

Konstruieren mit Kunststoffen

1) Einführung und geometrische Unterteilung von Produkten

Phasen der Produktentwicklung

- 1) *Planen*: Aufgabe auswählen → Was will man für ein Produkt entwickeln? Welche Anforderungen bestehen darin?
- 2) *Konzipieren*: Aufgabenstellung konkretisieren → Wie/mit welchen Mitteln sollen die Anforderungen erfüllt werden? Welche Konzepte setzt man um?
- 3) *Entwerfen*: Maßstäblicher Entwurf → Welche Gestalt/welche Dimension hat Bauteil? (wo welche Funktionselemente?)
- 4) *Ausarbeiten*: Konstruktion und Ausführung (Zeichnungen, Prototypen) → Wie setzt man den Entwurf konstruktiv um?



Geometrische Unterteilung von Produkten

	Großflächige Produkte	Gehäusartige Produkte	Behälterartige Produkte	Komplexe Produkte
<i>Beispiel</i>				
<i>Wanddicke</i>	Relativ dünnwandig	Relativ dünnwandig	Relativ dünnwandig	Unterschiedliche Wanddicke
<i>Funktion</i>	Abdecken, sich selbst tragen	Abdecken, elektrisch isolieren, Schall dämpfen, im Inneren auch verbinden, Motoren/Getriebe positionieren	Flüssigkeiten halten, tragen, dichten	Flüssigkeiten leiten, Kräfte leiten, Schall isolieren, sich selbst tragen
<i>Anforderungen</i>	Außen oft optisch anspruchsvolle Freiformfläche, teils haptische Anforderungen	Außen oft optisch anspruchsvolle Freiformfläche, teils haptische Anforderungen	Geringere optische und haptische Anforderungen	Geringe haptische oder optische Anforderungen
<i>Geometrie</i>	Innen oft komplex: Verrippungen, Schnapphaken, Hinterschneidungen	Innen oft noch komplexer als großflächige Produkte: Hinterschneidungen, Verrippungen, Schraubdomen	Wichtig: Bildung eines dichten Hohlraums	Geometrie wegen mechanischen Anforderungen oder Funktion sehr komplex (verrippt), teilweise Bildung von komplexen Hohlräumen

2) Auswahl von Verarbeitungsverfahren und Werkstoff

Einflussgrößen



Geometrische Merkmale von Produkten als Hilfsmittel

Großflächige Produkte	
Spritzgießen: Hohe Rippen, komplexe Funktionselemente, Stückzahlen >100.000 Gasinnendruck- (GIT), Gashinterdrucktechnik (GHD) gegen Einfallstellen Kaskadenspritzgießen gegen Bindenähte Sandwichspritzgießen für hochwertige Oberflächen Spritzprägen: geringere Orientierungen und Verzug, aber höhere Zykluszeit	Pressen: Keine zu komplexen Strukturelemente, Stückzahlen 50.000 bis 100.000 SMC schlechtere Oberfläche, geringe Wärmeausdehnung, kostengünstig GMT bessere Oberfläche, teurer Langfaserverstärkte Thermoplaste (LFT), mittelmäßige Oberfläche, kostengünstig
Gehäusartige Produkte	
Spritzgießen: Dünnwandspritzgießen: teurere Werkzeuge und Maschinen Thermoplastschaumgießen: dickwandiger, orientierungsarm, ohne Einfallstellen, günstige Werkzeuge: Stückzahlen <50.000, schlechtere Oberfläche	Thermoformen: Ohne komplexe Funktionselemente, Stückzahlen < 10.000
Behälterartige Produkte	
Spritzgießteile schweißen: Komplexe, exakte Geometrien, größere Kräfte/Drücke, Stückzahlen >100.000	Rotationssintern: Geringe Werkstoffauswahl und Oberflächenqualität, Stückzahlen < 20.000
Blasformen: Keine exakte Innengeometrie, geringere Werkstoffauswahl und Oberflächenqualität, Stückzahlen < 100.000	Streckblasen: Höhere Drücke, keine Griffe o.ä., Stückzahlen > 100.000 Bessere Oberflächenqualität
Komplexe Produkte	
Spritzgießen: Komplexe Innengeometrien: Schweißen oder Schmelzkerntechnik (SKT) Weniger komplexe Innengeometrien: Gasinnendrucktechnik (GIT), Wasserinnendrucktechnik (WIT)	Blasformen: Dünnwandiger und schlechtere Oberfläche, insbesondere für Flüssigkeitsleitungen ohne große Drücke: Saugblasen oder 3D-Blasformen

