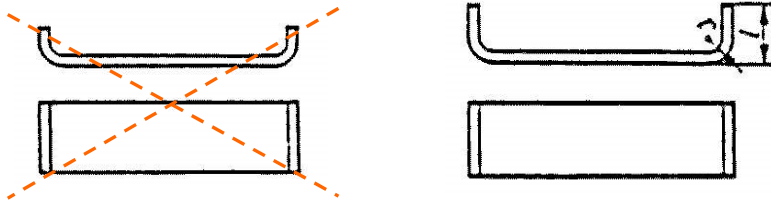
➤ Freistriche an den Biegeausläufen (Enden der Biegekante)



Gestaltungslehre

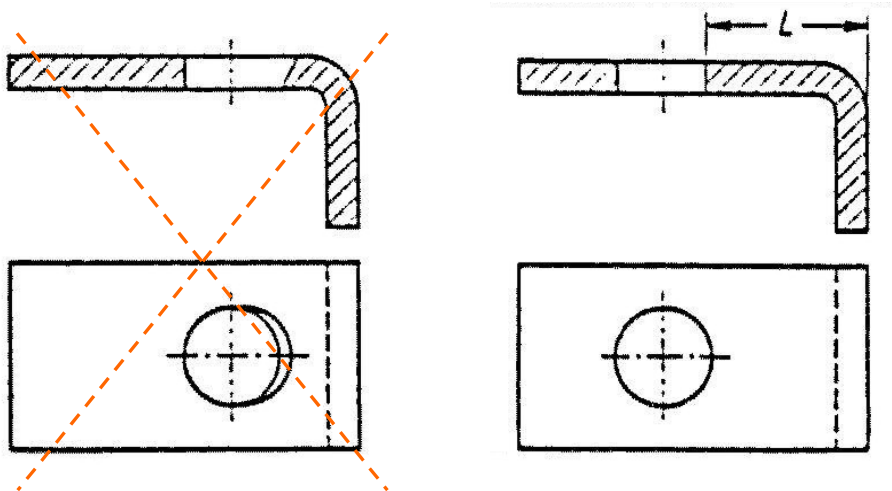
Gestaltungsrichtlinien von Biegekonstruktionen

- Gewisse Mindest-Schenkellängen einhalten



Mindestschenkellänge $L = 3 \cdot s$

- Gewissen Mindest-Lochabstand zur Biegung einhalten

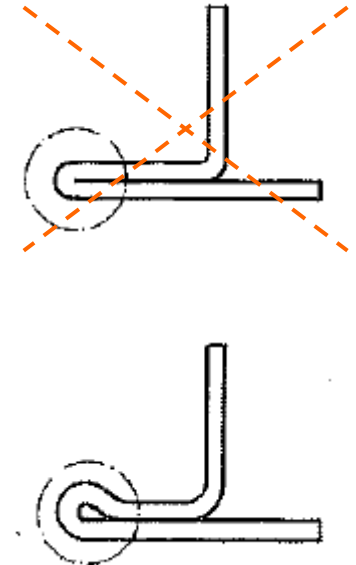
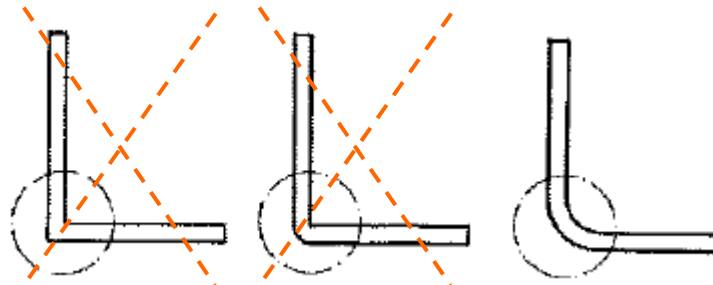
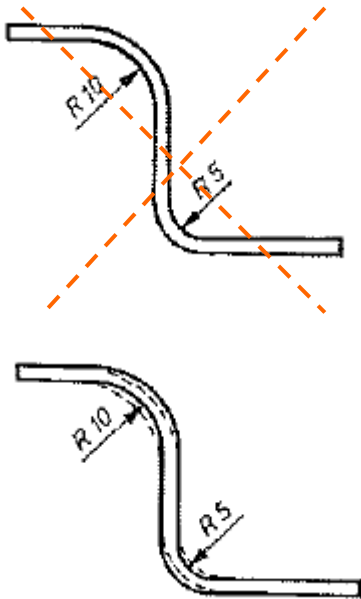


Lochabstand $L = r_i + 3 \cdot s$

Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Biegekonstruktionen

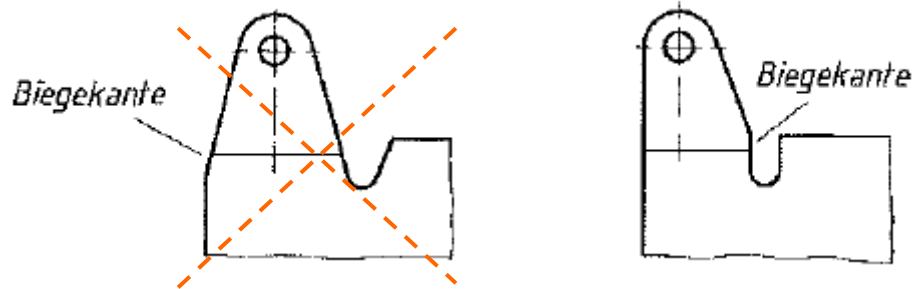
- Günstige Wahl von Biegeradien:
- Abweichungen in den Radien zulassen
 - keine zu scharfen Radien fordern
 - scharfkantiges Zudrücken vermeiden



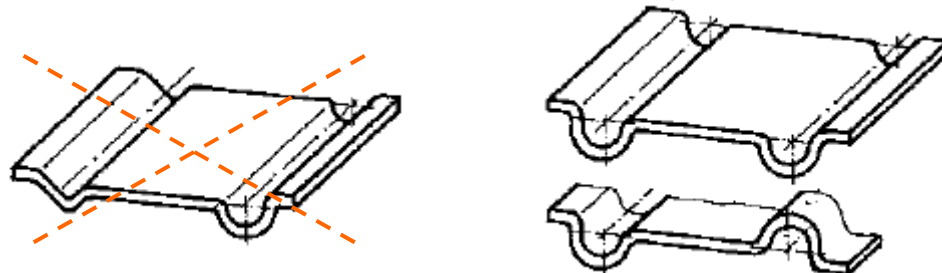
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Biegekonstruktionen

- Gerade Biegekante bzw. Biegefreistich ausführen



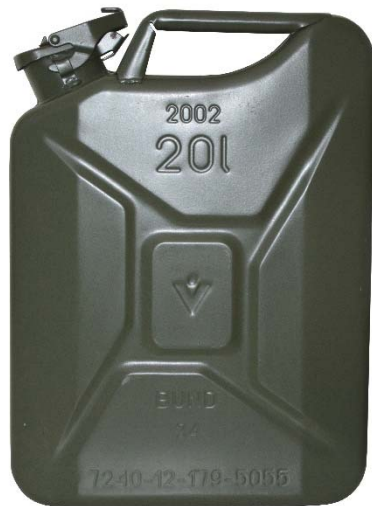
- Einheitliche Biegungen (gleiche Werkzeuge)



Gestaltungslehre

Sicken

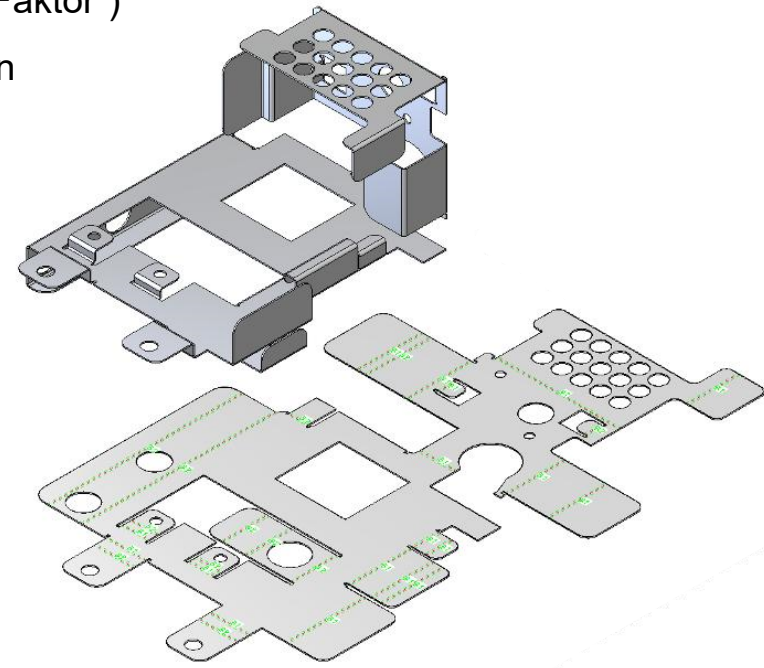
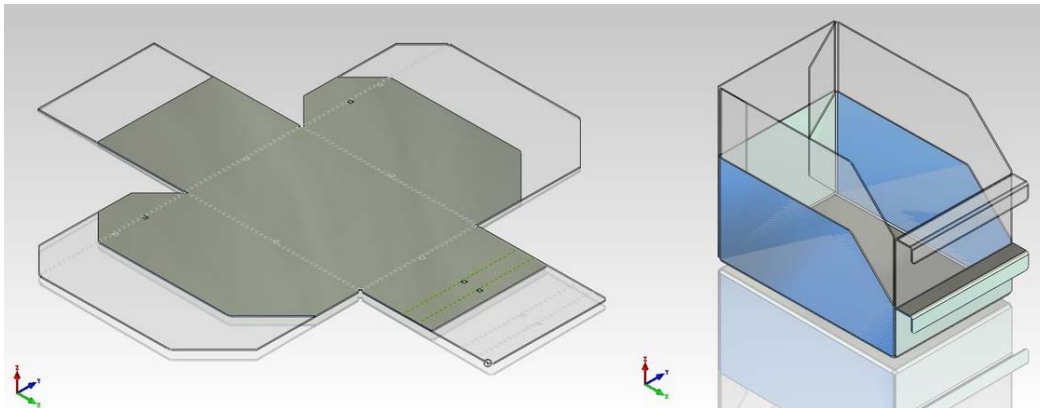
- Erhöhen der Steifigkeit
 - Sicken in Flächen
 - Sicken in Biegekanten (ähnlich Rippen)



Gestaltungslehre

Blechabwicklungen (Platinen)

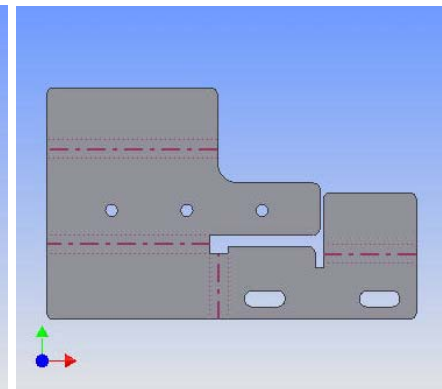
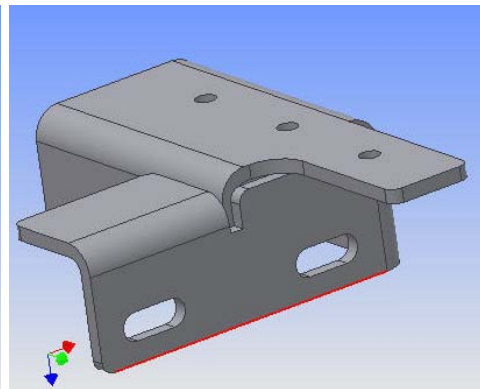
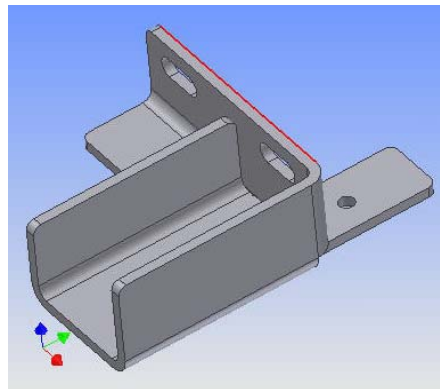
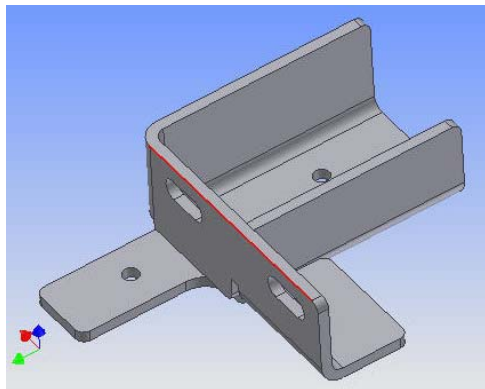
- Blech-Zuschnitt des flachen (ungekanteten) Bleches
- Biegefreistiche und Biegehilfslinien weisen auf die Biegekanten hin
- Abmessungen des Blechzuschnitts an der Biegekante:
 - Biegeverkürzung (Längenkorrektur mittels „k-Faktor“)
 - Abschläge an der Biegung in Abhängigkeit von Blechstärke, Biegeradius und Material
 - Software zur genauen Maßermittlung



Gestaltungslehre

Blechabwicklungen (Platinen)

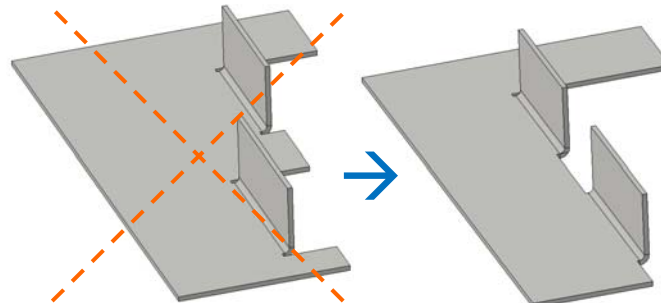
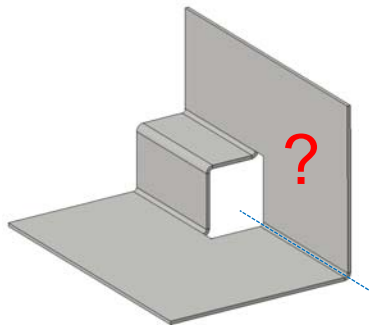
- Bei komplexen Biegekonstruktionen auf Herstellbarkeit achten:
 - Keine überschneidenden Flächen in der Blechabwicklung!
 - (Einfache) Zugänglichkeit zum Biegen ermöglichen (evtl. Festlegen der Biegereihenfolge)
 - In Frage kommende alternative Kanten als Biegekante andenken (Herstellvarianten) um den Blechzuschnitt und/oder den Biegeprozess zu optimieren



Gestaltungslehre

Ergänzend zum Konstruieren von Biegekonstruktionen

- Überprüfen der Herstellbarkeit der Biegekonstruktion (Abwicklung, Biegereihenfolge ...)
- Biegen ganzer Flächen und eine durchgehende Biegekante bevorzugen
(teilweise oder unterbrochen gebogene Flächen zur einfacheren Herstellung nach Möglichkeit vermeiden)
- Steifigkeitszunahme der Konstruktion durch Biegen gezielt nutzen
- Optische Sauberkeit von Biegekanten zur Konstruktion sichtbarer Kanten nutzen
(Abdeckungen biegen anstelle von schweißen, Stirnkanten von Blechen abwinkeln ...)
- Biegen von Kantblechen zur Herstellung eigener Profile

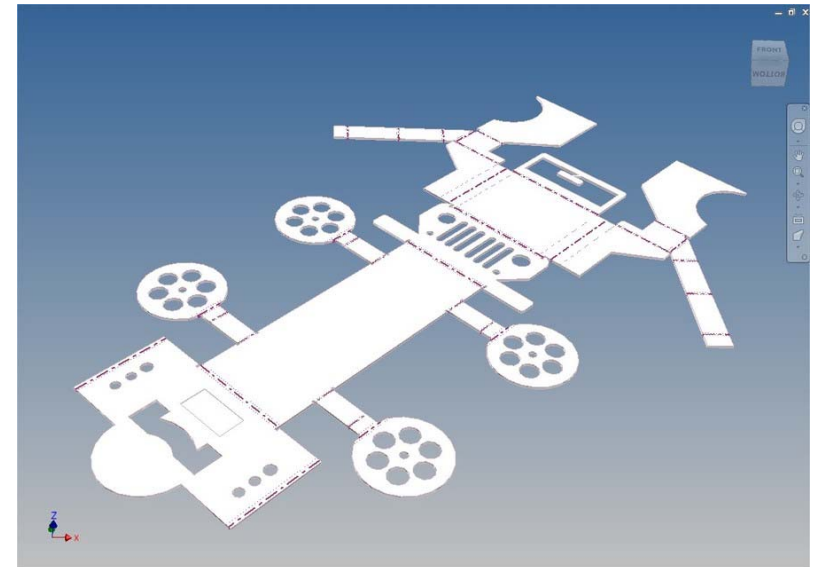
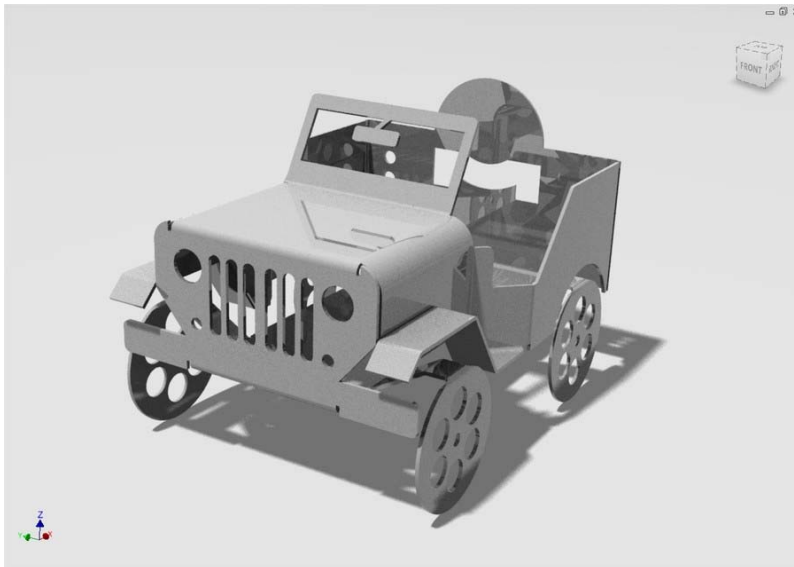


Gestaltungslehre

Softwareunterstützung für Biegekonstruktionen

Blehtools:

- Vorlagen und Erstellungshilfe für diverse Formelemente von Biegungen (Freistiche, Ecken ...)
- Erstellen „echter“ Biegungs-Geometrien (basierend auf Werkstoffdaten: Verformungen an Biegeausläufen, Effekt schräger Biegekanten, Erforderliches Überbiegen ...)
- Sehr schnelles und zuverlässiges Erstellen von Blechabwicklungen (in wahrer Länge; inkl. Biegehilfslinien, Biegereihenfolge ...)