Beispiel Spritzgießen: Produktkomplexität bestimmt Verfahren

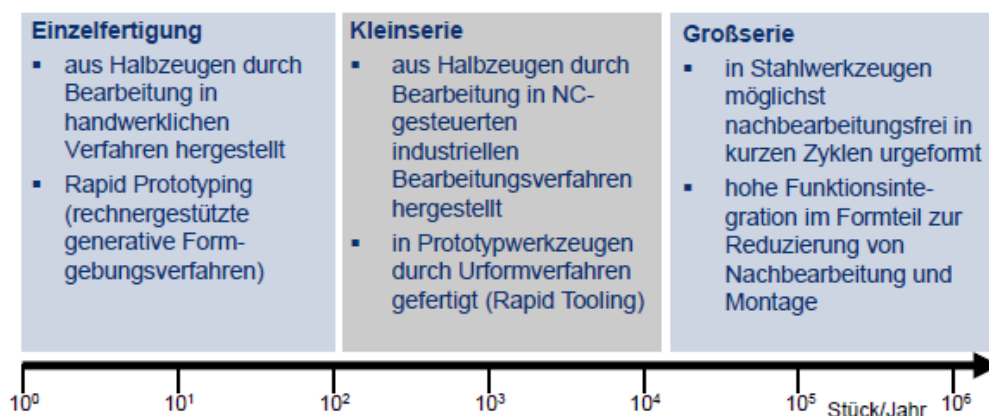
Anlagenaufwand ↓	Komplexität der Formteile →						
		Formteile ohne Hinterschnitt	Formteile mit Hinterschnitt	Dickwandige Formteile	Formteile mit Innen- konturen	Formteile mit maßge- nauen In- nenkonturen	Mit Dichtig- keitsFunktio- nen der In- nenkonturen
	Konventionelles Spritzgießen	++		+			
	Konventionelles Spritzgießen mit Kernen		++	+			
	Gasinjektionstechnik			++	++		
	2-Komponentenspritzgießen			++			
	Mehrschalenspritzgießen				++	++	
	Schmelzkerntechnik				+	++	++

Produktionsmenge und Verarbeitungsverfahren

- Extrudieren
- Spritzgießen und Sonderverfahren
- Schäumen/RIM
- Blasformen
- Pressen
- GMT-Pressen
- Thermoformen
- Aus Halbzeugen spanend herstellen (CNC u.a.)
- Gießen
- Formlose Formgebungsverfahren: Rapid Prototyping
- Aus Halbzeugen spanend herstellen (handwerklich)

Mindest-Produktionsvolumen

Von der Einzelfertigung bis zur Großserie



Die zu produzierende Stückzahl ist ein wesentliches Merkmal für die Auswahl des Fertigungsverfahrens!!!

Einfluss der Produktionskosten auf die Wahl des Verfahrens

- Meist stehen mehrere Verfahren(svarianten) zur Verfügung (Bsp. Mehrfachkavität ggü. Einfachkavität oder In-mold-assembly ggü. Montageschritten), mit denen Produkt hergestellt werden kann. → Auswahl des geeigneten Verfahrens erfolgt nach einer Kostenbetrachtung
- Hierbei muss zwischen variablen und fixen Kosten unterschieden werden
 - o Variable Kosten beschreiben die Aufwendung bei der Herstellung des Produktes, die mit der Zahl der hergestellten Produkte variieren → Material-, Personal-, Energiekosten und „Maschinenmiete“
 - o Fixkosten sind unabhängig von der Zahl der hergestellten Produkte → Investitionen in die Entwicklung des Produktes und in Werkzeuge, die ausschließlich zur Herstellung dieses Produktes genutzt werden können

Grobschema Kostenkalkulation → Rechenschema Fertigungskosten

Kosten sind „bewerteter Verzehr von Gütern und Diensten zur Erstellung betrieblicher Leistungen“. Folgende Kosten werden unterschieden

Einzelmaterialkosten, Materialgemeinkosten	+ Sondereinzelkosten des Vertriebs
+ proportionale Fertigungskosten	+ Vertriebsstrukturkosten
+ Strukturkosten der Fertigung	+ Vertriebsgemeinkostenzuschlag
+ Fremdleistungskosten	+ Verwaltungsstrukturkosten
+ Sondereinzelkosten der Fertigung	+ Verwaltungsgemeinkostenzuschlag
Summe = Produktkosten (volle Herstellkosten)	Summe = volle Selbstkosten

Vergleich Fertigungskosten pro Stück

Herstellung eines PKW-Türgriffs

- Variante 1: 50 Musterteile, 1 Jahr
- Variante 2: 20.000 Stk./Jahr, 5 Jahre
- Variante 3: 200.000 Stk./Jahr, 5 Jahre

Bestimmung des geeigneten Fertigungsverfahrens → Vergleichskalkulation Fertigungskosten

Gewähltes Verfahren	Spritzgießen einfach-Werkzeug	Spritzgießen zweifach-Werkzeug	Lasersintern (Prototypverfahren)
Variante 1: 50 Musterteile	600,20 €/Stk.	1000,14 €/Stk.	19,16 €/Stk.
Variante 2: 20.000 Stk./Jahr, 5 Jahre	0,50 €/Stk.	0,64 €/Stk.	keine ausreichende Maschinenkapazität
Variante 3: 200.000 Stk./Jahr, 5 Jahre	0,23 €/Stk.	0,19 €/Stk.	keine ausreichende Maschinenkapazität

→ Die erwartete Stückzahl bestimmt das wirtschaftlichste Verfahren!

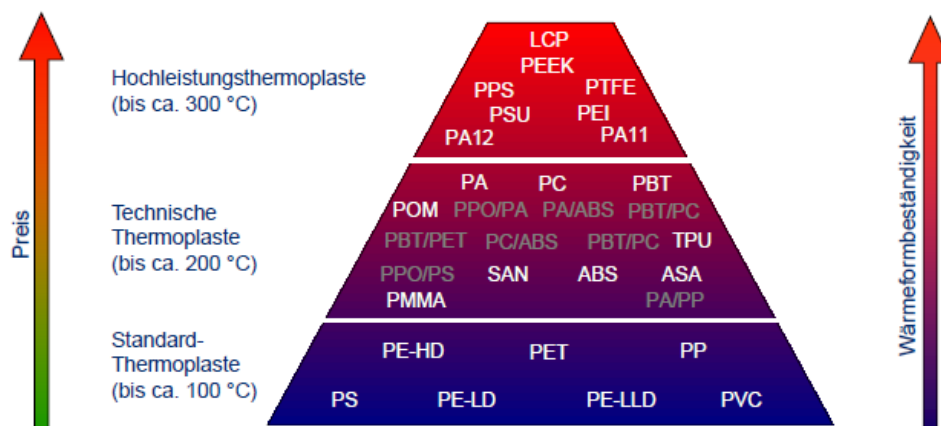
3) Werkstoffmerkmale von Kunststoffen

Werkstoffspezifische Alleinstellungsmerkmale

Dichte	Steifigkeit (Widerstand gegen Verformung)	Dehnfähigkeit	Festigkeit (Widerstand gegen Bruch)	Innere Dämpfung
Gering: 0,8 bis 2,2 g/cm ³ Erlaubt Produkte mit geringen Massenkräften (Gewichtskraft, Trägheitskraft) Leicht beeinflussbar durch Füllstoffe	Eher gering Erlaubt Produkte mit Dichtfunktion und Schutz vor stoßartigen Belastungen Erlaubt Funktionselemente wie Filmscharniere und Schnapphaken Kann durch Fasern im Werkstoff oder konstruktiv (Rippen) gesteigert werden Beeinflussbar durch Temperatur, Füll- und Verstärkungsstoffe, Zeit, Feuchte	Sehr hoch Erlaubt höhere mechanische Energieaufnahme durch z.B. Stoß Erlaubt höhere Toleranzen Beeinflussbar durch Temperatur, Zeit, Füllstoffe, Medien	Gering Erlaubt Sollbruchstellen Kann durch Fasern im Werkstoff gesteigert werden Beeinflussbar durch Temperatur, Zeit, Verstärkungsstoffe, Feuchte	Hoch Erlaubt Dämpfung von Schall und Vibrationen Erlaubt höhere Lebensdauer von Lagern und Zahnrädern Kann zu Erwärmung bei Belastung führen beeinflussbar durch Temperatur, Füll- und Verstärkungsstoffe,...

Gebrauchstemperatur	Wärmeausdehnung	Wärmeleitfähigkeit	Elektrische Eigenschaften	andere Eigenschaften
Begrenzt Festigkeit und Steifigkeit sinken rapide mit höherer Temperatur Ermöglicht erst wirtschaftliche Herstellprozesse der Kunststoffverarbeitung Beeinflussbar durch Füll- und Verstärkungsstoffe,...	Hoch Erzwingt große Toleranz zwischen großflächigen Bauteilen, insb. bei Metall/Kunststoffverbunden Beeinflussbar durch Temperatur, Füll- und Verstärkungsstoffe,...	Gering Erlaubt Wärmeisolation Erzwingt aufwendige Kühlung der Schmelze bei der Herstellung Beeinflussbar durch Temperatur, Füll- und Verstärkungsstoffe,...	Niedrige elektrische Leitfähigkeit Erlaubt elektrische Isolation Erlaubt Durchdringen elektromagnetischer Wellen Ermöglicht elektrostatische Aufladung der Produkte	Teils hohe Transparenz Teils sehr chemikalienresistent Teils hohe Härte (korreliert mit Steifigkeit) Für manche Gase und Flüssigkeiten durchlässig Nicht magnetisch Keine Oberflächenkorrosion Teils antihaftend und gut gleitend

Einteilung von Kunststoffen in drei Klassen → Werkstoffpyramide



Werkstoffauswahl und endgültige Festlegung

- Spätere Erkenntnisse im Entwicklungsprozess können erforderlich machen, die Werkstoffauswahl zu korrigieren (etwa Verarbeitbarkeit, Korrektur der Schwindung)
- Werkstoffauswahl stellt eine Annahme dar, die im laufenden Entwicklungsprozess verändert werden kann
- Empfehlung bei der Werkstoffvorauswahl in der frühen Phase der Konstruktion mehrere Optionen auszuwählen und im Entwicklungsprozess laufend abzuwägen