Gestaltungslehre

Schweißkonstruktionen

Gestaltungslehre

Schweißkonstruktionen

Schmelzschweißverfahren:

- ❖ Schutzgasschweißen (MIG/MAG & WIG)
- ❖ Lichtbogenschweißen
- ❖ Unterpulverschweißen



Gestaltungslehre

Metallschutzgasschweißen (MIG/MAG)

- Lichtbogen brennt in einem Schutzgasmantel
- Schutzgas schützt das Schmelzbad und den eintropfenden Zusatzwerkstoff vor Oxidation
- Automatische Schweißdrahtzuführung mit einstellbarer Geschwindigkeit
- Typische Schweißdrahtdurchmesser liegen zwischen 0,8 und 1,2 mm (seltener 1,6 mm)

❖ MIG (Metallinertgasschweißen)

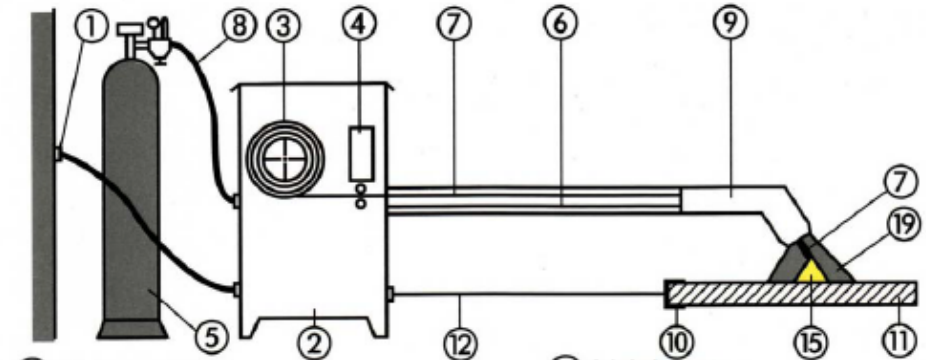
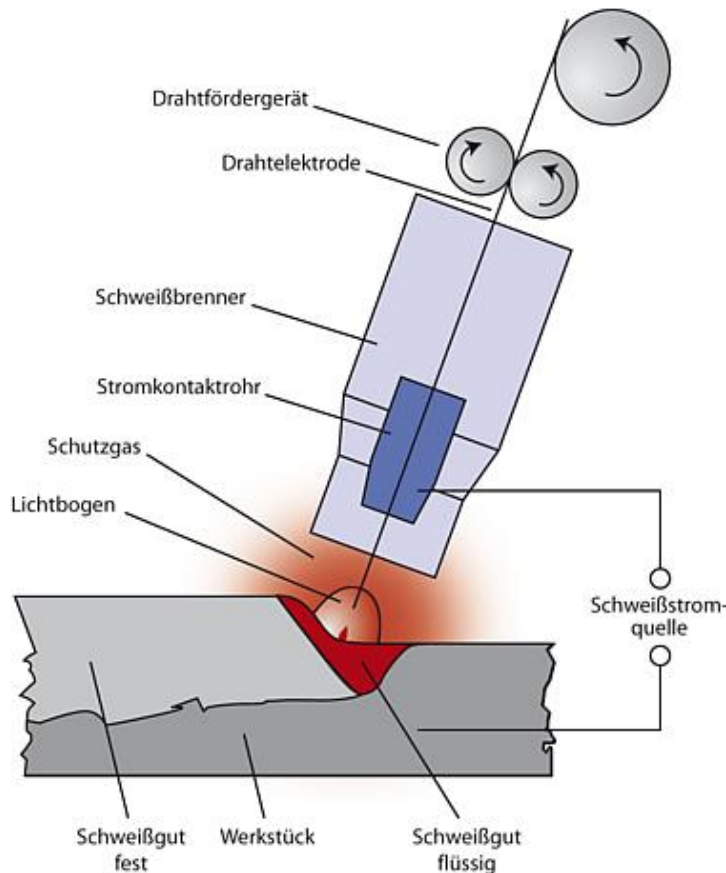
- Verwendung von reinem Ar (oder He)
- Bevorzugt für NE-Metalle (Al-, Cu-Legierungen)

❖ MAG (Metallaktivgasschweißen)

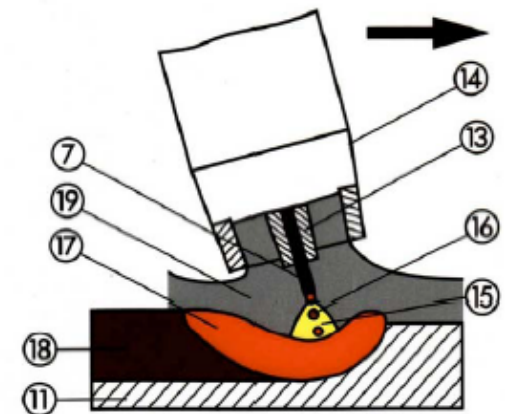
- Verwendung von CO₂ oder Gemisch aus Ar und CO₂
- Typische Verwendung für Stähle

Gestaltungslehre

❖ Verfahrens-Prinzip MIG / MAG



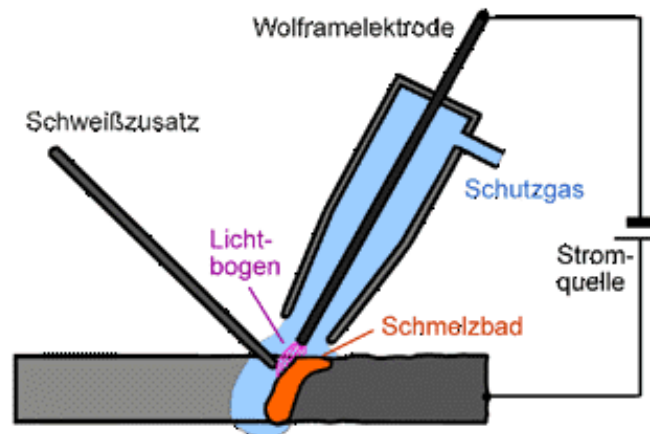
- ① Netzanschluß
- ② Schweißstromquelle
- ③ Drahtelektrodenspule
- ④ Drahtfördereinrichtung
- ⑤ Schutzgasflasche mit Druckminderer und Gasmengenmesser
- ⑥ Schweißstromleitung
- ⑦ Drahtelektrode
- ⑧ Schutzgasschlauch
- ⑨ Schweißbrenner
- ⑩ Werkstückklemme
- ⑪ Werkstück
- ⑫ Schweißstromleitung (Werkstück)
- ⑬ Stromkontaktrohr
- ⑭ Schutzgasdüse



Gestaltungslehre

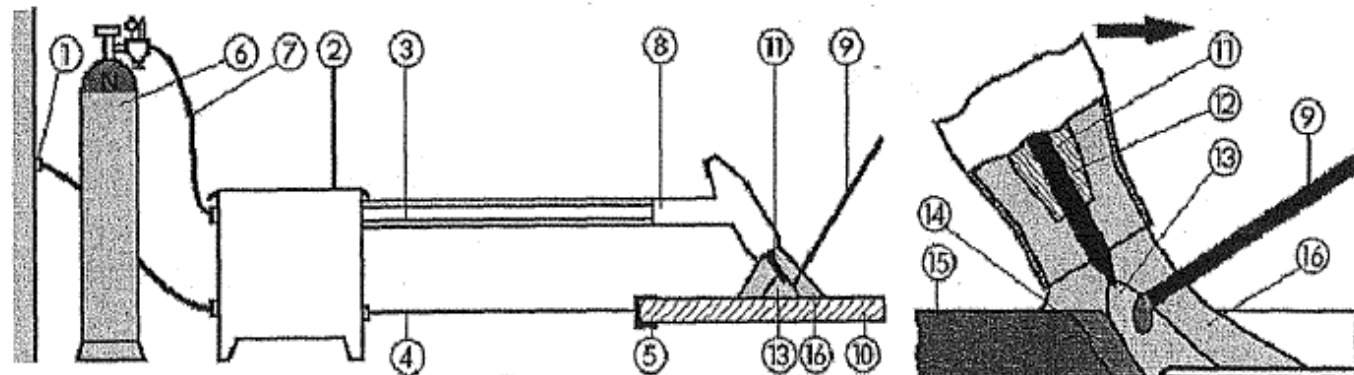
WIG (Wolframinertgasschweißen)

- Kernstück ist eine nicht abschmelzende temperaturbeständige Wolframelektrode
- Diese erzeugt den Lichtbogen, der den Werkstoff erwärmt und verflüssigt
- Schweißzusatz wird meistens per Hand zugeführt
- geringere Schweißgeschwindigkeit
- Unter Schutzgas Ar (oder He)
- Bevorzugt für rostfreie Stähle, Aluminium- und Nickellegierungen
- Es werden höchste Qualitätsanforderungen erzielt



Gestaltungslehre

❖ Verfahrensprinzip WIG (Wolframinertgasschweißen)



- ① Netzanschluß
- ② Schweißstromquelle
- ③ Schweißstromleitung (Elektrode)
- ④ Schweißstromleitung (Werkstück)
- ⑤ Werkstückklemme
- ⑥ Schutzgasflasche mit Druckminderer und Gasmengenmesser

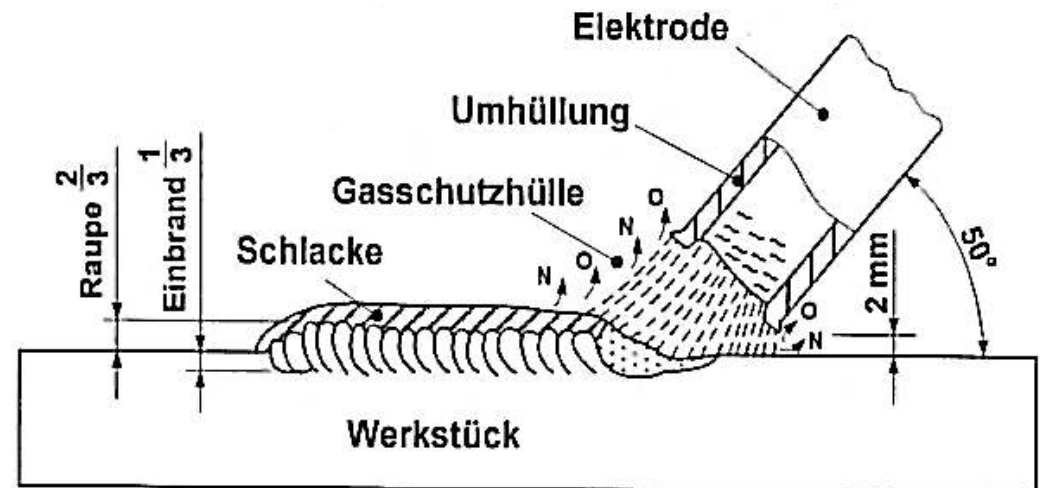
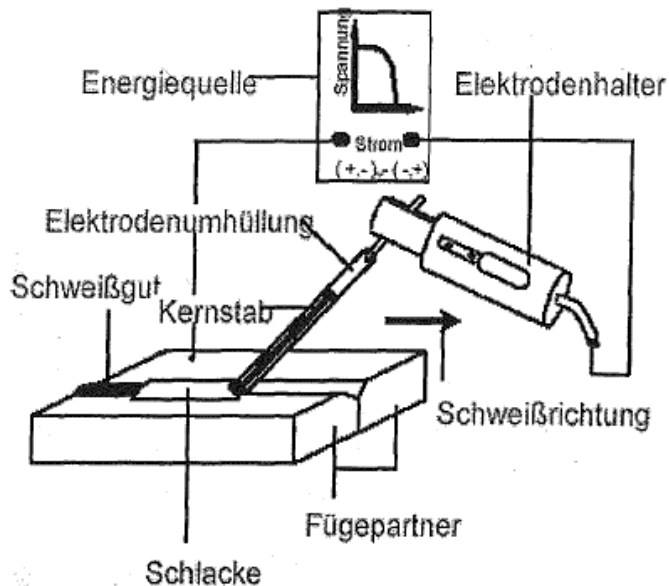
- ⑦ Schutzgasschlauch
- ⑧ Schweißbrenner
- ⑨ Schweißstab
- ⑩ Werkstück
- ⑪ Wolframelektrode
- ⑫ Spannhülse und Stromleitung

- ⑬ Lichtbogen
- ⑭ flüssiges Schweißgut
- ⑮ festes Schweißgut
- ⑯ Schutzgasmantel

Gestaltungslehre

Lichtbogenhandschweißen

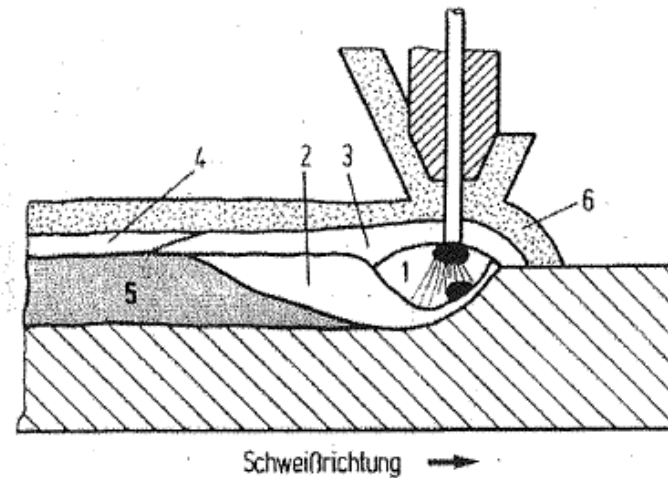
- Zündung des Lichtbogens durch Kurzschluss zwischen Stabelektrode und Werkstück
- Lichtbogen schmilzt die Elektrode ab und den Grundwerkstoff auf
- Das abschmelzende Umhüllungsmaterial (der Elektrode) bildet Schutzgas und eine flüssige, die Naht bedeckende Schlacke und liefert Legierungselemente für die Schweißnaht
- Haupteinsatz im Stahl- und Rohrleitungsbau und für Montageschweißungen



Gestaltungslehre

Unterpulverschweißen



- Lichtbogen brennt zwischen der abschmelzenden Draht- oder Band-Elektrode und dem Werkstück
- Lichtbogen und Schweißzone werden durch eine Pulverschicht bedeckt (unsichtbarer Lichtbogen)
- Das Schmelzbad wird durch die aus dem Pulver gebildete Schlacke vor der Atmosphäre geschützt
- Bevorzugt bei teil- & vollautomatisierten Anlagen für große Wandstärken
- Wirtschaftlich bei langen, geraden Nähten



- | | |
|------------------------------|--------------------------|
| 1 Kaverne | 4 feste Schlacke |
| 2 flüssige Schmelze (Metall) | 5 Schweißnaht, erstarrt |
| 3 flüssige Schlacke | 6 aufgeschüttetes Pulver |

Gestaltungslehre



Übersicht Schweißverfahren

Schweißverfahren	Kurzzeichen Kennzahl Bildzeichen	Mögliche Art der Fertigung ¹⁾	Prinzip	Erzeugnisbereich	Besonderheiten Hinweise
Gasschmelzschweißen (Gasschweißen)	G 31	<i>m</i> <i>t</i> <i>v</i> <i>a</i>	Das Schweißbad entsteht durch unmittelbares, örtlich begrenztes Einwirken einer Brenngas-Sauerstoff-Flamme; Wärme und Schweißzusatz werden getrennt zugeführt.	Dünobleche Rohrleitungen	Geringe Investitionskosten. Günstig für Zwangslagenschweißung und für beengte Schweißstellen (Zugänglichkeit). Niedrige Schweiß-eigenstressungen. Geeignet für Stumpf- und Ecknähte; ungeeignet für T-Stöße und ungleiche Blechdicken.
Lichtbogenhandschweißen	E 111 	<i>m</i> <i>t</i>	Der Lichtbogen brennt zwischen einer manuell zugeführten Stabelektrode (Schweißzusatz) und dem Werkstück. Lichtbogen und Schweißbad werden gegen die Atmosphäre nur durch Gase bzw. Schlacken abgeschirmt, die von der Elektrode stammen.	universell	Geeignet für alle Stoß- und Nahtarten.
Unterpulverschweißen	UP 12 	<i>t</i> <i>v</i> <i>a</i>	Ein oder mehrere Lichtbogen brennen unsichtbar zwischen einer bzw. mehreren abschmelzenden Elektroden und dem Werkstück. Lichtbogen und Schweißzone werden durch eine Pulverschicht abgedeckt. Die aus dem Pulver gebildete Schlacke schützt das Schweißbad vor der Atmosphäre.	Behälterbau Stahlbau Schiffbau Fahrzeugbau Maschinenbau	Hohe Abschmelzleistung, gute Nahtformung, hohe Röntgensicherheit. Für dicke Bleche und lange Nähte.

m = Handschweißen, *t* = teilmechanisches Schweißen, *v* = vollmechanisches Schweißen, *a* = automatisches Schweißen.

Gestaltungslehre

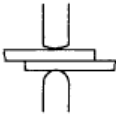
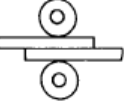
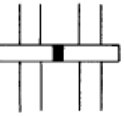
Übersicht Schweißverfahren

Schweißverfahren	Kurzzeichen Kennzahl Bildzeichen	Mögliche Art der Fertigung ¹⁾	Prinzip	Erzeugnisbereich	Besonderheiten Hinweise
Schutzgas- schweißen	SG		Der sichtbare Lichtbogen brennt in einem Schutzgasmantel.		
a) Metall- Inertgas- Schweißen	MIG 131 	<i>t</i> <i>v</i> <i>a</i>	Der Lichtbogen brennt sichtbar zwischen der abschmelzenden Elektrode und dem Werkstück. Als Schutzgase dienen inerte (reaktionsträge) Gase, z.B. Argon, Helium oder ihre Gemische.	Apparatebau Behälterbau Schiffbau Flugzeugbau	Für legierte Stähle, Al- und Cu-Legierungen. Alle Stoß- und Nahtarten und Schweißpositionen. Hohe Abschmelzleistung. Roboterschweißen.
b) Metall- Aktivgas- Schweißen	MAG 135	<i>t</i> <i>v</i> <i>a</i>	Wie MIG-Schweißen. Als Schutzgase dienen (chemisch) aktive Gase: CO ₂ und Mischgase.	Alle Industriezweige und metallverarbeitendes Handwerk.	Für un- und niedriglegierte Stähle. Hohe Abschmelzleistung. Dünnblech- und Wurzelschweißung. Roboterschweißen.
c) Wolfram- Inertgas- Schweißen	WIG 141 	<i>m</i> <i>t</i> <i>v</i> <i>a</i>	Der Lichtbogen brennt sichtbar zwischen der Wolfram-Elektrode und dem Werkstück. Der Schweißzusatz wird stromlos zugeführt. Als Schutzgase werden Edelgase (meist Argon) verwendet.	Apparatebau Behälterbau Kernreaktorbau Hausgeräte	Für nahezu alle metallischen Werkstoffe. Wurzelschweißen dicker Bleche. Geringe Abschmelzleistung. Alle Stoß- und Nahtarten und Schweißpositionen. Orbitalschweißen von Rohren.
Elektronen- strahl- schweißen	EB 76	<i>t</i> <i>v</i> <i>a</i>	Die Energie eines auf wenige zehntel mm Durchmesser gebündelten Elektronenstrahls wird in Wärme umgewandelt.	Tiefschweißen: Fahrzeugbau Maschinenbau Flugzeugbau Mikroschweißen: Elektronische Bauelemente Feinwerktechnik	Hohe Anlagekosten. Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe möglich. Mikroschweißung ausführbar. Fertig bearbeitete Werkstücke können verzugsfrei und ohne Nachbearbeitung zusammengeschweißt werden.

m = Handschweißen, *t* = teilmechanisches Schweißen, *v* = vollmechanisches Schweißen, *a* = automatisches Schweißen.

Gestaltungslehre

Übersicht Schweißverfahren

Schweißverfahren	Kurzzeichen Kennzahl Bildzeichen	Mögliche Art der Fertigung ¹⁾	Prinzip	Erzeugnisbereich	Besonderheiten Hinweise
(Widerstands-) Punkt-schweißen	RP 21 	<i>t</i> <i>v</i> <i>a</i>	Strom und Kraft werden durch Punktschweißelektroden übertragen. Die aufeinandergespresten Flächen der Werkstücke werden nach ausreichendem Erwärmen unter Druck punktförmig (linsenförmig!) geschweißt.	Blechverarbeitung: Fahrzeugbau Waggonbau Gerätebau Bauindustrie	Sehr wirtschaftliches Verfahren anstelle von Nietungen.
Rollennaht-schweißen	RR 22 	<i>t</i> <i>v</i> <i>a</i>	Strom und Kraft werden von beiden Werkstückseiten durch ein Rollenelektrodenpaar übertragen. Die Werkstücke werden an den Stoßflächen nach ausreichendem Erwärmen unter Druck geschweißt. Je nach Abstand der Schweißpunkte entsteht eine Rollen-Punktnaht oder Rollen-Dichtnaht.	Blechverarbeitung: Karosseriebau Waggonbau Behälterbau	Begrenzt auf einfach geformte Bauteile mit gleichen Punktabständen. Arbeitsgeschwindigkeit und Elektrodenstandzeit höher als beim Punktschweißen.
Abbrennstumpf-schweißen	RA 24 	<i>m</i> <i>t</i> <i>v</i> <i>a</i>	Strom und Kraft werden von Spannbacken übertragen. Die stromdurchflossenen Werkstücke werden unter leichtem Berühren erwärmt, wobei schmelzflüssiger Werkstoff herausgeschleudert wird (Abbrennen). Nach ausreichendem Erwärmen werden die Werkstücke durch schlagartiges Stauchen geschweißt.	Stumpfschweißen von Blechbändern zu Felgen und von Rundstählen zu Ketten. Stumpf- und Gehrungsschweißen von Flach- und Profilerzeugnissen. Maschinenbau: Achsen, Wellen, Schienen, Werkzeuge	Vorteilhaft zum Schweißen von Kompaktquerschnitten (z.B. Rundstahl) und Großoberflächenquerschnitten (z.B. Rohre) bis 100 000 mm ² (bei Stahl). Die Schweißstelle kann in der Maschine einer Wärmebehandlung (z.B. Vergüten) unterzogen werden.

m = Handschweißen, *t* = teilmechanisches Schweißen, *v* = vollmechanisches Schweißen, *a* = automatisches Schweißen.