Hilfestellung bei der Werkstoffvorauswahl

Amorphe Thermoplaste	Teilkristalline Thermoplaste
Geringere Dehnfähigkeit	Meist höhere mechanische Eigenschaften (gut für komplexere Produkte)
Hohe Maßgenauigkeit und Maßhaltigkeit (gut für gehäuseartige Produkte)	Höhere Schwindung (Gefahr der Einfallstellen auf Oberflächen: schlecht für gehäuseartige und großflächige Produkte)
Gefahr des Lösens und Quellens (schlecht für behälterartige Produkte)	Chemikalienresistenter (gut für behälterartige Produkte)
Oft geringe Dichte	Meist höhere Standzeiten (gut für komplexe Produkte)
Uneingefärbt transparent	Uneingefärbt milchig

Herausforderung Werkstoffvorauswahl

- Zugänglichkeit der Werkstoffdaten
- Vergleichbarkeit der Werkstoffdaten
- Vielzahl der Werkstoffe
- Kosten
- Einfluss der Zeit auf die Eigenschaften
- Komplexe Anforderungen

Vorgehensweise

- 1) **Umwandlung**: Ermitteln von Zielen und Randbedingungen → Was soll/muss Werkstoff können? Welche Anforderungen bestehen?
- 2) **Screening**: Vorsortierung durch Bedingungen → Welche Werkstoffe können Anforderungen erfüllen? (im Hinblick auf Einsatztemperatur, Transparenz,...)
- 3) **Ranking**: Rangordnung der vorsortierten Werkstoffe erstellen → Wie gut werden die Anforderungen erfüllt? (nach Kosten, Funktion, Dichte)
- 4) **Analyse**: Detailbetrachtung der besten Werkstoffe (Dokumentation betrachten) → Welche sonstigen Stärken/Schwächen abseits der definierten Anforderung haben Werkstoffe?

Umwandlung von Produktfunktion zu relevanten Merkmalen

Funktion	Werkstoff- oder Produktmerkmale
▪ Abdecken	▪ Steifigkeit
▪ Abdichten, Behalten, Leiten (von Medien)	▪ Steifigkeit, Permeation, Langzeitfestigkeit, Medienbest., Dimensionsstabilität*
▪ Befestigen	▪ Festigkeit
▪ Tragen	▪ Festigkeit, Langzeitfestigkeit, Steifigkeit
▪ Führen	▪ Härte, Verschleißfestigkeit, Dimensionsstabilität*
▪ Wandeln und Leiten von Kräften/Momenten	▪ Langzeitfestigkeit, Steifigkeit, Wärmeformbeständigkeit
▪ Verbinden	▪ Langzeitfestigkeit, Steifigkeit
▪ Positionieren	▪ Steifigkeit, Dimensionsstabilität*, Toleranzen
▪ Elektrische Isolation	▪ Durchschlagspannung, Kriechstromfestigkeit, Durchgangswiderstand
▪ Akustische Isolation	▪ Steifigkeit, Dichte
▪ Thermische Isolation	▪ Wärmeleitfähigkeit, Dichte, Wärmeformbeständigkeit

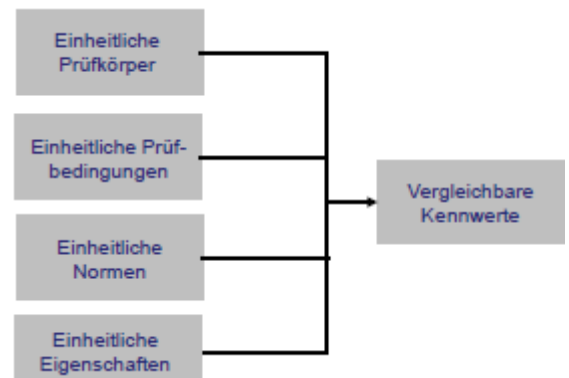
(*Dimensionsstabilität = geringe Neigung zur nachträglichen Dimensionsänderung durch z. B. Quellung, Schwindung, etc.)

Screening

- Nach Ermittlung der Werkstoffanforderung in der Umwandlungsphase, erfolgt die Suche und Vorauswahl geeigneter Werkstoffe in der Screeningphase
- Kann in Form von Literaturrecherchen (Skript, Saechtling) und/oder durch Nutzung von Werkstoffdatenbanken erfolgen
- Nutzung von Werkstoffdatenbanken wie: CAMPUS® Datenbank, M-Base,...

Woher kommen die Werkstoffdaten in den Banken? Datenbank-Problematik

- Datenblätter der Rohstoffhersteller
- Eigene Messungen
- Kommerzielle Datenbanken z.B. M-Base, MATPRO®
- Nicht kommerzielle Datenbanken: CAMPUS®
- Problematik: Infos in Datenbank können aus verschiedenen Quellen stammen. Beim Werkstoffvergleich ist dringend zu prüfen, ob gleiche Prüfbedingungen bei verglichenen Kennwerten vorliegen



CAMPUS® Datenbank

- CAMPUS = Computer Aided Materials Preselection by Universal Standards
- Voraussetzung: Vergleichbare Werkstoffkennwerte
 - o Alle eingetragenen Eigenschaften werden nach einheitlichen Prüfnormen gemessen (ISO-Standards)
 - o Prüfkörper werden nach einheitlichen, genormten Verfahren gefertigt
 - o Fertigungsparameter sind festgelegt bzw. müssen angegeben werden

Werkstoffeigenschaften: Punktwerte und Funktion

Werkstoffdaten:

- Primäre Daten zur Werkstoffauswahl
- Sekundäre Daten zur Dimensionierung

Vorauswahl innerhalb der Screeningphase kann durch verschiedene Auswahlmethoden unterstützt werden:

Trichtermodell/ Filtermodell nach Bosch



Ranking

- Erstellen einer Rangordnung nach anwendungsabhängigen Kriterien, wie Preis, Dichte, Brennbarkeit,...
- Methoden nach VDI 2555 Konstruktionsmethodik – Technisch-wirtschaftliches Konstruieren
 - o Berücksichtigen technische und wirtschaftliche Kriterien bei Beurteilung
 - o Qualitative Bewertung von Kriterien

Analyse der vorausgewählten Werkstoffe

- Eigentlicher Auswahlschritt
- Überprüfen und Vergleichen der ranghöchsten Werkstoffe (Handbücher, Datenbanken, Herstellerdaten,...)
- Welche Stärken/Schwächen? (Bruchdehnung, Kosten, Umweltverträglichkeit,...)
- Verarbeitungsverhalten
- Ästhetische Kriterien

4) Werkstoffauswahl in der Medizintechnik

Was ist ein Medizinprodukt?

Alle einzeln oder miteinander verbunden verwendete Instrumente, Apparate, Vorrichtungen, Software, Stoffe und Zubereitungen aus Stoffen oder andere Gegenstände, die vom Hersteller zur Anwendung für Menschen mittels ihrer Funktionen zum Zwecke

- a. Der Erkennung, Verhütung, Überwachung, Behandlung oder Linderung von Krankheiten,
- b. Der Erkennung, Überwachung, Behandlung, Linderung oder Kompensierung von Verletzungen oder Behinderungen,
- c. Der Untersuchung, der Ersetzung oder der Veränderung des anatomischen Aufbaus oder eines physiologischen Vorgangs oder
- d. Der Empfängnisregelung

Zu dienen bestimmt sind. Anders als bei Arzneimittel, die pharmakologisch, immunologisch oder metabolisch wirken, wird die bestimmungsgemäße Hauptwirkung bei Medizinprodukten primär auf z.B. physikalischem Weg erreicht.

Auswahl und Beurteilung nach DIN EN ISO 10993

Ziel der Norm ist, die biologische Beurteilung hinsichtlich der Verträglichkeit der eingesetzten Materialien mit dem menschlichen Körper zu bewerten → Risikomanagementprozess nach DIN EN ISO 14971 → Teile bspw. Tierschutzbestimmungen, Prüfungen auf Gentoxizität, Prüfung zur Wechselwirkung mit Blut,...

Einteilung von Medizinprodukten nach DIN EN ISO 10933

Art des Körperkontakts	Dauer des Körperkontakts
Kontakt zur Körperoberfläche: Haut, Schleimhaut, Verletzte Hautpartien	Kurzzeitiger Kontakt (<24h)
Kontakt von außen mit Körperinnerem: Blutgefäßsystem (indirekt), Gewebe, Knochen, Dentin, zirkulierendes Blut	Längerer Kontakt (<30 Tage)
Implantierbare Produkte: Gewebe, Knochen, Blut	Dauerkontakt (>30 Tage)

→ Zur Beurteilung in Erwägung zu ziehende Prüfungen

Regularien für Werkstoffe und Verarbeitung beeinflussen Werkstoffauswahl

Werkstoffregularien

- Zytotoxizität (Effekte auf Zellen)
- Frei von Allergenen und Irritation
- Toxizität (Prüfungen unterschiedlicher Art, Reproduktions-, Gentoxizität)
- Implantationsprüfung
- Hämokompatibilität (Effekte auf Blut oder Blutbestandteile)
- Karzinogenität (Prüfung, um tumorbildende Potential zu ermitteln)
- Biokompatibilität (Verträglichkeit technische und biologische Systeme)
- Sterilisierbar und pyrogenfrei (frei von fiebererzeugenden Stoffen)

Verarbeitungsregularien

- Je nach Risikoklasse unterschiedlich strenge Regularien
- Produktion und Verpackung in einem Reinraum (integral oder teilintegral)
- Enge Fertigungstoleranzen
- Sterilisation

→ Aufwendige Freigabeprozedur mit vielen Prüfungen

Sterilisationsverfahren beeinflussen die Werkstoffauswahl

Hitzesterilisationsverfahren	Niedertemperatur-Gas-Verfahren	Sterilisation mit ionisierender Strahlung	Sterilisation mit wässrigen Lösungen
Dampfsterilisation (15min bei 121°C oder 3 min bei 134°C bedampft)	Verminderung der Keimzahl an der Oberfläche	Gammastrahlen, beschleunigte Elektronen oder UV-Strahlen	Desinfektion mit Chemikalien
Heißluftsterilisation (1-2 Stunden bei 160-180°C)	Mikrobizide Gase oder Gasgemische		Mikroorganismen werden so geschädigt, dass keine Krankheit mehr ausbrechen kann