Gestaltungslehre

Übersicht Schweißverfahren

Schweißverfahren	Kurzzeichen Kennzahl Bildzeichen	Mögliche Art der Fertigung ¹⁾	Prinzip	Erzeugnisbereich	Besonderheiten Hinweise
Reibschweißen	FR 42	<i>v</i> <i>a</i>	Die Werkstücke werden an den Stoßflächen durch Reiben erwärmt und unter Anwendung von Kraft geschweißt.	Automobilindustrie: Kardanwellen Ventilstößel Antriebsritzel Werkzeugindustrie: Anschäften von Bohrern, Reibahlen und Fräsern	Geeignet zum Verbinden unterschiedlicher Werkstoffe (z.B. GJL-St, Cu-St, Al-St). Mindestens ein Fügeteil muss rotations-symmetrisch sein.
Lichtbogenbolzenschweißen (mit Hub-, Spitzen- oder Ringzündung)	B (BH, BS, BR) 781	<i>m</i> <i>t</i> <i>v</i> <i>a</i>	Die Werkstücke, von denen eines ein Bolzen oder bolzenförmig ist, werden nach Anschmelzen der Stoßflächen durch den Lichtbogen unter Anwendung von Kraft ohne Schweißzusatz geschweißt. Die verschiedenen Verfahren unterscheiden sich besonders durch den Zündvorgang.	Fassadenbau Stahlverbundbau Stahlbetonbau Maschinenbau Kesselbau Rohrleitungsbau	Bolzenförmige Teile mit rundem, ovalem, quadratischem und rechteckigem Querschnitt lassen sich vollflächig in sehr kurzer Zeit hochwertig verschweißen. Die Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe ist möglich.

m = Handschweißen, *t* = teilmechanisches Schweißen, *v* = vollmechanisches Schweißen, *a* = automatisches Schweißen.

Gestaltungslehre

Auswahl des geeigneten Schweißverfahrens

Werkstoff		C-Stahl						Legierter Stahl						GS			GJMW	GJL	GJS	GJMB	Al und Al-Legierung						Cu und Cu-Legierung						
Dickenbereich ¹⁾		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	4	5	6	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	
Gasschweißen																																	
Lichtbogenschweißen	Elektrode	blank																															
		umhüllt ohne B ²⁾																															
		umhüllt B																															
	Schutzgas	UP																															
		MIG																															
		MAG																															
WIG																																	
Elektronenstrahl																																	
Widerstandsschweißen	Punkt-																																
	Rollen-																																
	Abbrenn-																																

• nur Cu-Legierungen

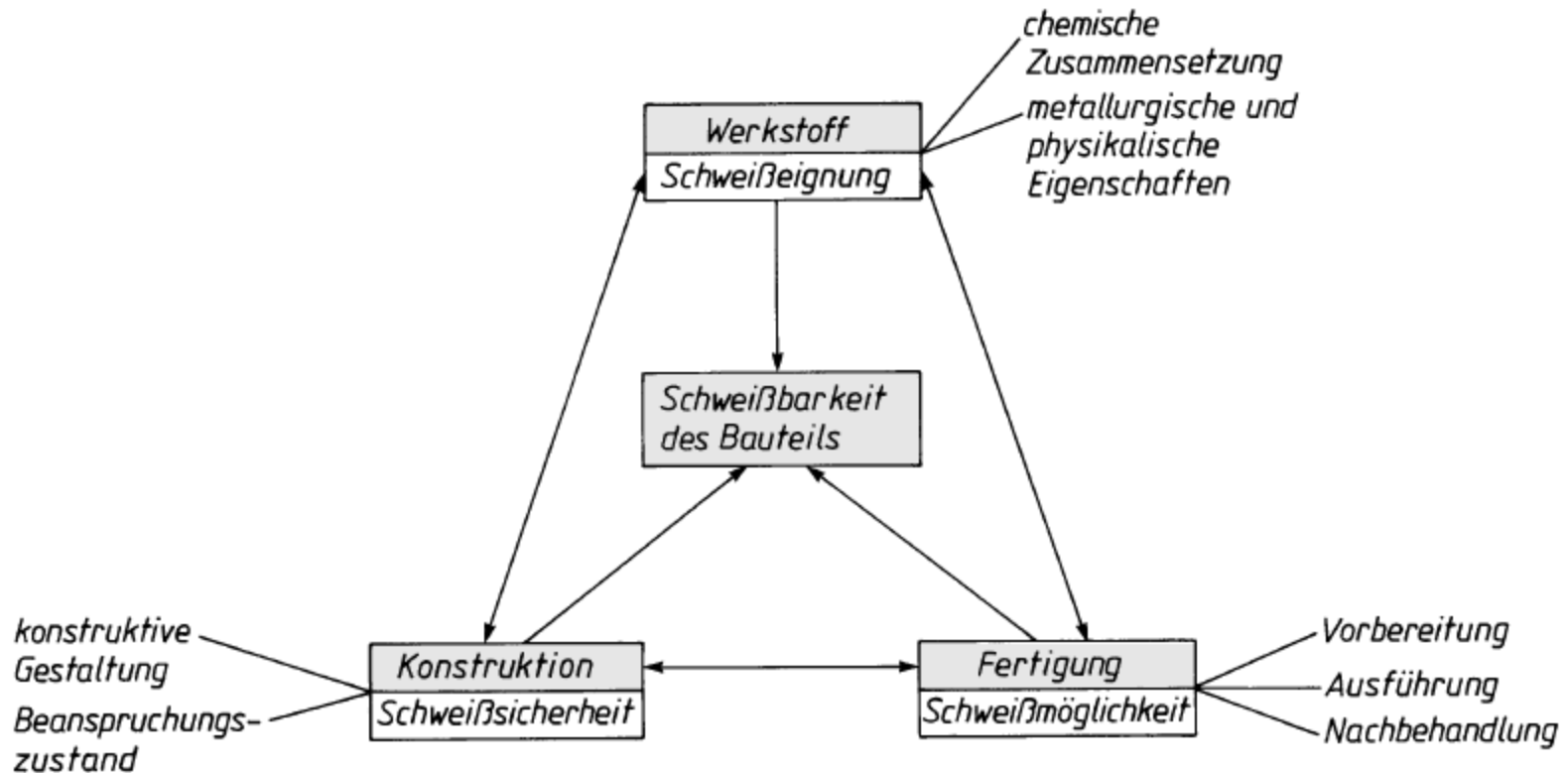
¹⁾ Dickenbereich: 1: ≤ 1 mm, 2: >1...3 mm, 3: >3...6 mm, 4: >6...15 mm, 5: >15...40 mm, 6: >40 mm.

²⁾ Typ B: basisch-umhüllte Elektrode, geeignet für dicke Bauteile & für schweißempfindliche Stähle

GS .. Stahlguss, GJMW / GJMB .. Temperguss – Weiß / Schwarz, GJL / GJS .. Gusseisen mit Lamellengraphit / Kugelgraphit

Gestaltungslehre

Einfluss auf die Schweißbarkeit eines Bauteils



Gestaltungslehre

Gestaltung von Schweißkonstruktionen

Vorteile von Schweiß- gegenüber Gusskonstruktionen:

- Einsatz von Halbzeugen wie Bleche und Profile
- Einsatz dünner Wandstärken zugunsten geringem Gesamtgewicht
- Wirtschaftliche Leichtbauweise
- Prompte Fertigung ohne Modell- und Formenkosten (Einzelteil-, Kleinserienfertigung)
- Kürzere Lieferzeiten (Einzelteilverfertigung)
- Im Grunde uneingeschränkte Bauteilgröße

Nachteile von Schweiß- gegenüber Gusskonstruktionen:

- Eigenspannungen und Verzug durch die Wärmeeinflusszone (evtl. Glühen erforderlich)
- Schweißnahtgefüge weicht vom Grundgefüge ab
- Zugänglichkeit zum Herstellen der Schweißnaht muss gegeben sein
- Gewisse eingeschränktere Formenfreiheit (z.B. bei Querschnittsübergängen etc.)
- Keine Schwingungsdämpfung und Notlaufeigenschaften wie GG (eingelagerter Graphit)

Gestaltungslehre

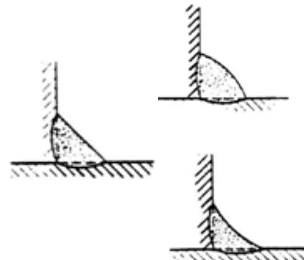
Gestaltung von Schweißkonstruktionen

Stoßarten von Schweißverbindungen:

- Stumpfstoß
- T-Stoß
- Eckstoß
- Überlappungsstoß

Bei T-Stößen unterscheidet man:

- Wölbnaht
- Flachnaht
- Hohlnaht



Stumpfstoß



T-Stoß



Eckstoß



Überlappungsstoß

Gestaltungslehre

Gestaltung von Schweißkonstruktionen

Nahtformen von Schweißverbindungen:

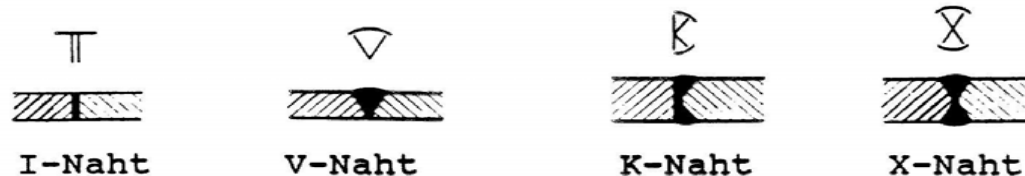
- Die Nahtart einer Schweißverbindung wird durch die Lage der Teile am Schweißstoß sowie durch Art und Umfang der Nahtvorbereitung bestimmt.

Man unterscheidet:

- Stumpfnähte:
Schweißnahtvorbereitung je nach Naht notwendig
- Kehlnähte:
Oft keine zusätzliche Schweißnahtvorbereitung notwendig

Stumpfnähte:

- Stärker belastbar als Kehlnähte aufgrund des geradlinigen Kraftflusses ohne Umlenkung
- Teurer bzw. aufwendiger aufgrund der Schweißnahtvorbereitung



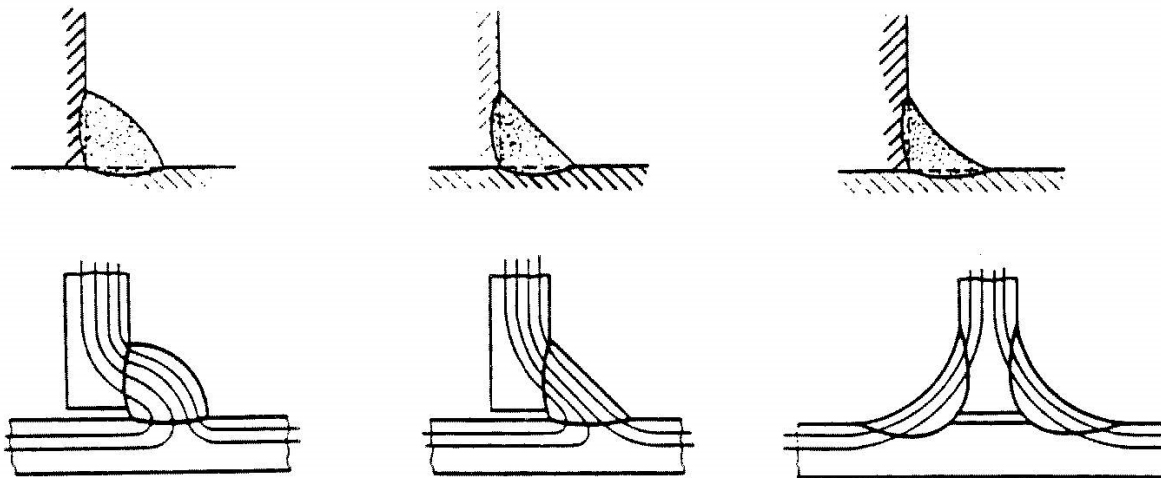
Zunahme der Festigkeitswerte →

Gestaltungslehre

Gestaltung von Schweißkonstruktionen

Kehlnähte:

➤ Der Kraftlinienverlauf ist bei der Ausführung als Hohlnaht am günstigsten



Wölbnaht

Flachnaht

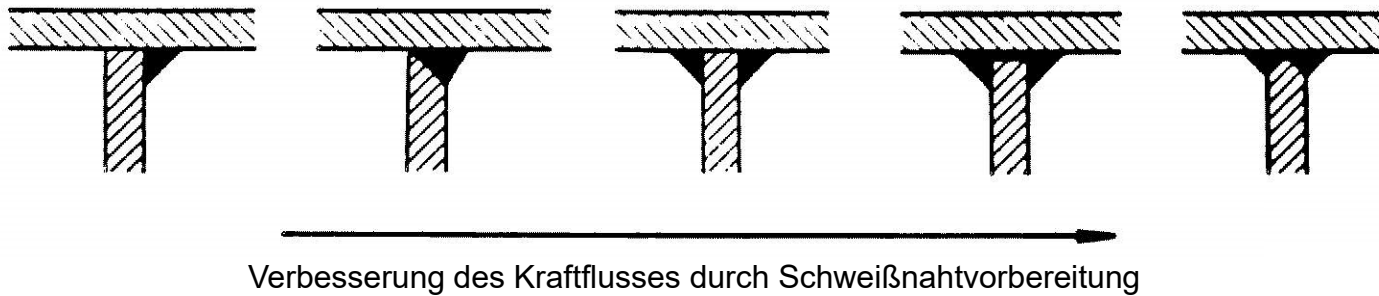
Hohlnaht

—————▶
Verbesserung von Nahtform und Kraftfluss

Gestaltungslehre

Gestaltung von Schweißkonstruktionen

Kehlnähte:



Gestaltungslehre

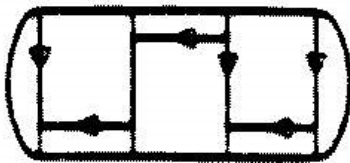
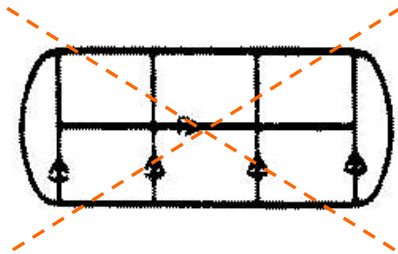
Gestaltung von Schweißkonstruktionen

- Anzahl und Länge der Schweißnähte gering halten
- Nahtkreuzungen und Nahtanhäufungen vermeiden (Eigenspannungen)
- Geringe Nahtquerschnitte anstreben (Verzug, Kosten)
- Schweißstellen in gering beanspruchten Zonen vorsehen
- Kraftflussgerechte Schweißverbindung (sprunghafte Querschnittsänderungen vermeiden)
- Auf günstige Lage für Zugänglichkeit zur Schweißnaht achten
- Biegebeanspruchungen von Schweißnähten vermeiden
- Dynamische Belastungen von Schweißnähten vermeiden
- Bei größerer Wandstärke vorwärmen der Bauteile (ebenso bei höherlegierten Stählen)

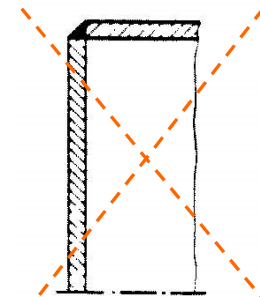
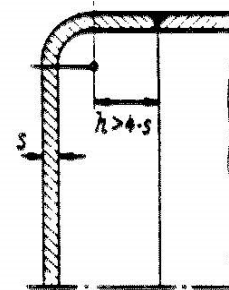
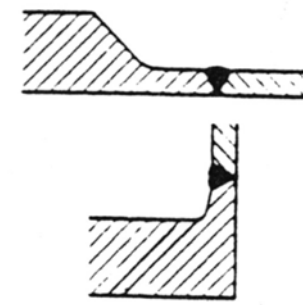
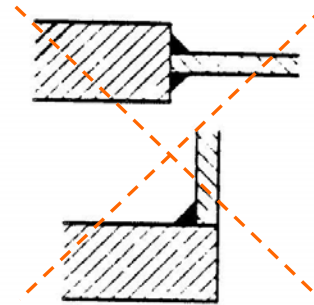
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Schweißkonstruktionen

➤ Vermeiden von Nahtanhäufungen
und Kreuzungen



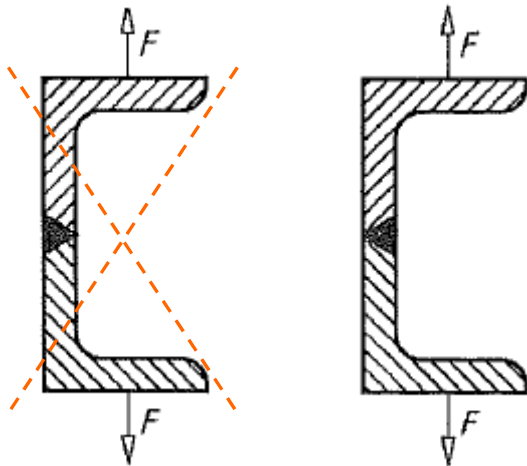
➤ Auf den Kraftfluss achten



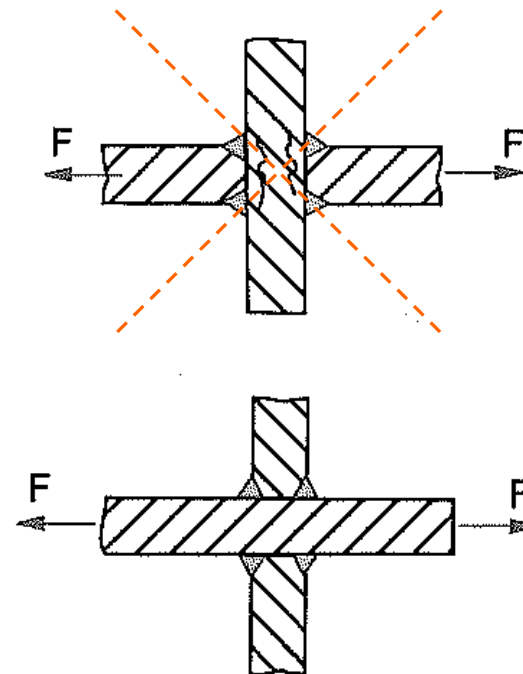
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Schweißkonstruktionen

- Nahtwurzel nicht im Zugbereich
(z.B. bei Biegebeanspruchung)



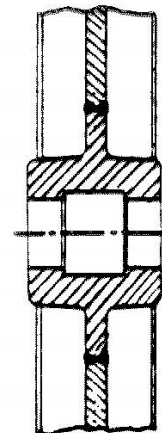
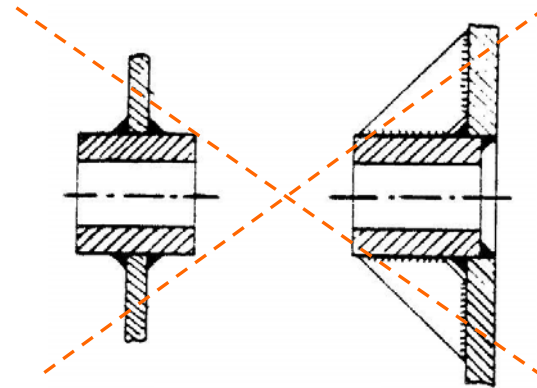
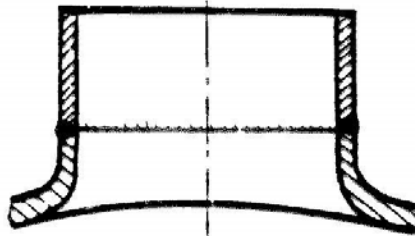
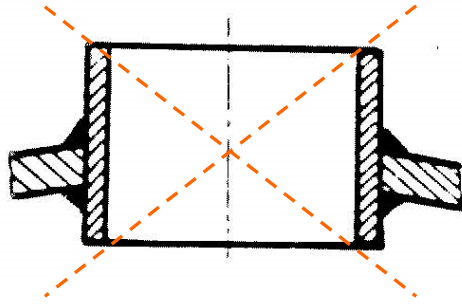
- Zugbeanspruchung geschweißter Bleche
in Dickenrichtung vermeiden



Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Schweißkonstruktionen

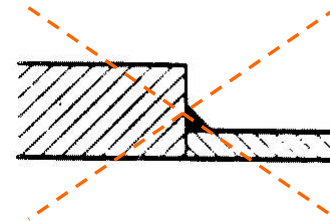
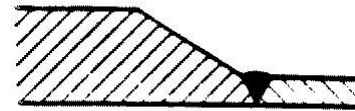
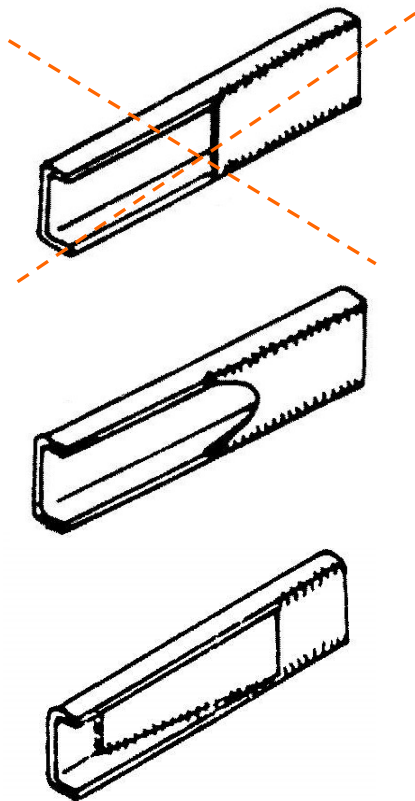
➤ Auf den Kraftfluss achten



Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Schweißkonstruktionen

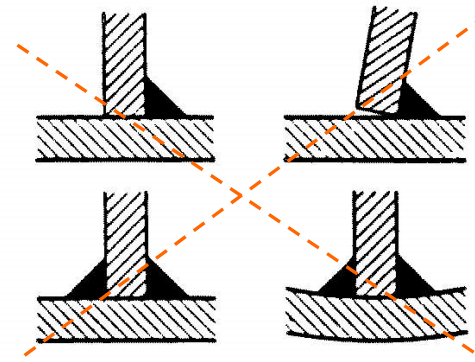
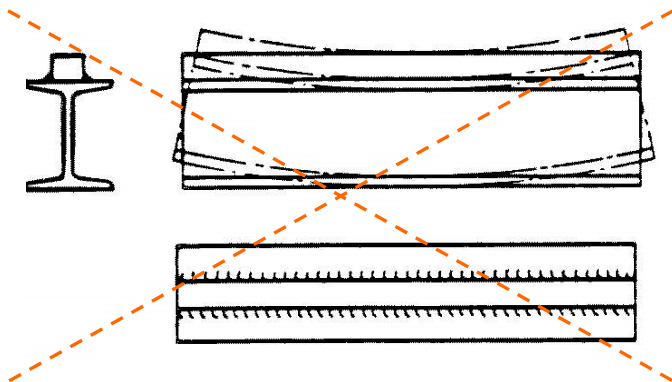
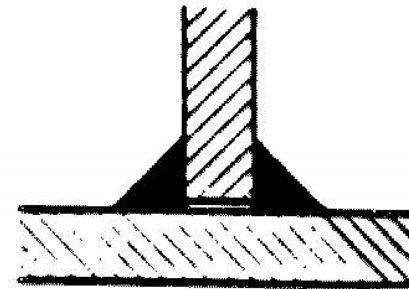
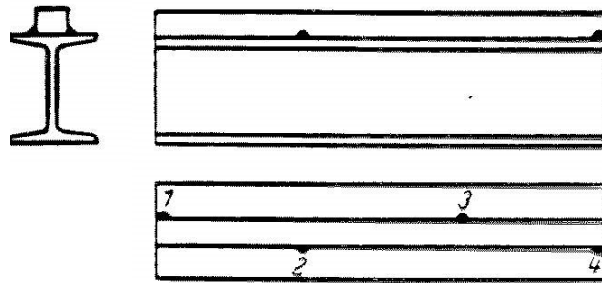
➤ Auf den Kraftfluss achten



Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Schweißkonstruktionen

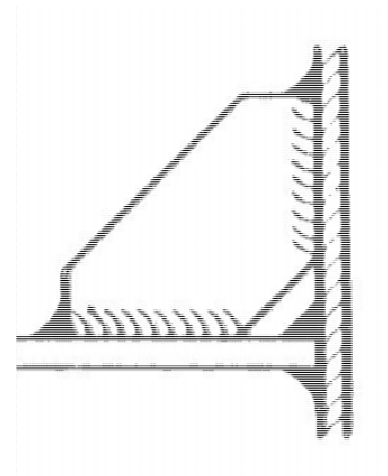
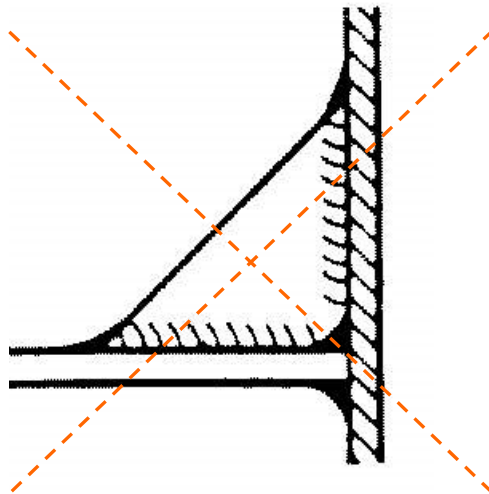
➤ Auf Verzug des Bauteils achten



Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Schweißkonstruktionen

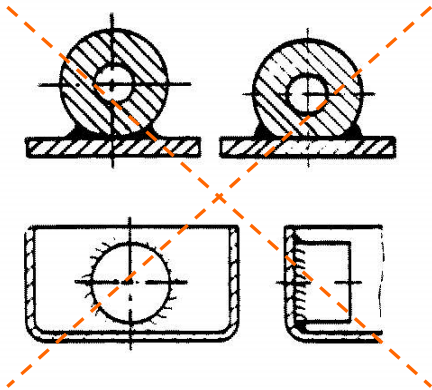
- Gestalten ohne Nahtanhäufungen,
korrekte Rippengestaltung



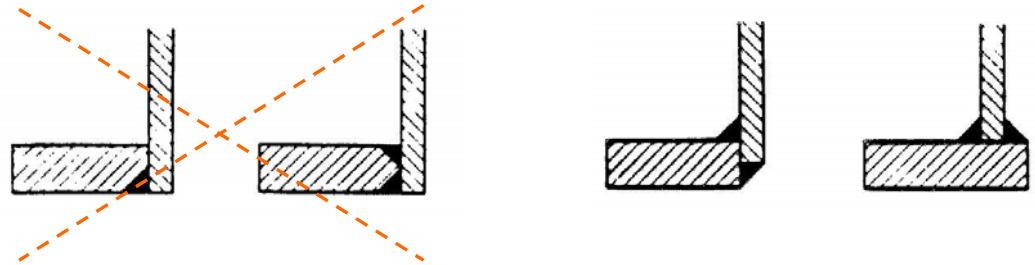
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Schweißkonstruktionen

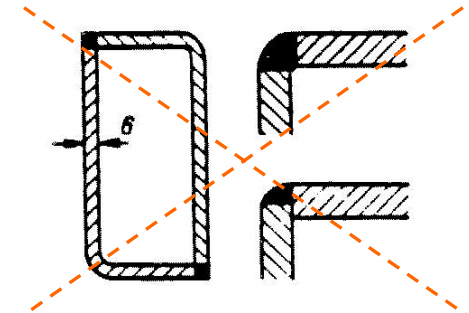
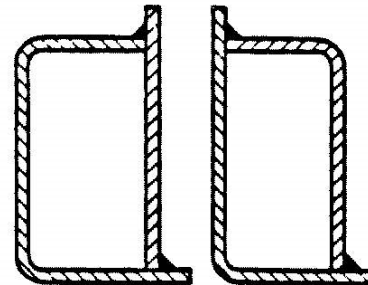
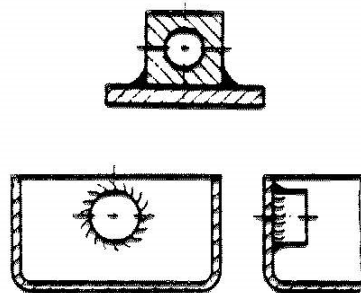
➤ Auf gute Zugänglichkeit achten



➤ Minimierung der Schweißnahtvorbereitung (wenn möglich)



➤ Auf günstige Montage der Schweißbaugruppe achten



Gestaltungslehre

Ergänzend zum Konstruieren von Schweißkonstruktionen

- Auf gute Zusammenstellbarkeit der Schweißbaugruppe achten
 - Anschlag- und Steck-Systeme zum eindeutigen Ausrichten von Komponenten
 - Heftstellen einplanen (z.B. Heft-Bohrungen im Grundblech eines T-Stoßes)
- Einsparen von Schweißnähten
 - durch Biegen anstelle von Schweißen (bzw. Biegen und Schweißen kombinieren)
 - durch Verwendung von Profilen (U-, I- L-Profile, Kantbleche ...)
- Darauf achten, dass Schweißnähte keine Kollisionen mit Bauteilen verursachen (Volumen der Schweißnähte berücksichtigen – speziell bei Kehlnähten)
- Entstehende Spalte oder enge Hohlstellen „hinter“ Schweißnähten berücksichtigen
 - speziell hinsichtlich Kapillareffekt: unverzinkte Bereiche beim Feuerverzinken, Korrosion ...
 - Abhilfe durch Dichtschweißen dieser Bereiche
- Bei feuerverzinkten Konstruktionen (wie auch bei erforderlicher Entwässerung) in Hohlstellen und in toten Ecken Ablaufbohrungen vorsehen

Gestaltungslehre

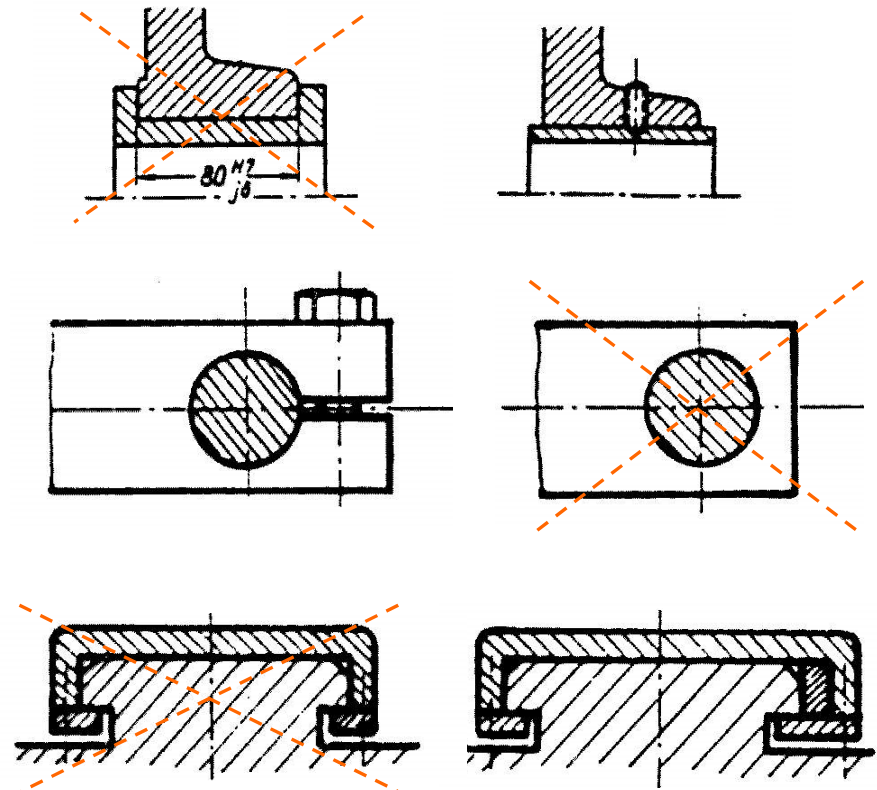
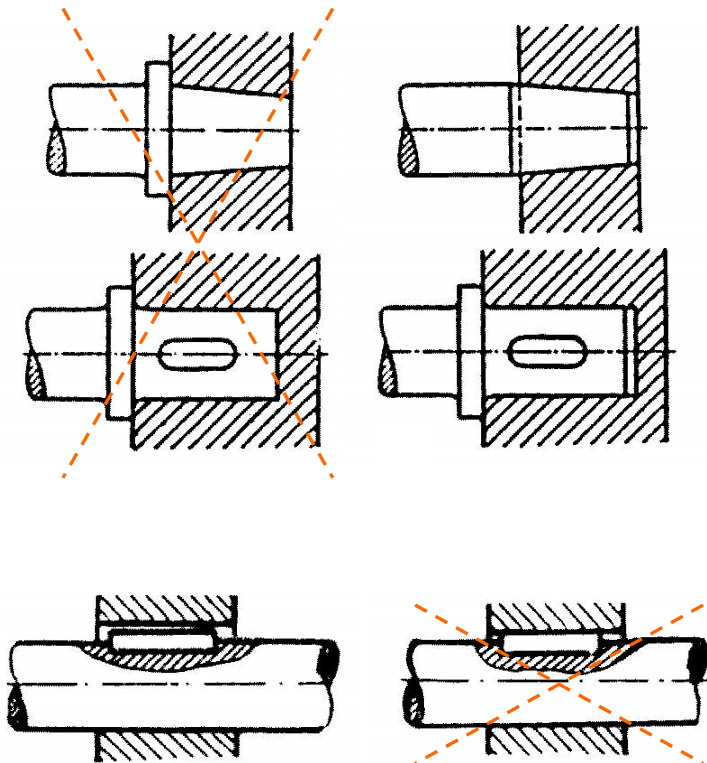
Zusammenbau (Montage)

Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien für Baugruppen

➤ Keine Doppelpassungen

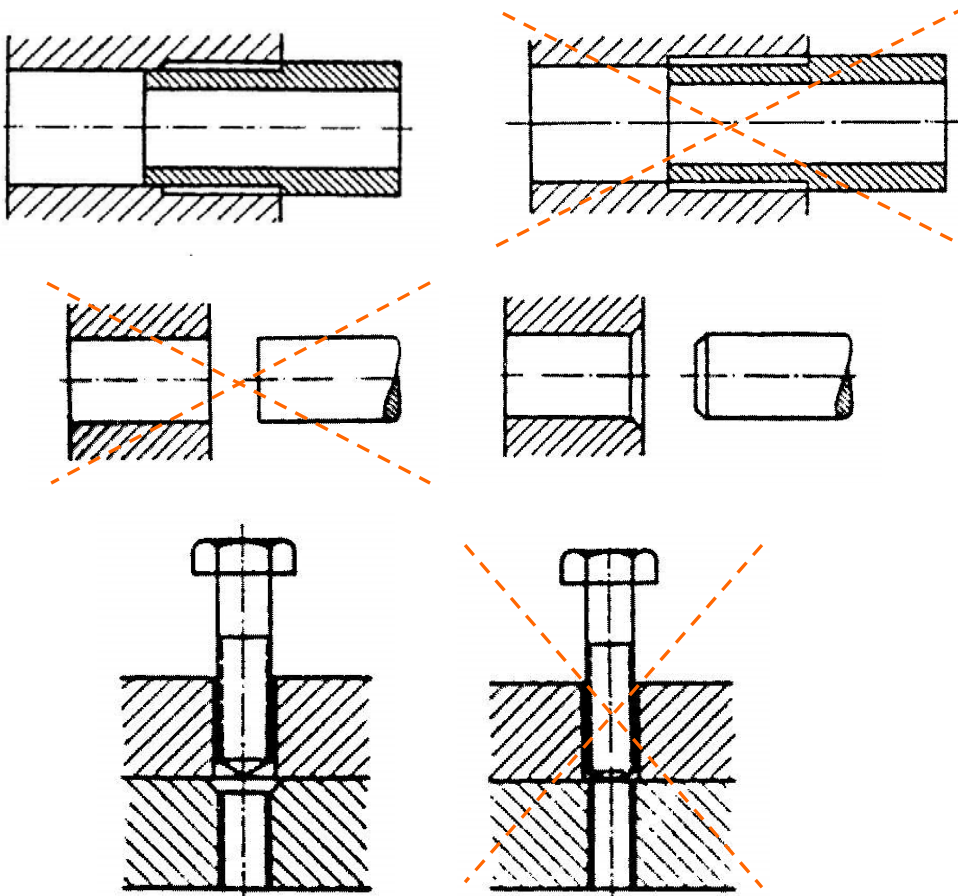
➤ Weniger und einfachere Passungen



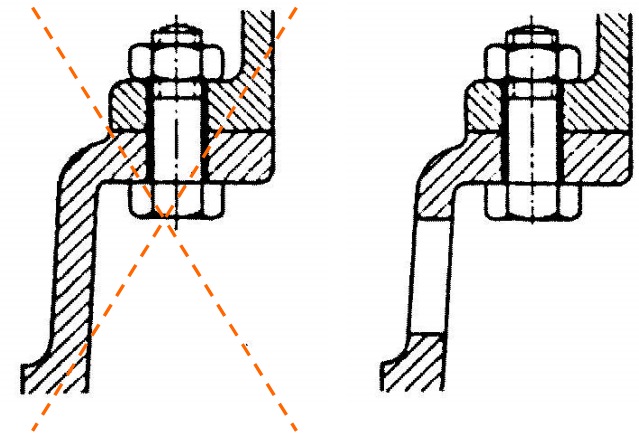
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien für Baugruppen

➤ Montageerleichterung



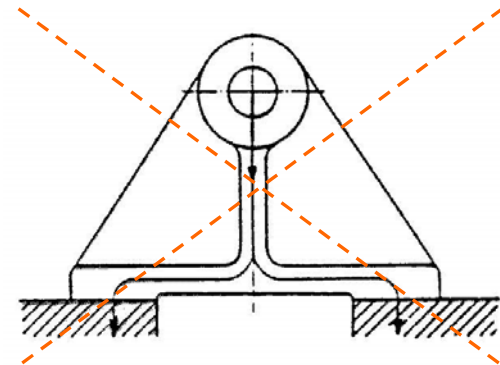
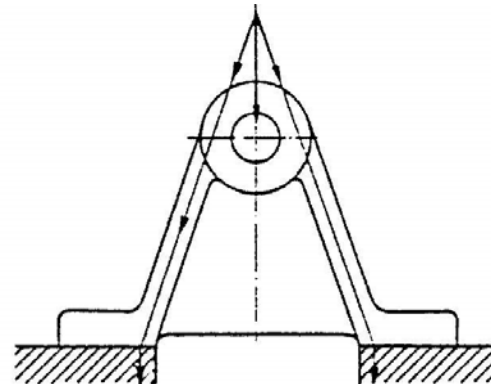
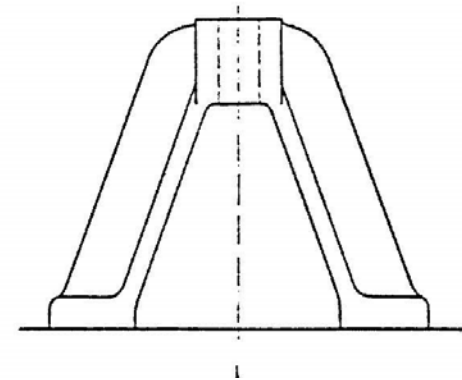
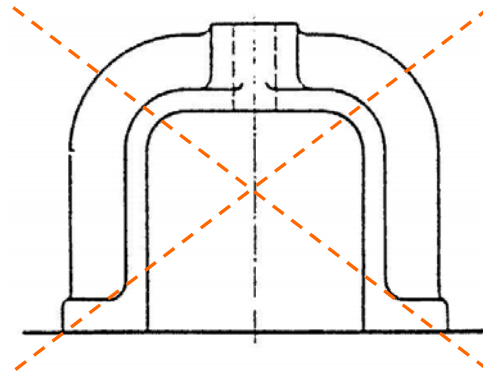
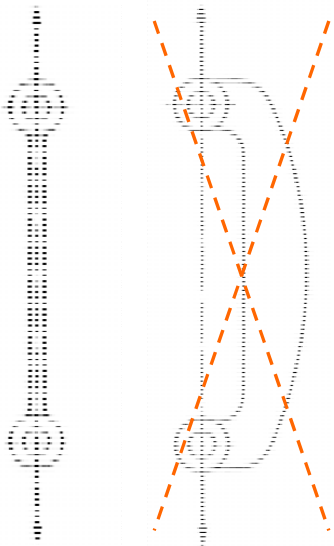
➤ Montagemöglichkeit & Montagefreundlichkeit



Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien für Baugruppen

➤ Krafftflussgerechte Baugruppengestaltung



Gestaltungslehre

Ergänzend zum Konstruieren von Baugruppen

➤ Wiederverwenden von Bauteilen

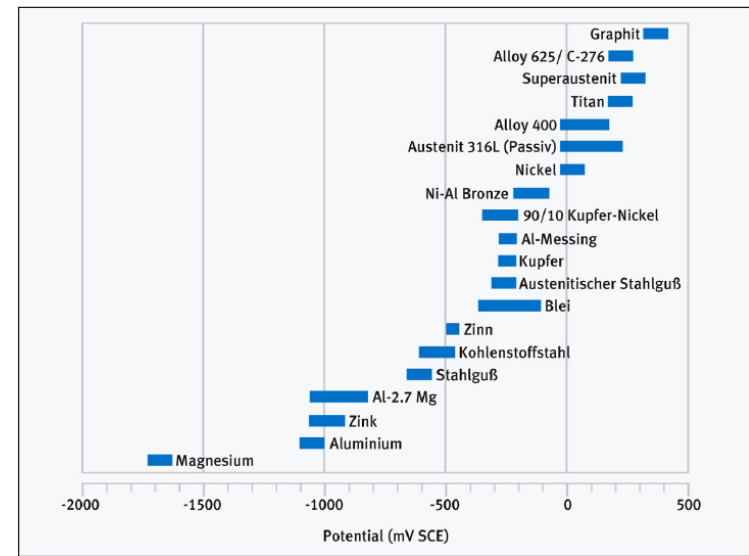
- geometrisch ähnliche Bauteile vereinheitlichen (z.B. einheitliche Schrauben, Rippen ...)
- Bauteile für multiple Verwendung (z.B. Bleche mit Bohrmuster für mehrere Einbaufälle ...)

➤ Werkstoffpaarung berücksichtigen

- Kontaktkorrosion (Abstand in der elektrochemischen Spannungsreihe)
- Umgebungsmedium mitberücksichtigen
- Unterschiedliche Längendehnungen

➤ Mögliche Überschneidungen von Bauteilen analysieren

- während der Montage → Montagevorgang durchgehen
- während dem Betrieb → sämtliche Zustände / Zustandsänderungen im Betrieb durchgehen
- Abhilfe gegen kritische Überschneidungen durch Umgestaltung beteiligter Bauteile (Ausbrüche, Anschläge, Abdeckungen ...)