Zulassung von Medizinprodukten außerhalb Europa

Zertifizierung in USA läuft anders als in Europa. Meist sind parallel Zertifizierungsverfahren erforderlich, um Medizinprodukte global zu vermarkten

Amerikanische Regularien:

- United States Pharmacopeia (US-amerikanisches Arzneimittelbuch, USP)
- Einstufung nach Class I-VI
- Setzt Maßstäbe für Qualität, Reinheit
- Medizinische Anwendungen nach Class VI eingestuft
- Für Zulassung biologische Tests bzgl. Toxizität und Implantation notwendig

Zulassung in China

- Zulassungsvorschriften durch China Food and Drug Administration (CFDA)
- China hat europäisches System zum Vorbild (wenige Abweichungen)

Hersteller: COVESTRO, BASF SE, Styrolution

Herstellerversprechen für Kunststoffe in der Medizintechnik: Einhaltung der Auflagen bei

- Gleichbleibender Materialzusammensetzung
- Langfristigen Änderungsankündigungen (>12 Monate)

5) Werkstoffgerechtes Konstruieren

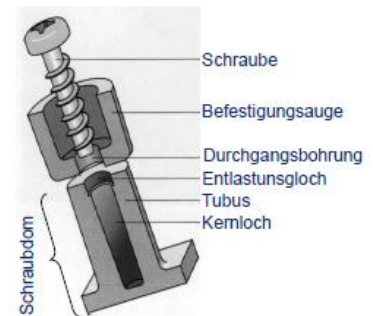


Gestaltungsvielfalt

Funktionsintegration/Integration von Funktionselementen

Energieeffiziente Umformprozesse der Kunststoffverarbeitung erlauben recht hohe Formgebungsvielfalt/Designfreiheit und besondere Werkstoffeigenschaften ermöglichen besondere Funktionselemente.

- Versteifende Rippen
- Schnapphaken: Schnappverschlüsse ermöglichen kostengünstige und montagefreundliche Verbindung von Anbauteilen
- Schraubdomme zur Gehäuseverbindung



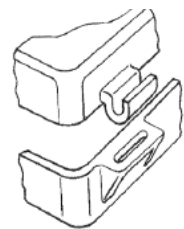
Funktionselement „Leitungsclip“

- Schnappverschlüsse halten Leitungen
- Steife Abstützungen
- Biegeweiche Lagerungen



Gespritzte Scharniere

- Gespritzte Gelenke für thermoplastische Bauteile sind metallischen Gelenken zu bevorzugen
- Einfacheres Recycling/keine Materialverunreinigung
- Einfaches Trennen der Komponenten



Filmscharniere

- Zweiteilige CD-Hülle mit Schnappscharnier
- Einteilige CD-Hülle mit integriertem Filmscharnier

Beispiel: Rasierer aus PP mit eingespritzter Klinge

- Durch Falten über Scharniere in Längsrichtung entsteht Gebrauchszustand
- Zusammenhalt über Ringschnappverschlüsse
- Zum Transport über Scharniere in Querrichtung gefaltet

Outserts: Funktionselemente aus Kunststoff

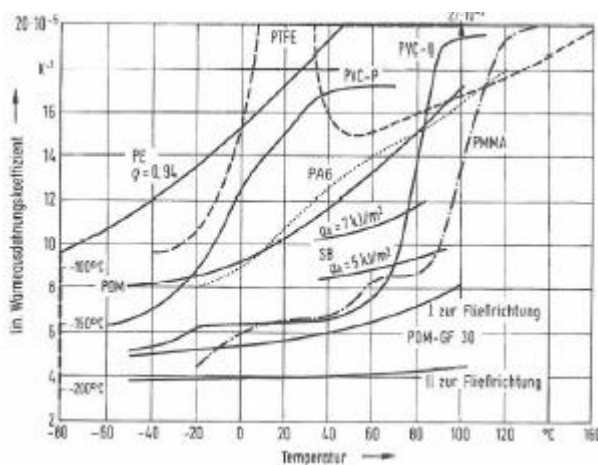
- Bei Outserttechnik werden Funktionselemente an eine metallische Trägerplatte angespritzt

Inserts: Funktionselemente aus Metall

- Schrauben, ...

Wärmeausdehnung

- Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient α in $10^{-6} \cdot K^{-1}$ bei 20°C
- Wärmeausdehnungskoeffizienten α ist temperaturabhängig
- Besonders unverstärkte Kunststoffe haben eine höhere Wärmedehnung als Metalle und als die meisten anderen Werkstoffe



Berechnung des Wärmeausdehnungskoeffizienten α :

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L} \cdot \frac{1}{\Delta T}$$

mit:

L: Ausgangslänge vor der Temperaturerhöhung

ΔT : Temperaturdifferenz

ΔL : Längenänderung

Ursachen für thermische Spannungen

Thermische Spannungen entstehen durch behinderte Wärmeausdehnung. Häufige Ursachen:

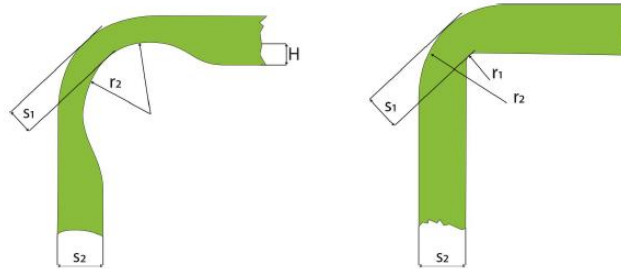
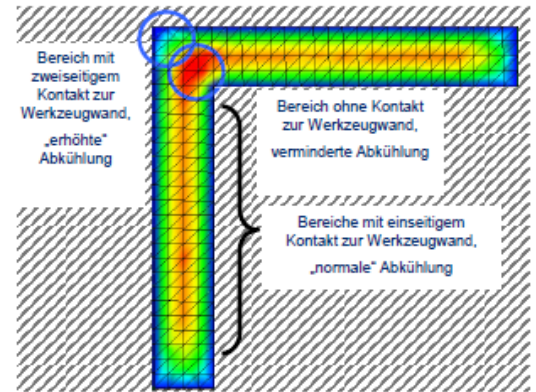
- Schwindungsbehinderung durch formgebundene Werkzeugmaße (auch durch Füllstoffe)
- Ortsvariable Temperaturbelastung im Bauteil
- Kombination von Werkstoffen mit unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten

Schwindung und Verzug

Entstehung von Winkelverzug

Regel: Was später erkalte, steht unter Zugspannung! Ungleichmäßig verteilte Eigenspannungen bewirken Verzug
→ Rahmenverzug durch Ecken

Verringerung des Winkelverzugs in Ecken

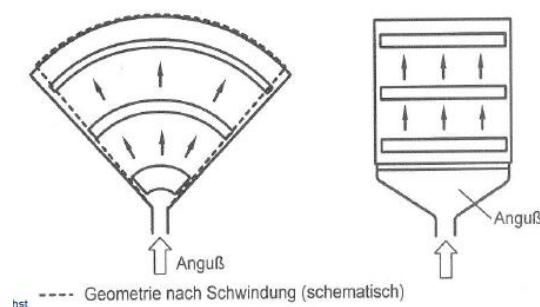


Orientierung wirkt auf Schwindung

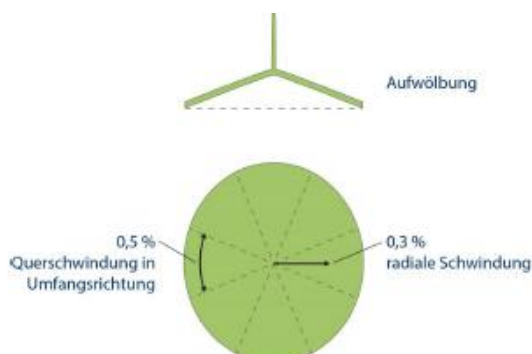


Fließinduzierte Orientierungseffekte verursachen unterschiedliche Schwindung parallel und senkrecht zur Fließrichtung

Geometrieabhängige Schwindung



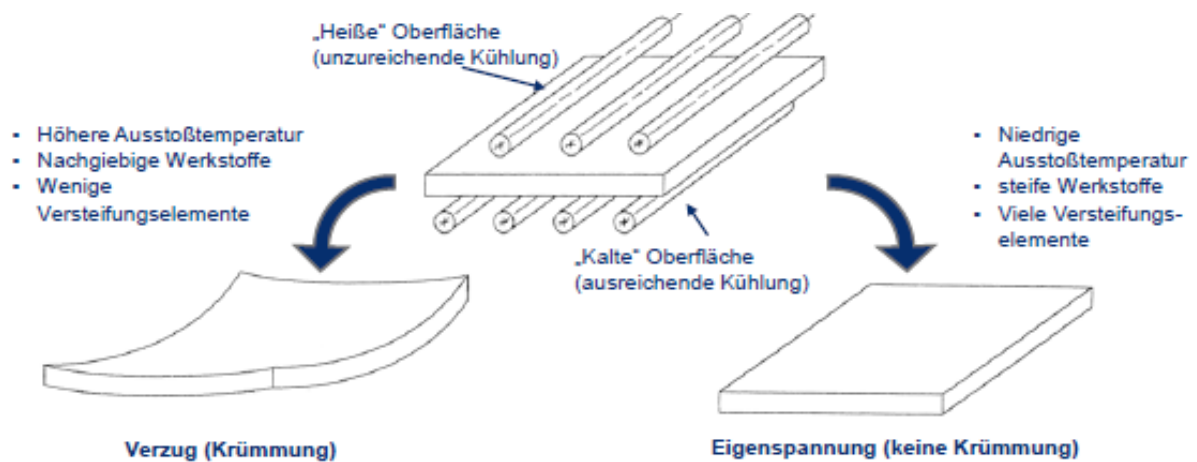
Schwindung und Verzug durch Faserorientierung