Elektrochemische Spannungsreihe in Meerwasser bei 10°C

Gestaltungslehre

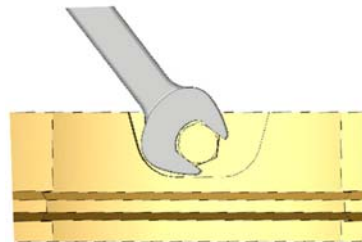
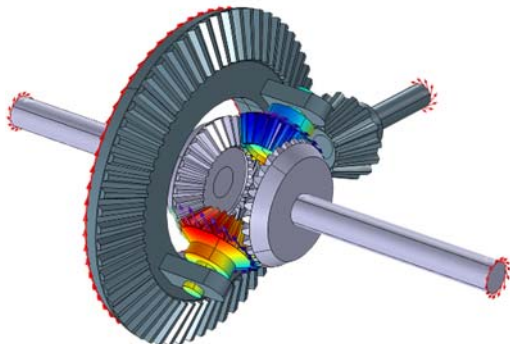
Softwareunterstützung für Baugruppenkonstruktionen

CAD – Montage- und Durchdringungsanalyse:

- Gewicht und Schwerpunkt von Komponenten (z.B. zum Heben von Komponenten)
- Überschneidungen (z.B. von Schrauben mit Abdeckblechen ...)

MKS – Bewegungsanalyse:

- Kinematische Verhältnisse (Positionen ...)
- Dynamische Verhältnisse (Belastungen ...)



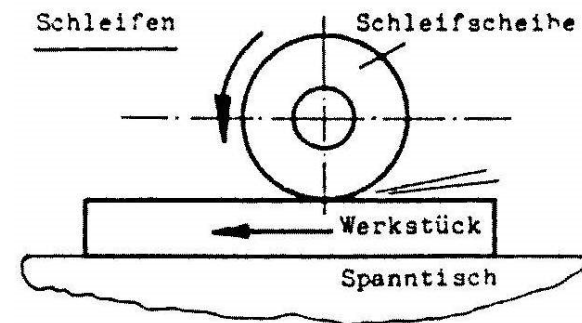
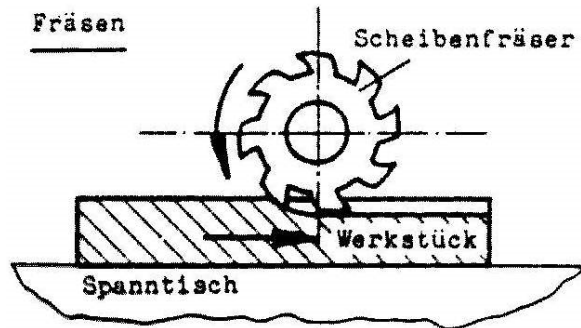
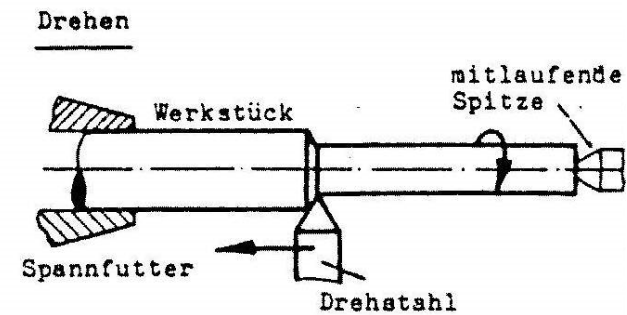
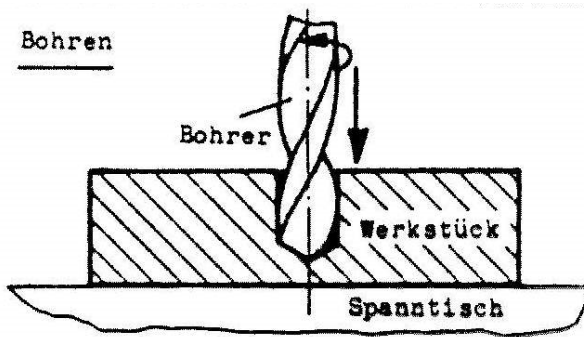
CAD ... Computer-Aided Design
MKS ... MehrKörperSimulation

Gestaltungslehre

Spanende Bearbeitung

Gestaltungslehre

Spanende Bearbeitungsverfahren



Gestaltungslehre

Grundlegende Gestaltung spanend bearbeiteter Bauteile

Wirtschaftlich

Bearbeitungsgerecht

Montagegerecht

➤ Wirtschaftlich

- Geforderte Genauigkeit (Toleranzen, Passungen, Oberflächen ...)
 - nicht ungenauer als mindestens erforderlich
 - nicht genauer als höchstens benötigt
- Verfahrenorientierte Gestaltung
 - nach verfügbaren Herstellungsverfahren
 - nach Kosten im Bezug zu Stück
- Zeit (benötigt zur Fertigung/Montage/Inbetriebnahme ...)

Gestaltungslehre

Grundlegende Gestaltung spanend bearbeiteter Bauteile

➤ Bearbeitungsgerecht

- Bearbeitungsmöglichkeit
(Zugänglichkeit, Spannmöglichkeit, Bearbeitbarkeit des Werkstoffes...)
- Verfügbare Maschinen, Werkzeuge und Personal (Know-How)
zur Realisierung der Bearbeitung

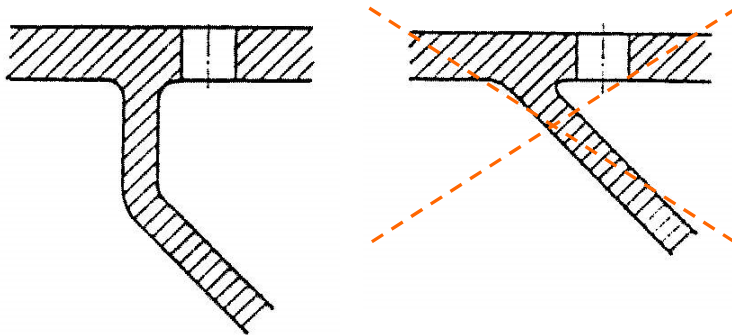
➤ Montagegerecht

- Möglichkeit zum Heben und Positionieren einzelner Komponenten
(Mehrteilige Bauteile, Hubösen, Trägerkonstruktionen, Gewinde für Ringmuttern ...)
- Hilfen zum Ausrichten der Teile zueinander (Zentrierstifte, Anschlagkanten ...)
- Geeignete Wahl der Verfahren zum Verbinden der Komponenten
(Schweißen, Kleben, Einpressen, Schrauben ...)
- Doppelpassungen vermeiden
- Konstruktive Lösungen zum Einstellen und Justieren vorsehen
(Einstellschrauben, Distanzscheiben, Futter- bzw. Kambleche ...)
- Folgeeffekte bei in Serie angeordneter toleranzbehafteter Einzelteile berücksichtigen

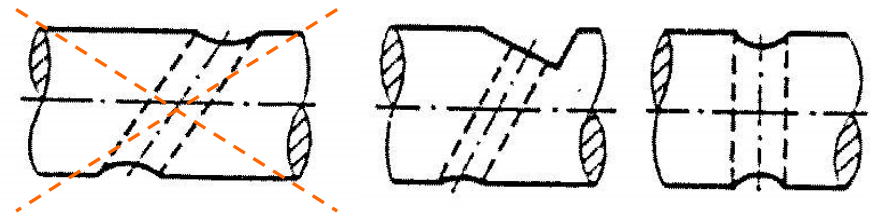
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien – Bohren

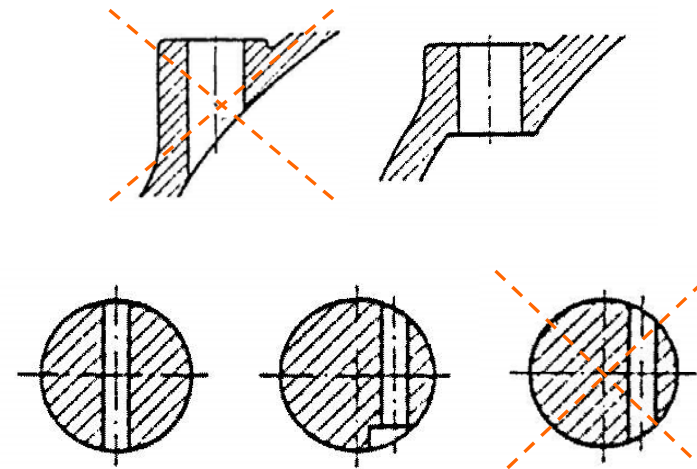
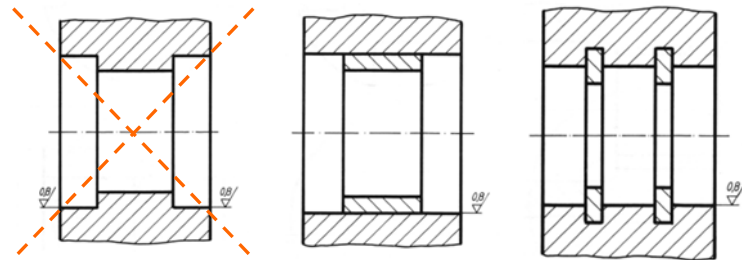
➤ Werkzeugauslauf



➤ Schräge Bohrflächen vermeiden



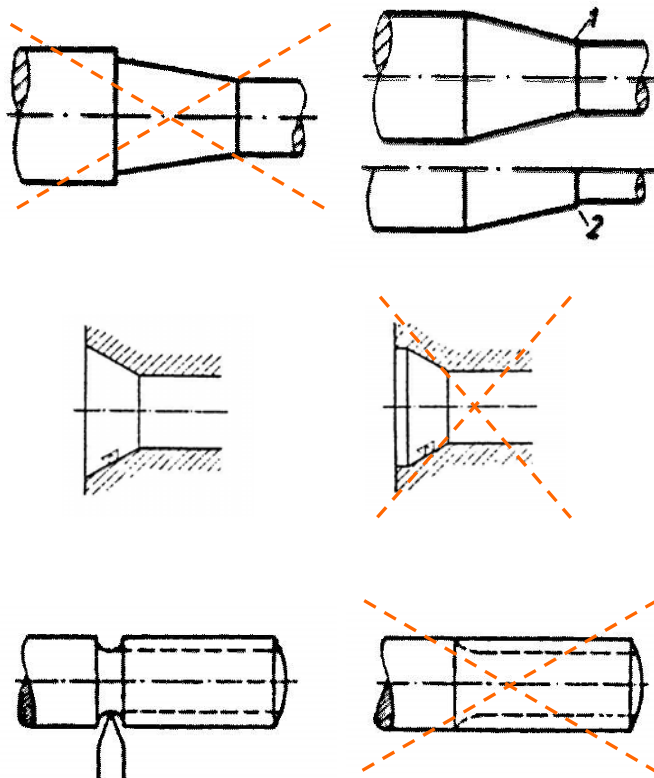
➤ Einfache Bearbeitbarkeit / Günstiger Materialeinsatz



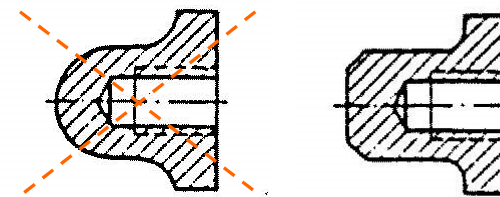
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien – Drehen

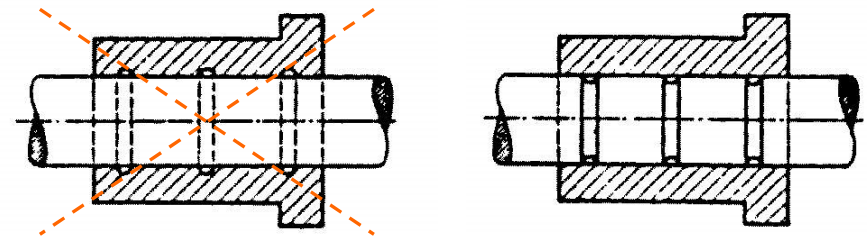
➤ Werkzeugauslauf



➤ Einfache Formen



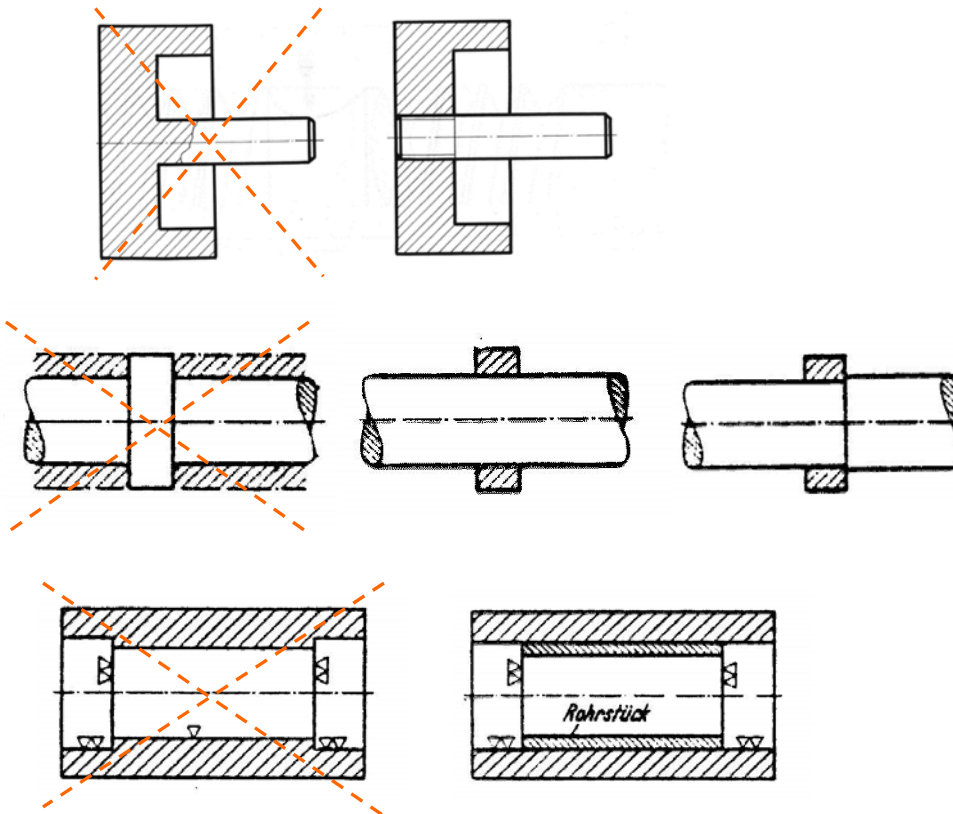
➤ Einfache Bearbeitbarkeit



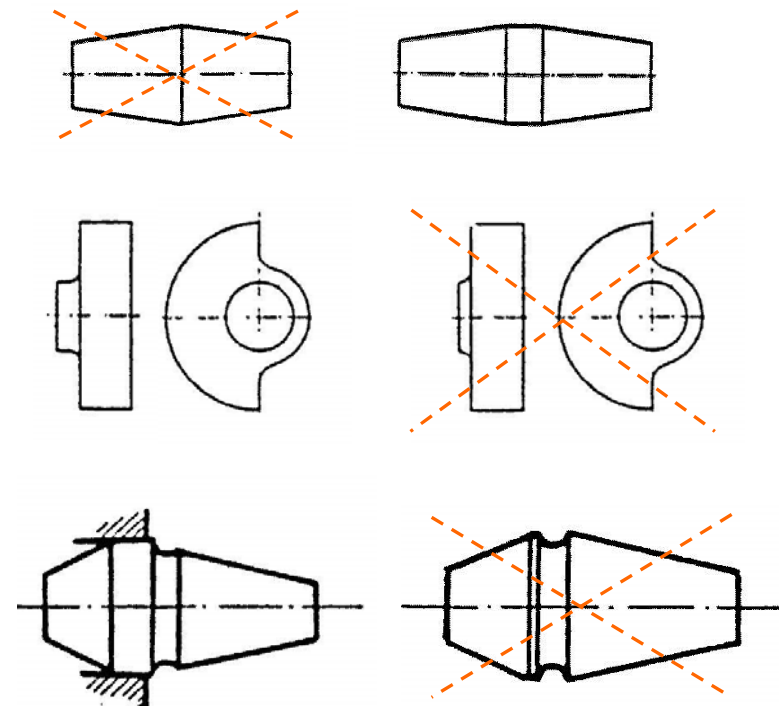
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien – Drehen

➤ Einfache Bearbeitbarkeit / Günstiger Materialeinsatz



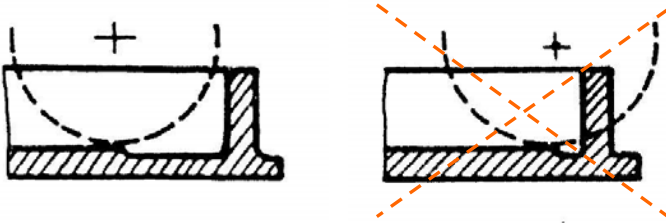
➤ Spannmöglichkeit



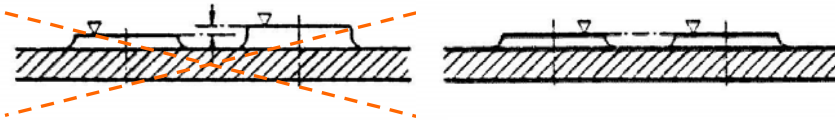
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien – Fräsen

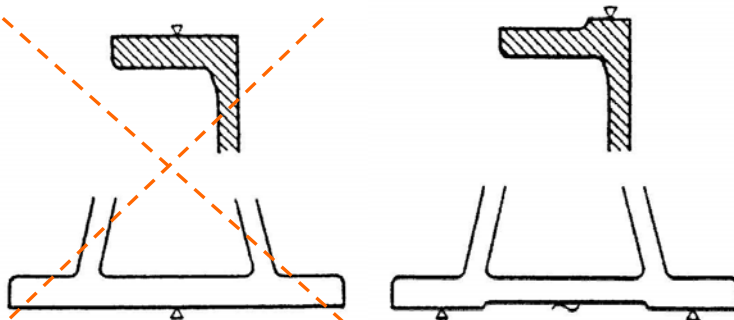
➤ Werkzeugauslauf



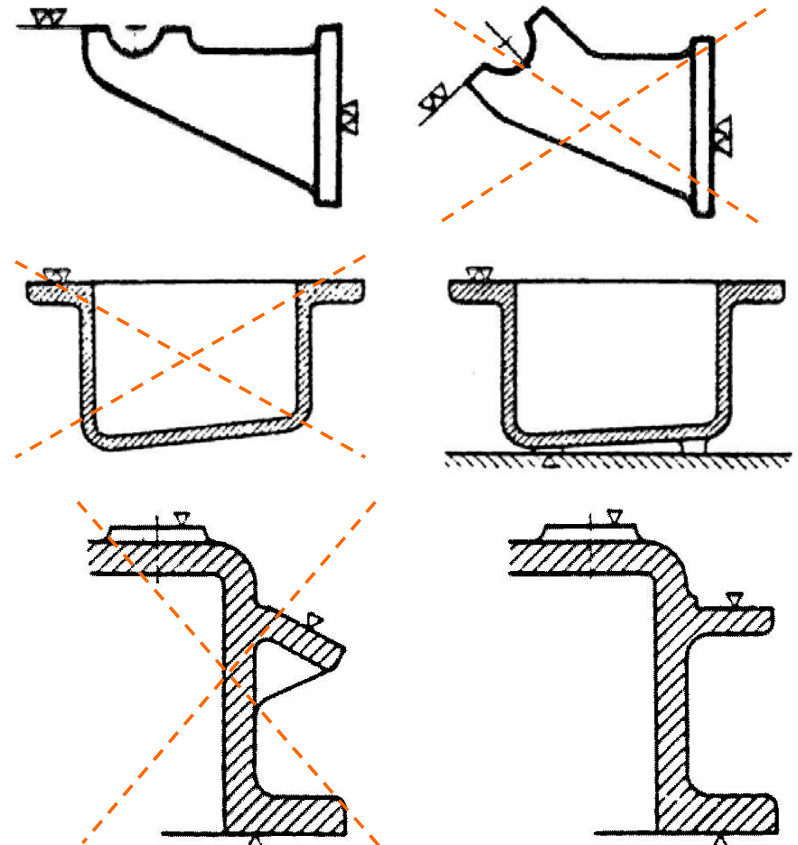
➤ Einfache Bearbeitbarkeit durch ebene Flächen



➤ Bearbeitungsaufwand reduzieren



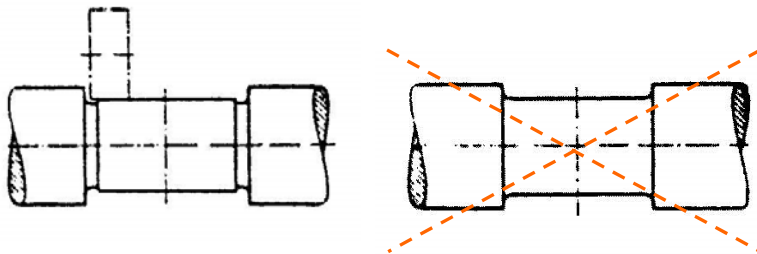
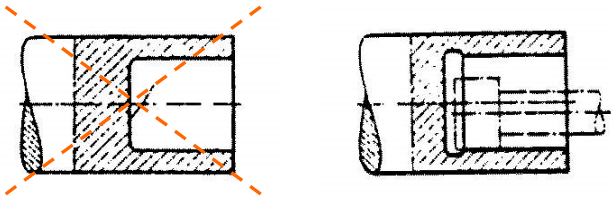
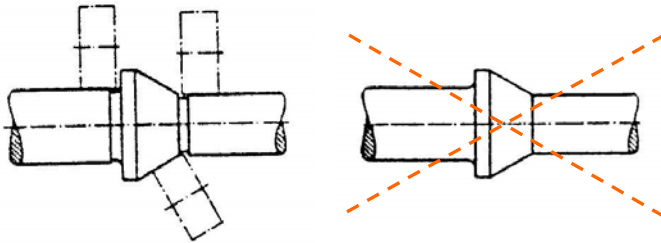
➤ Einfache Bearbeitbarkeit durch Rechtwinkligkeit



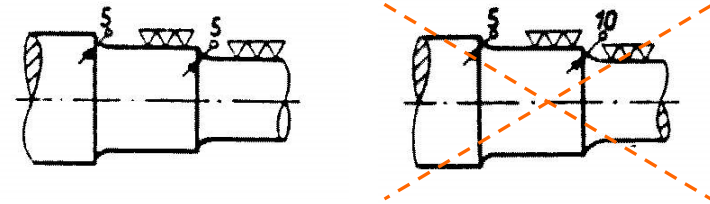
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien – Schleifen

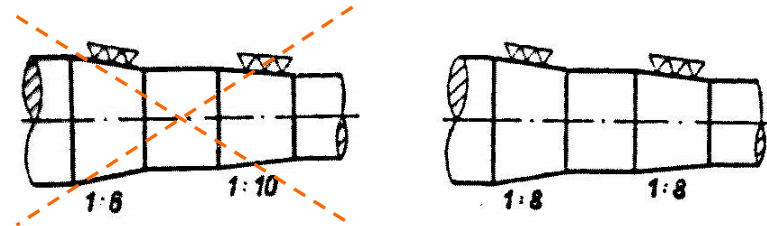
➤ Werkzeugauslauf



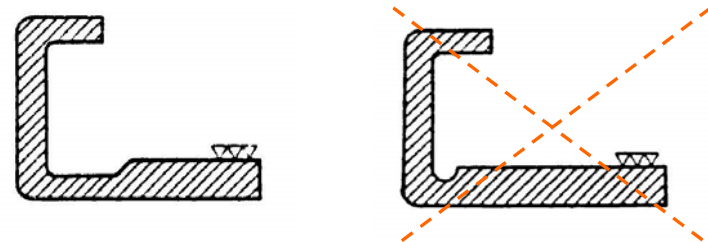
➤ Werkzeugwechsel reduzieren



➤ Umrichtarbeiten reduzieren



➤ Zugänglichkeit



Gestaltungslehre

Ergänzend zum Konstruieren von spanend bearbeiteten Bauteilen

- Einfache und übliche Bearbeitungen bevorzugen
 - Übliche Verfahren und Abmessungen verwenden
(z.B. Bohren gängiger Durchmesser – 20 mm anstelle von 19 mm ...)
 - Verwendung einheitliche Werkzeuge anstreben um Umrüstarbeiten zu reduzieren
(z.B. einheitliche Bohrungsdurchmesser ...)
- Umspannen des Werkstückes durch günstige Spannmöglichkeit vermeiden
- Fein bearbeitete Oberflächen nur wo erforderlich

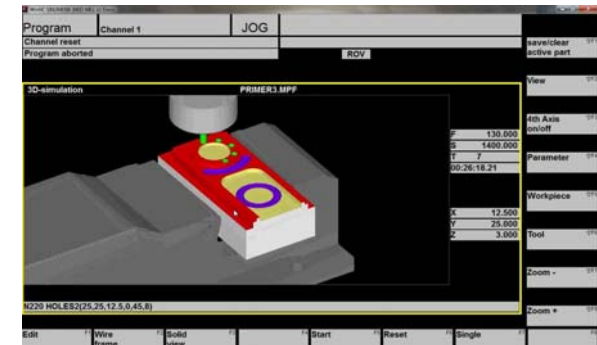
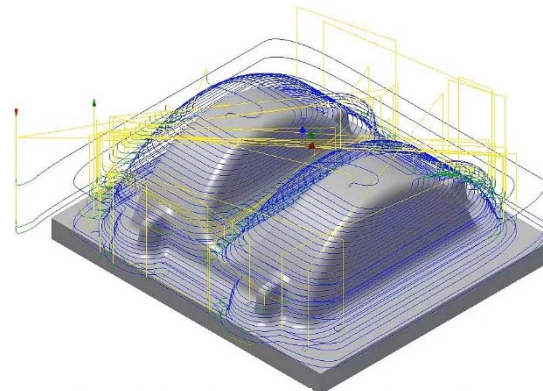
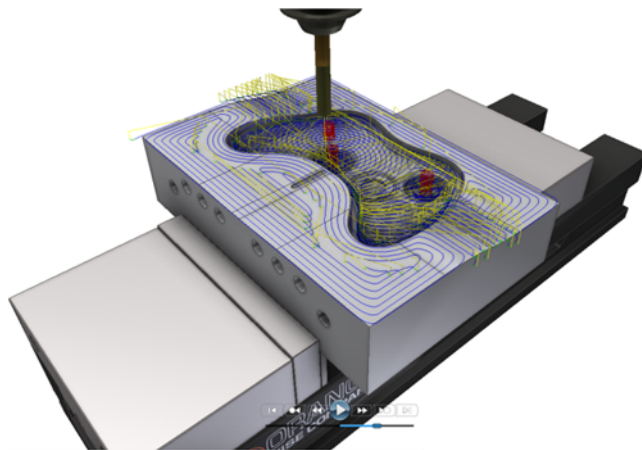
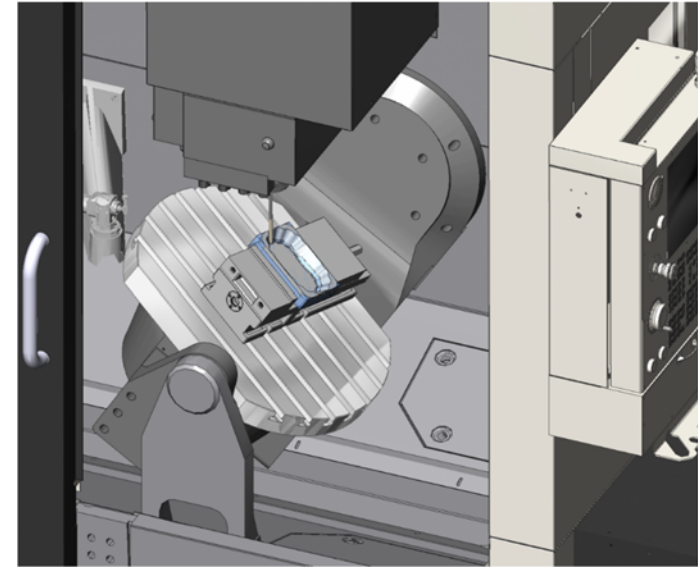


Gestaltungslehre

Softwareunterstützung für spanende Bearbeitung

CAM / CNC:

- Vom CAD-Modell zum CNC-Code
- Simulation des Zerspanungsprozesses
 - Fertigungszeiten
 - Crash-Analyse (Werkzeug-/Schaft-Kollision)
 - Oberflächen und Abweichungen



CAM ... Computer-Aided Manufacturing
 CNC ... Computerized Numerical Control

Gestaltungslehre

Schnitt- und Stanzteile

Gestaltungslehre

Schneiden und Stanzen

- Typischerweise zur Herstellung einer 2D-Geometrie (Blecbearbeitung)
- Spanloses Trennen (Werkstoff wird z.B. abgeschert oder thermisch getrennt ...)
- Verfahren zur Herstellung der Geometrie:
 - Abscheren
 - Profilstanzen
 - Nibbeln (Knabberschneiden)
 - Autogenschneiden, Plasmaschneiden
 - Laserschneiden
 - Wasserstrahlschneiden ...
- Unterscheidung zwischen:
 - Abschneiden
 - Ausschneiden
 - Einschneiden ...
- Nachfolgend oft Blechumformung (3D-Geometrie): Biegen, Tiefziehen, Bördeln, Falzen ...

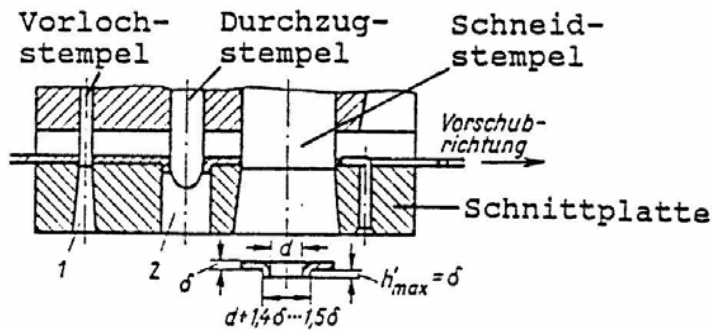


Gestaltungslehre

Schneiden

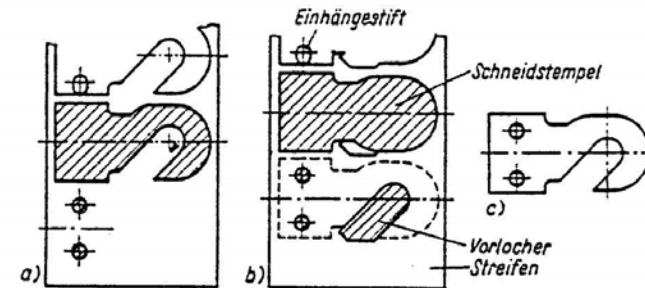
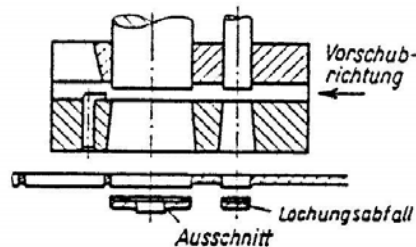
– Unterscheidung zwischen Folgeschnitt und Gesamtschnitt

➤ Folgeschnitt:



Durchzug, hergestellt durch
Vorlochen (1) und Ziehen (2)

Gratlage beim
Folgeschnitt



Anwenden von Vorlochen zum Vermeiden schwierig
geformter Schneidstempel und Schnittplatten

- a) Ausführung als Folgeschnitt mit zwei Lochstempeln und Schneidstempel
- b) Folgeschnitt mit zwei Lochstempeln, einem Vorlocher und Schneidstempel
- c) Werkstück

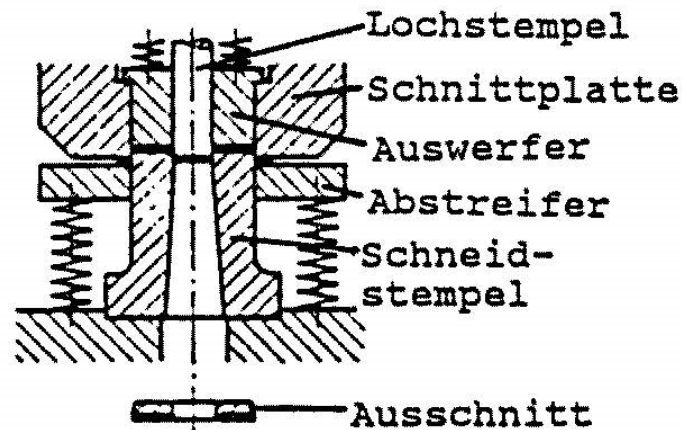
Gestaltungslehre

Schneiden

– Unterscheidung zwischen Folgeschnitt und Gesamtschnitt

➤ Gesamtschnitt:

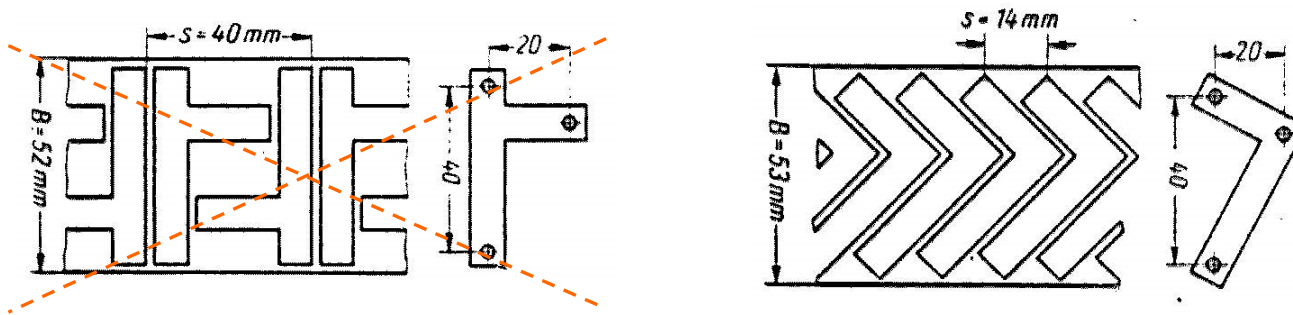
- innere und äußere Begrenzung des Bauteils werden gleichzeitig geschnitten
- schnell und präzise
- hohe Werkzeugkosten



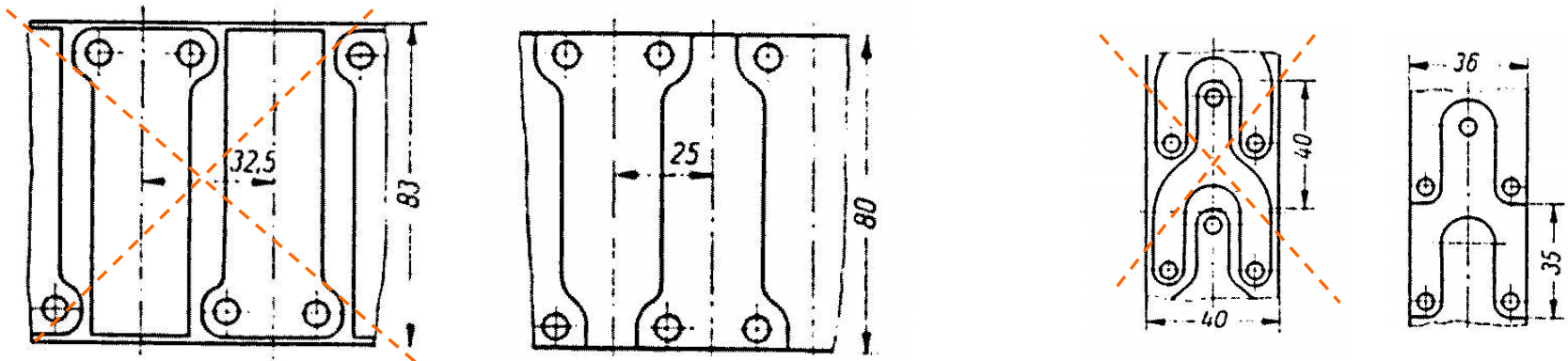
Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Schnitt- & Stanzteilen

➤ Werkstoffausnützung durch Grund-Geometrie



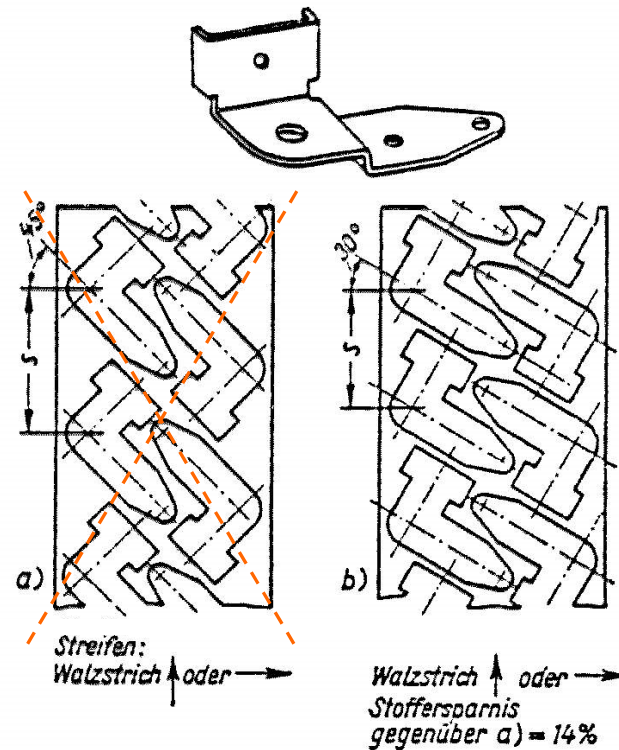
➤ Werkstoffausnützung an den Übergängen



Gestaltungslehre

Gestaltungsrichtlinien von Schnitt- & Stanzteilen

- Berücksichtigung der Blech-Orientierung für die Weiterverarbeitung

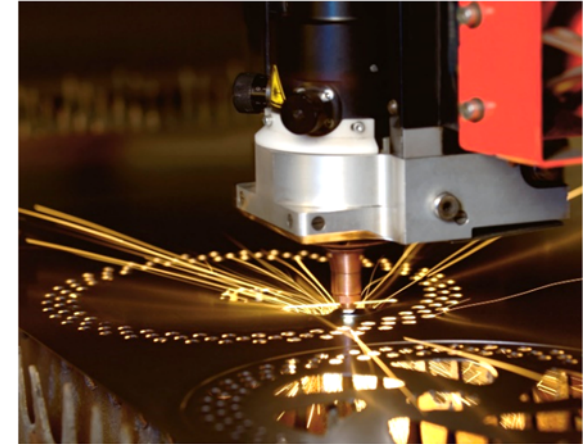


Gestaltungslehre

Laserschneiden

Vorteile Laserschnitt:

- schnelle Fertigung durch hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit
- einfache Datenverarbeitung durch NC-Steuerung
- beste Automatisierbarkeit
- sehr hohe Flexibilität
- wirtschaftlich für Einzel- und Kleinserienteile hoher Komplexität
- kraftfreie Bearbeitung
- verschleißfreies Werkzeug
- hohe, präzise und definierte Energiedichte des Lasers
- geringe Wärmebelastung des Bauteiles und dadurch geringer Verzug
- hohe Schnittkantenqualität zufolge präziser Schnittführung
- große Werkstoffvielfalt
- zusätzliche Markierungen möglich (Biegemarken, Teilenummern ...)

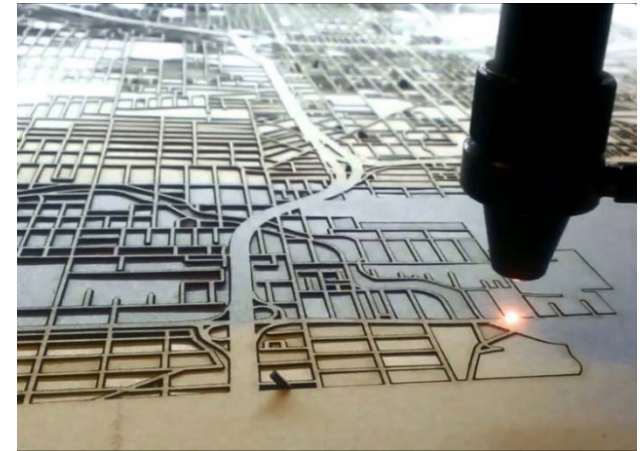


Gestaltungslehre

Laserschneiden

Zweckführender Einsatz:

- Einzelteile komplexer und aufwendiger Form
(womöglich mit anderen Verfahren so nicht herstellbar)
- Bauteile mit großer Formenvielfalt bei jeweils
vergleichsweise geringer Stückzahl
- Anstreben eines hohen Automatisierungsgrades
(einfache Datenverarbeitung mittels NC-Laserschnitt – „CAM“)
- Herstellung der geforderten Geometrie bei gegebener
(geringer) Stückzahl anders nicht wirtschaftlich möglich
- Änderung/Anpassung/Variation der Geometrie benötigt
- Verbesserung der Schnittkantenqualität
- Kraftfreie und/oder geringe thermische Belastung
des Bauteils in der Fertigung

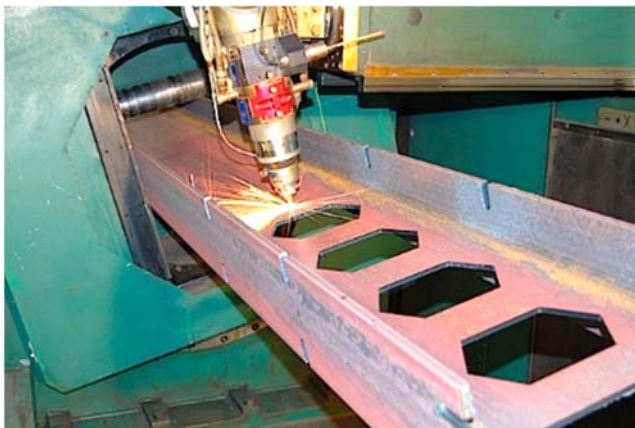
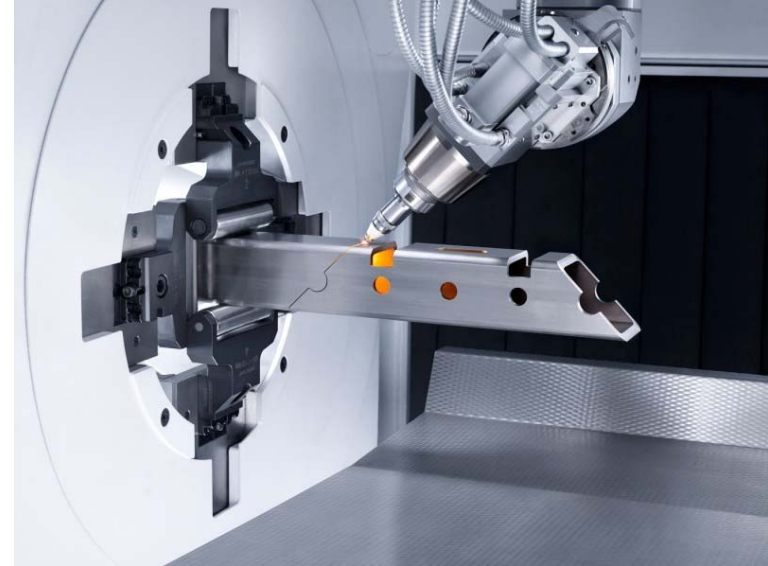


Gestaltungslehre

Laserschneiden

Rohrlaser / Profillaser

- Automatisierter Zuschnitt von Profilen
- Kombination aus:
 - Ausrichten des Lasers
 - Drehen des Profils
 - Vorschub des Profils



Gestaltungslehre

Ergänzend zum Konstruieren von Schnitt- und Stanzteilen

- Einheitliche Blechdicken bzw. gröbere Abstufung der verwendeten Blechdicken anstreben
- Verfügbare Blechformate berücksichtigen
 - typische Blechtafel: 1,5 x 3 m
 - bzw. auch Überformate oder Coils (nach konkreten Anwendungsfall)
 - größere Blechbauteile evtl. mehrteilig ausführen (lösbar / unlösbar verbunden)
- Wenn möglich, Guillotine-Schnitt bevorzugen (zur Verwendung von Schlagscheren)
(und generell durchgehende Schnittlinien mit Ein- und Auslauf an der Blechberandung bevorzugen)
- Beim Laserstrahlschneiden die gegebene Formenfreiheit nutzen:
 - nachfolgende Arbeitsschritte bereits im Laserschnitt durchführen (z.B. Bohren)
 - Leichtbaupotential nutzen
 - Zusammenbau durch geeignete Geometrien oder Hilfselemente vereinfachen



Guillotine-Schnitt



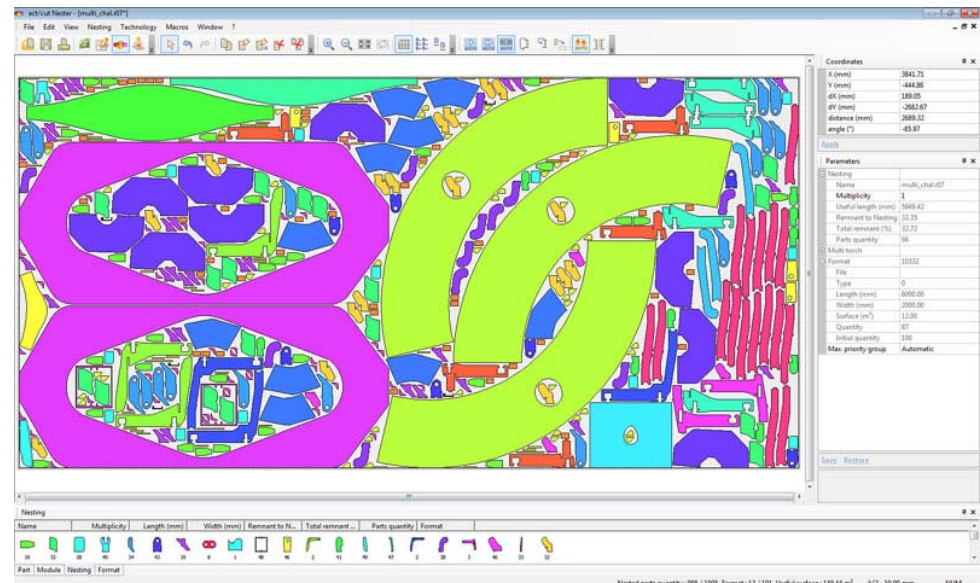
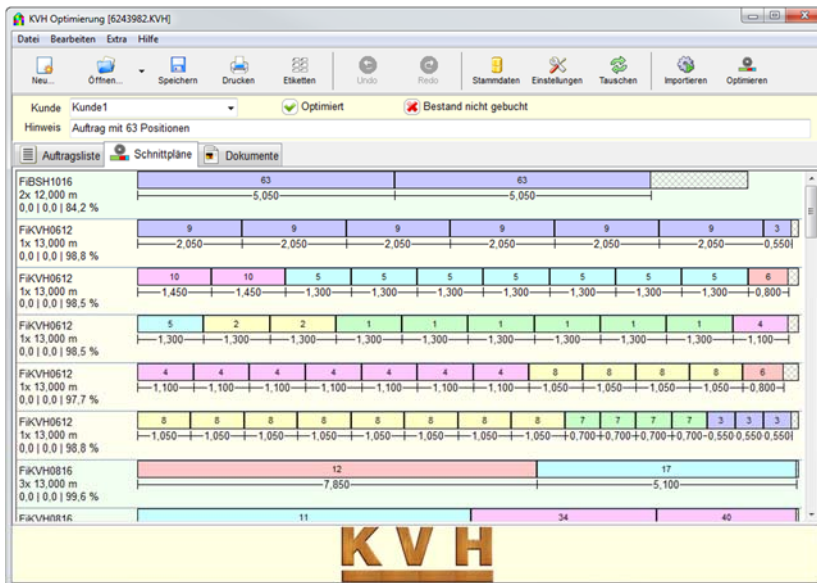
Nicht-Guillotine-Schnitt

Gestaltungslehre

Softwareunterstützung für Schnitt- & Stanzteile

Zuschnittsoptimierung:

- Verschnittreduktion durch optimierte Materialausnutzung
- Für Stangenware (1D)
- Für Bleche (2D)



Gestaltungslehre

Allgemeine Richtlinien

Gestaltungslehre

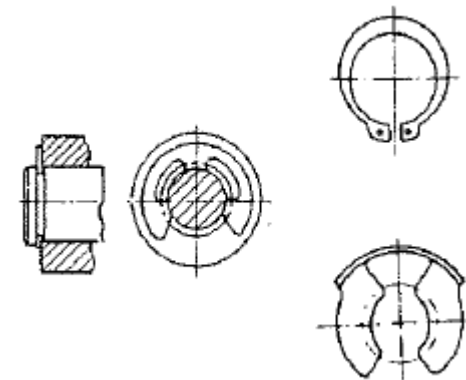
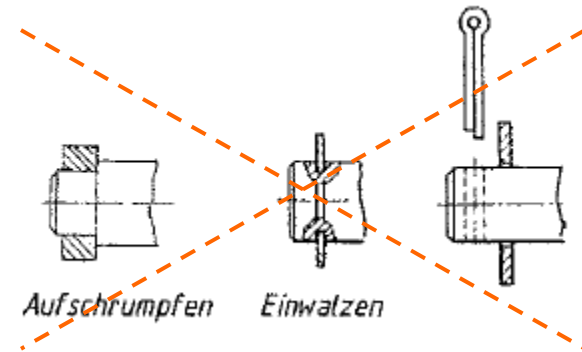
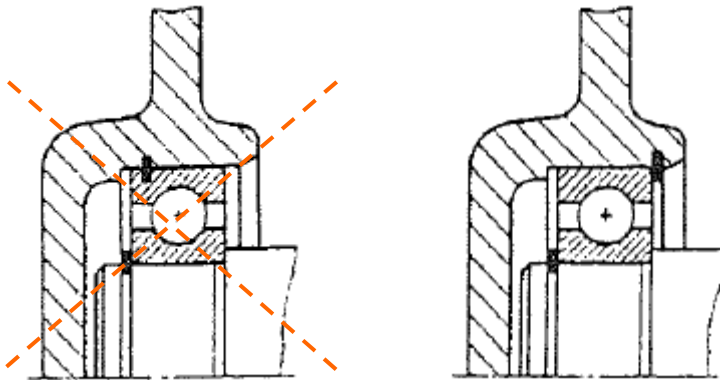
Allgemeine Gestaltungsrichtlinien

- Recyclinggerechtes Gestalten
- Verringern von Biegespannungen
- Verringern der Korrosionsneigung

Gestaltungslehre

Allgemeine Gestaltungsrichtlinien

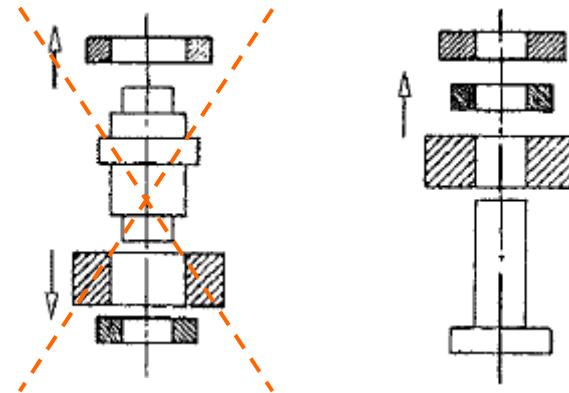
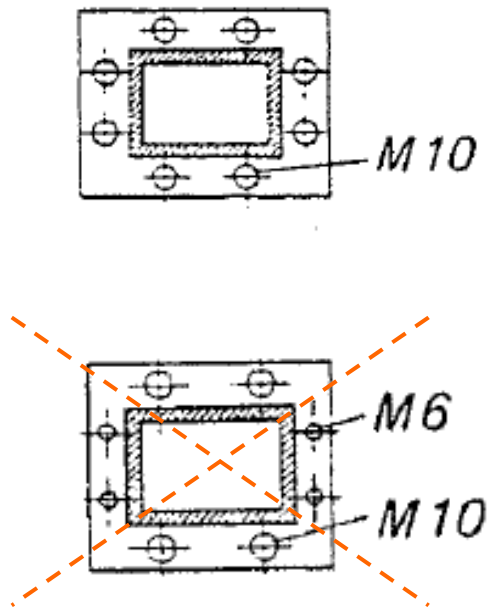
➤ Recyclinggerechtes Gestalten



Gestaltungslehre

Allgemeine Gestaltungsrichtlinien

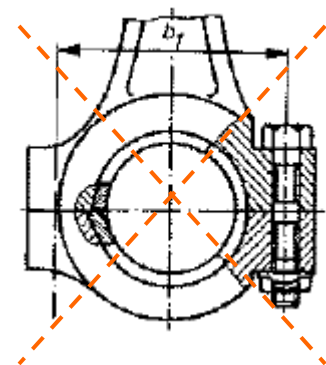
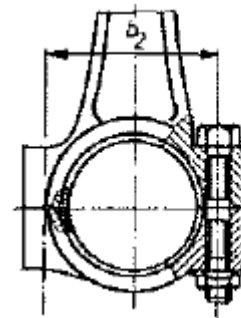
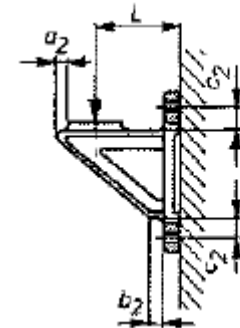
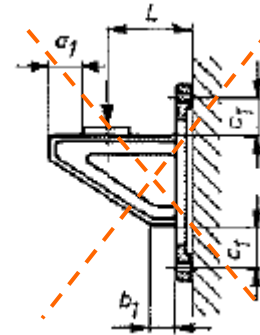
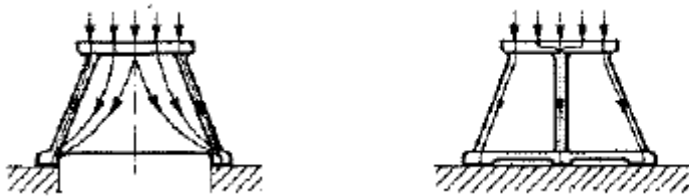
➤ Recyclinggerechtes Gestalten



Gestaltungslehre

Allgemeine Gestaltungsrichtlinien

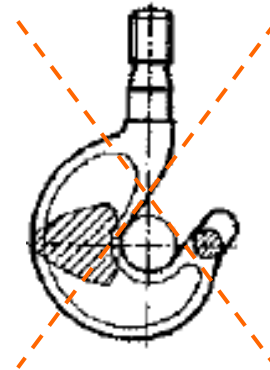
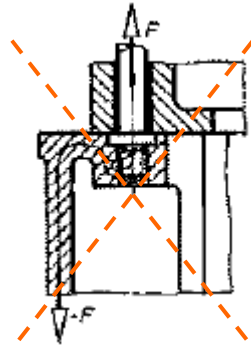
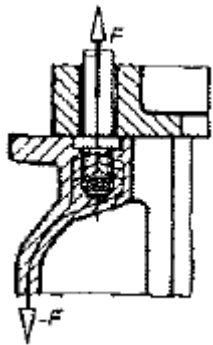
➤ Verringern von Biegespannungen



Gestaltungslehre

Allgemeine Gestaltungsrichtlinien

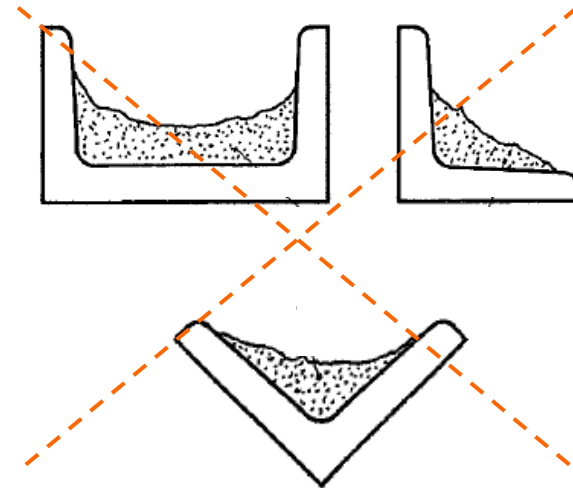
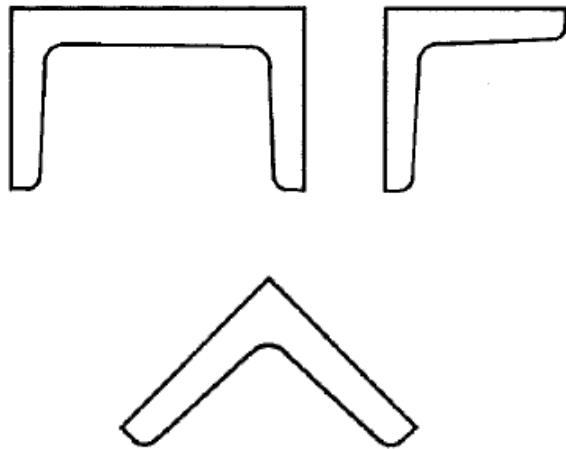
➤ Verringern von Biegespannungen



Gestaltungslehre

Allgemeine Gestaltungsrichtlinien

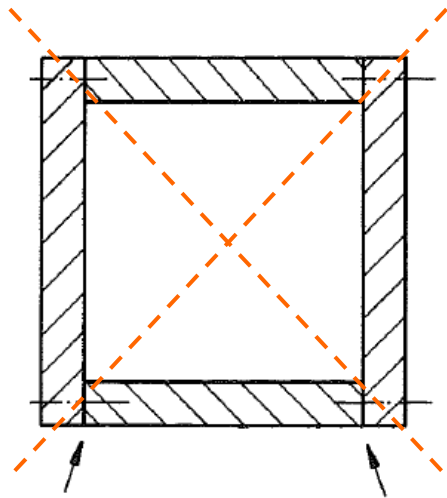
- Verringern der Korrosionsneigung (offene Profile)



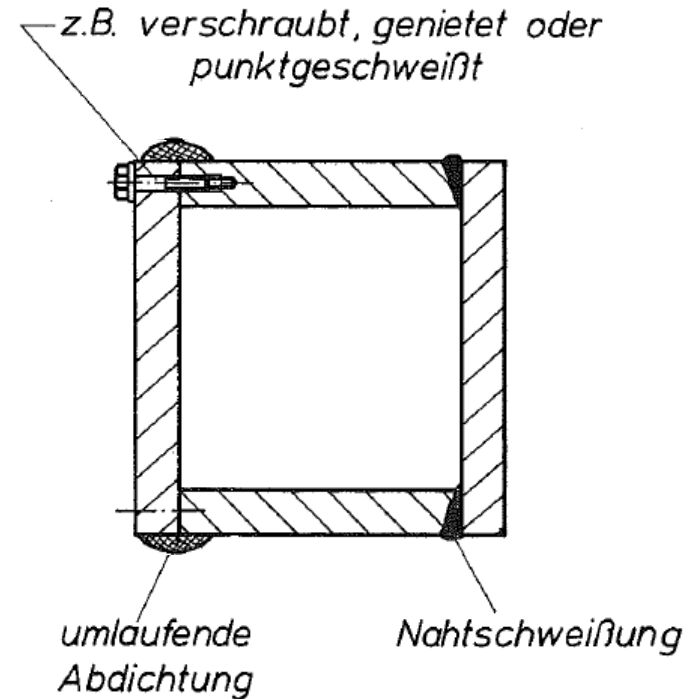
Gestaltungslehre

Allgemeine Gestaltungsrichtlinien

- Verringern der Korrosionsneigung (geschlossene Profile)



Lücken zwischen den
Verbindungsstellen
lassen korrosive Mittel
in den Innenraum ein-
dringen



Gestaltungslehre

Kerbwirkung

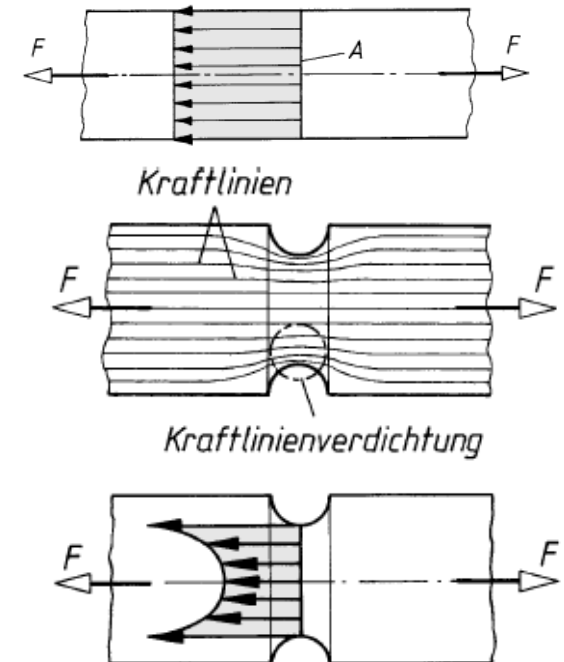
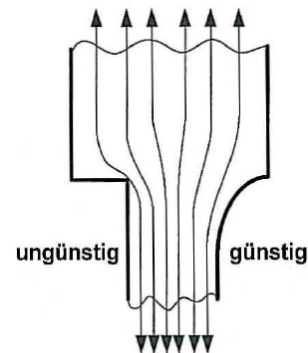
Gestaltungslehre

Kerben

- Geometrische Elemente stellen in Bauteilen oft Kerben dar (z.B. Bohrungen, Querschnittsübergänge, Gewinde, Nuten, Einstiche ...)
- Es kommt zu einer Verdichtung der Kraftlinien und zu einer Spannungskonzentration (Spannungserhöhung) im Kerbgrund

- Kerben schwächen das Bauteil lokal
- Ziel: die schwächende Wirkung von Kerben durch geeignete Gestaltung gering halten
- **kraftflussgerechtes** Konstruieren

(z.B. sanfte und allmähliche Übergänge, Entlastungskerben ...)

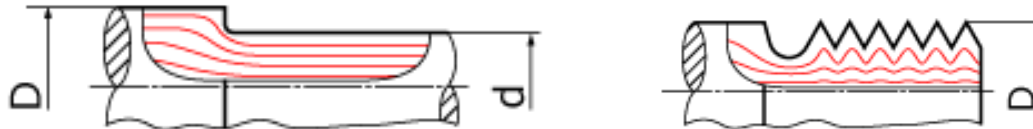


Gestaltungslehre

Kerben

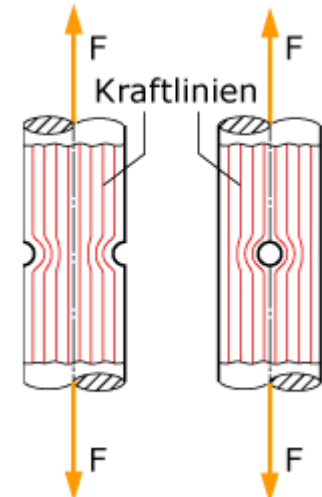
Häufige Kerben:

- Absätze
- Einschnitte und Ausschnitte (Nuten, Freistiche, Gewinde, Bohrungen, Ausbrüche)
- Fügestellen ohne Gefügeänderung – Montagestellen (Press- und Klemmverbindungen)
- Fügestellen mit Gefügeänderung – Schweißnähte



Weitere Kerben:

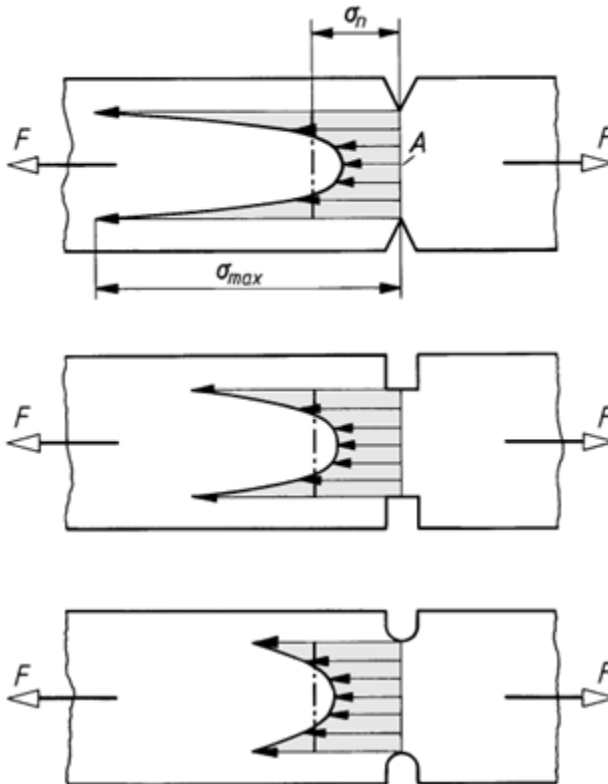
- Oberflächendefekte, -riefen oder sonstige Beschädigungen (z.B. Entstanden beim Bearbeiten oder bei der Montage)
- Kerben durch Korrosion ...



Gestaltungslehre

Kerben

- Die festigkeitsmindernde Wirkung einer Kerbe wird in erster Linie von der Kerbform beeinflusst

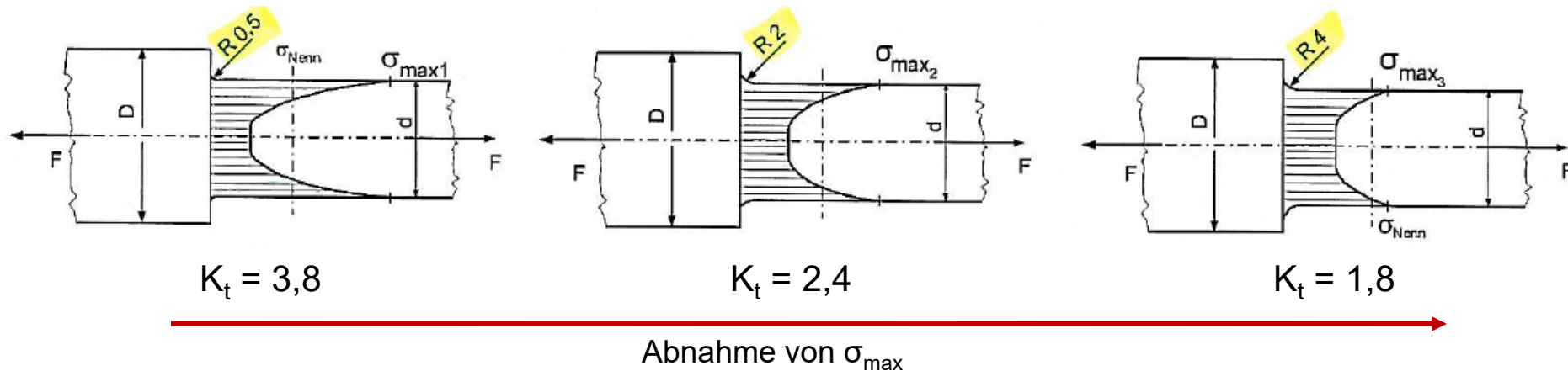


Je schärfer die Kerbe, umso größer die hervorgerufene Spannungsspitze σ_{max}

Gestaltungslehre

Kerbformzahl

- K_t (Formzahl; früher auch α)
- Verhältnis der Spannungsspitze im Kerbgrund zur Nennspannung im gesamten Querschnitt: $K_t = \sigma_{\max} / \sigma_{\text{nenn}}$
- beschreibt somit die Abweichung (Erhöhung) von der Nennspannung
- Je tiefer und schärfer die Kerbe, umso größer die Kerbformzahl (und umso größer auch die Schwächung durch die Kerbe)



Gestaltungslehre

Kerbformzahl

- sind abhängig von:
 - Form der Kerbe – inkl. Größenverhältnisse der Abmessungen zueinander (r/d – Radius-zu-Durchmesser-Verhältnis etc.)
 - Art der Belastung (Zug/Druck, Biegung, Torsion)

- sind nicht abhängig von:
 - Werkstoff
 - Höhe der Belastung
 - Größe (absolut)

- Formzahlen gängiger Kerben werden aus Diagrammen entnommen oder nach Formeln berechnet (z.B. Absätze, Bohrungen ...)

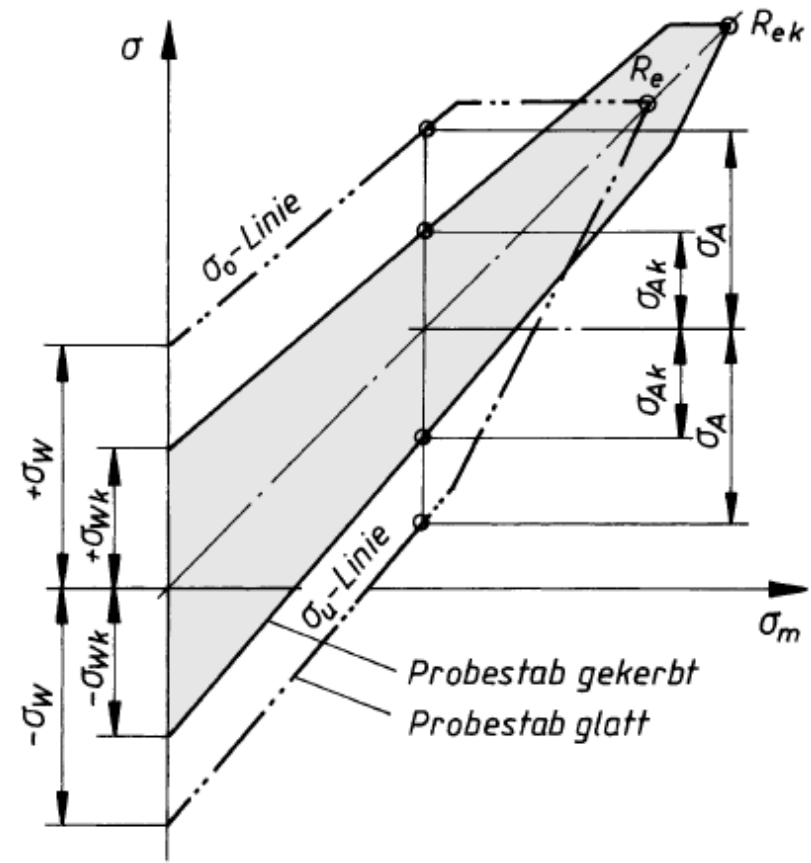
- Weitere Bestimmungsmöglichkeiten
 - softwaregestützte Berechnung (FEM)
 - experimentell

Gestaltungslehre

Kerbwirkung bei dynamischer Belastung

Durch die Kerbe:

- steigt R_e auf R_{ek}
(statische Festigkeit nimmt zu)
- sinkt σ_A auf σ_{Ak}
(dynamische Festigkeit nimmt ab)



Gestaltungslehre

Kerbwirkungszahl und Stützziffer

➤ K_f (früher auch β_K)

➤ Beschreibt die Kerbwirkung unter **dynamischer Beanspruchung**:

$$K_f = \sigma_{aD} / \sigma_{aDK}$$

➤ Aufgrund der Stützwirkung ist die Kerbwirkungszahl kleiner als die Kerbformzahl:

$$1 \leq K_f \leq K_t$$

➤ Die Stützziffer n beschreibt den Zusammenhang:

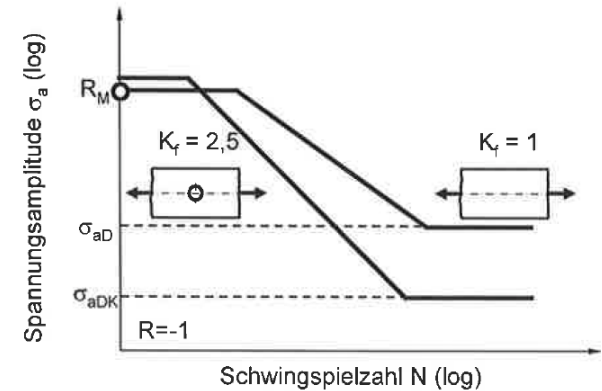
$$n = K_t / K_f \quad (1 \leq n \leq K_t)$$

➤ Die Kerbwirkungszahl ist abhängig vom Werkstoff:

➤ gänzlich kerbempfindlich $K_f = K_t$ ($n = 1$)

➤ gänzlich kerbunempfindlich $K_f = 1$ ($n = K_t$)

➤ Empirische Größe – die Kerbwirkungszahl (bzw. die Stützziffer) wird experimentell bestimmt

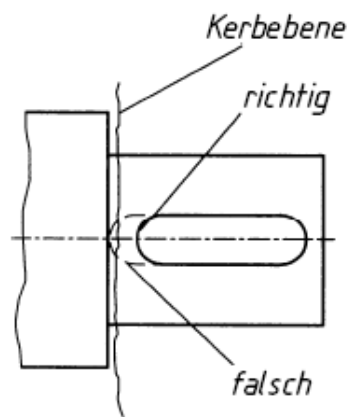


Gestaltungslehre

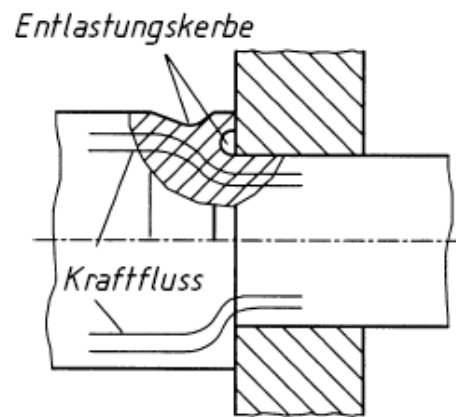
Gestaltung von Kerben

Entlastungskerben:

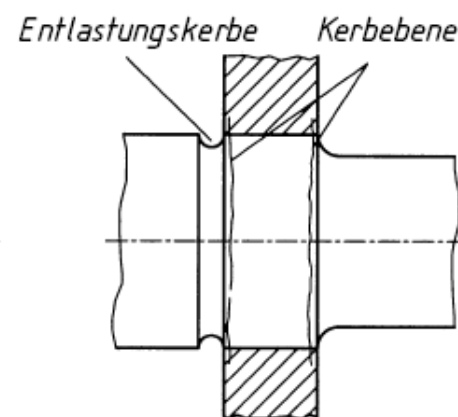
- Durch günstige Gestaltung der Bauteile kann die Kerbwirkung wesentlich beeinflusst (verringert) werden (z.B. Überlagerung von Kerben vermeiden)
- Die Wirkung konstruktiv nicht zu vermeidender „Hauptkerben“ kann durch zusätzliche Kerben (s.g. Entlastungskerben) gemindert werden
→ diese erzeugen einen sanfteren Kraftfluss um die eigentliche Kerbe



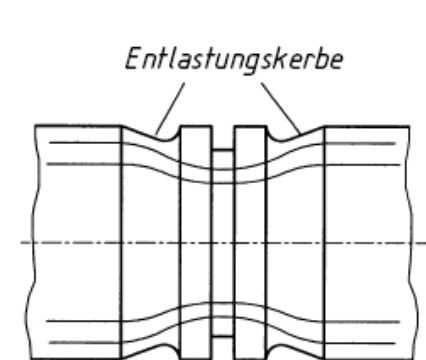
Vermeiden der
Überlagerung von Kerben



Entlastungskerbe
am Wellenabsatz



Entlastungskerben
am Presssitz



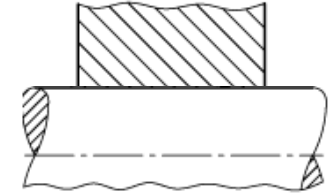
Entlastungskerben
am Einstich

Gestaltungslehre

Kerbwirkung

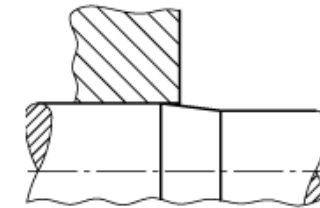
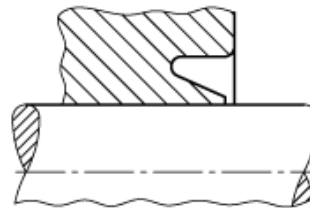
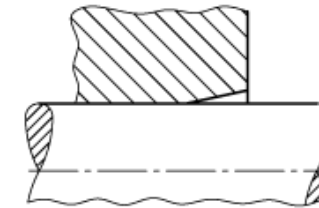
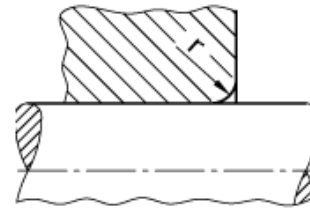
Beispiel:

Minderung der Kerbwirkung für eine auf eine Welle aufgezogene Nabe.



Mögliche Lösungen:

- Abrunden der Nabenkante
- Allmähliche Erweiterung der Bohrung
- Entlastungsrille in der Nabe
- Konischer Übergang der Welle
- Einspannstelle verdickt ...



Gestaltungslehre

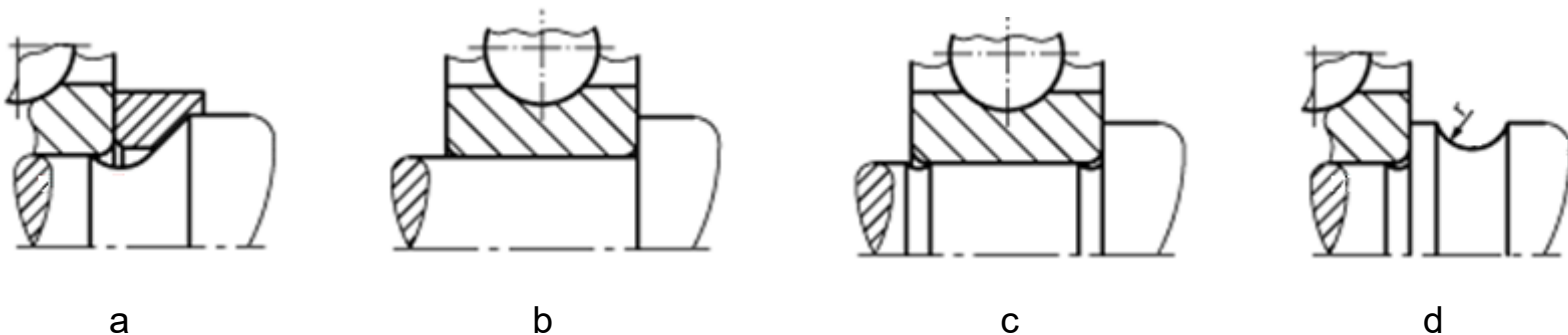
Kerbwirkung

„Ihre Mitarbeit ist gefragt“

Beispiel:

Minderung der Kerbwirkung beim Übergang von einem kleinen zu einem größeren Wellendurchmesser bei einem aufgezogenen Wälzlager.

Ordnen Sie die abgebildeten Verbindungsvarianten zur Anbringung eines Wälzlagers nach der Kerbwirkung. Beginnen Sie mit der „ungünstigsten Ausführungsart“.



Gestaltungslehre

Kerbwirkung

Beispiel:

Minderung der Kerbwirkung beim Übergang von einem kleinen zu einem größeren Wellendurchmesser bei einem aufgezogenen Wälzlager.

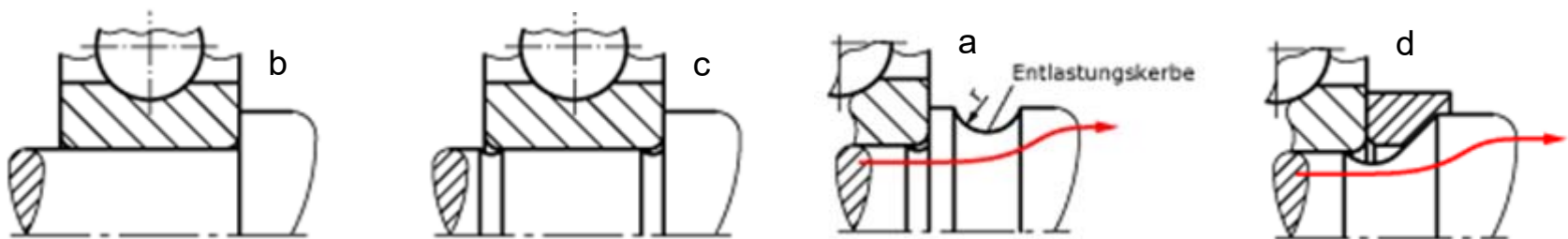
Lösung:

b - Einfach aufgezogenes Wälzlager mit kleinem Rundungsradius

c - Ausrundungen am Lagersitz der Welle durch Einstiche (an den Kanten des Wälzlagererrings)

a - Zusätzliche Entlastungskerbe am Wellenabsatz

d - Vergrößerte Ausrundung und konischer Übergang mit Stützring



Abnahme der Kerbwirkung

Gestaltungslehre

Ergänzend zum Konstruieren von Geometrien die Kerben darstellen

- **Möglichst günstige Positionierung:**
Geometrien die Kerben darstellen sind nach Möglichkeit so zu positionieren, dass diese den geringsten ungünstigen Einfluss auf die Gesamtkonstruktion haben.
- **Besondere Kerbengestaltung nur wenn erforderlich (z.B. Entlastungskerben ...):**
Un- und niedrigbelastete Kerben sind i.d.R. nicht kritisch und erfordern daher im allgemeinen weniger Aufwand zur besonderen Gestaltung.
(Aufwendigere Formen führen zu höheren Kosten.)

Gestaltungslehre

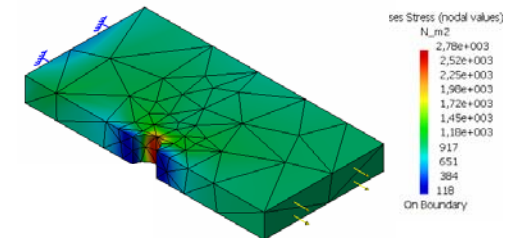
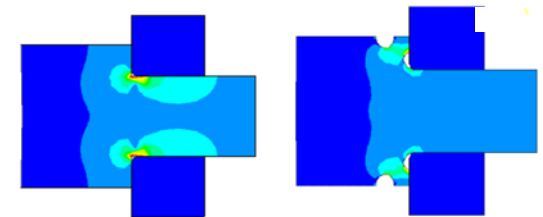
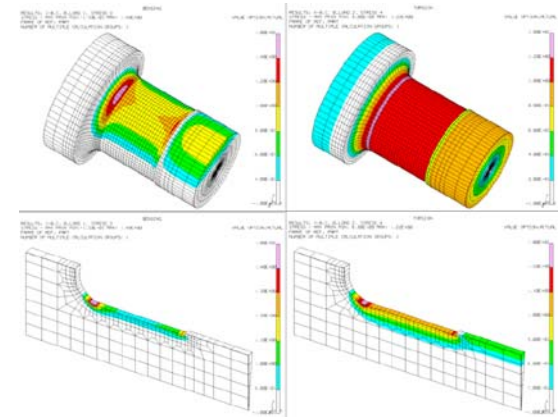
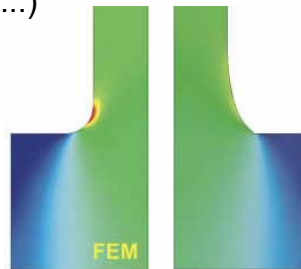
Softwareunterstützung für Kerben

FEM – Belastungsanalyse:

- Analyse komplexer Kerbformen und Effekte durch das Zusammenwirken bzw. die Überlagerung mehrerer Kerben
- Spannungen in Kerben
- Verformungen (elastisches / plastisches Materialverhalten)

CAO – Topologie-/Geometrie-Optimierung:

- Optimieren der Gestalt
- Basierend auf dem festgelegten Bauraum und der Randbedingungen (Einspannungen, Kräfte ...)



FEM ... Finite-Elemente-Methode
CAO ... Computer-Aided Optimization