Glasfaserverstärkte, spritzgegossene Rundscheibe:

→ Anisotropie der Verarbeitungsschwindung und Verzug einer Rundscheibe

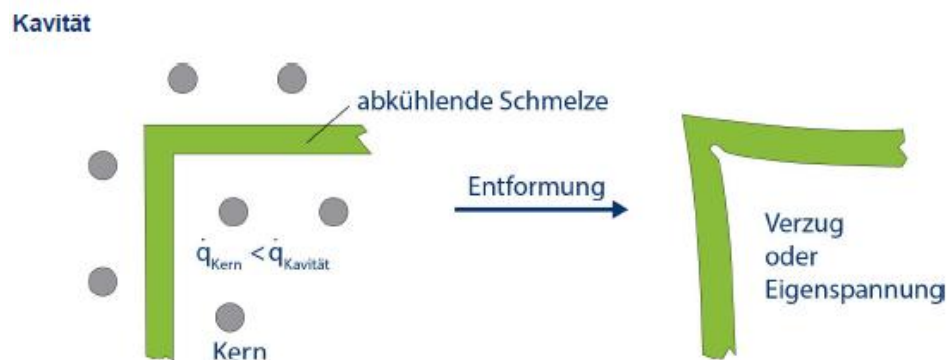
Unterschiedliche Kühlung von Flächen



Wärmere Bauteiloberflächen (durch inhomogenes Kühlen) schwinden nach dem Auswerfen stärker. Eigenspannungen werden entweder eingefroren oder führen zu einem Verzug des Bauteils

Ungleichmäßige Eckenkühlung

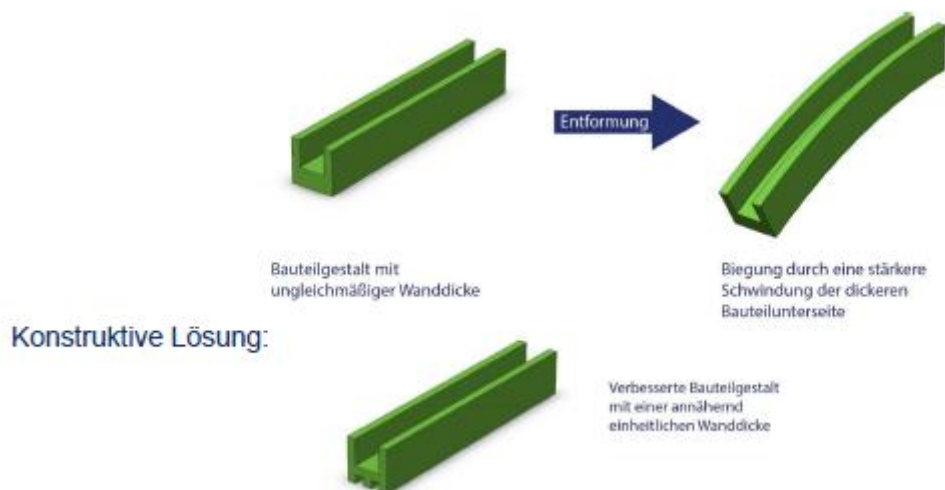
→ nicht nur aus geometrischen Gründen (siehe oben)



Vermeidung von Krümmungsverzug



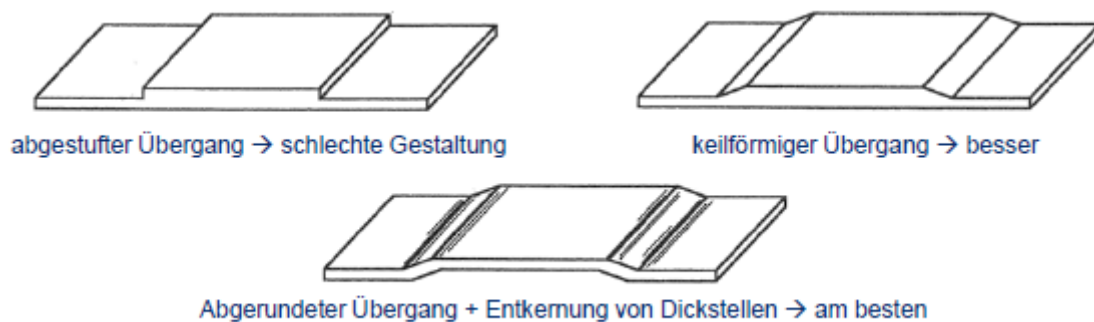
Einfluss der Wanddicke auf den Verzug



Bei teilkristallinen Kunststoffen ist das Einhalten einer einheitlichen Wanddicke wegen der erhöhten Schwindung von besonderer Bedeutung.

Wanddickenübergänge

Vermeidung von Bauteilen mit unterschiedlicher Wanddicke



- Unterschiedliche Schwindung im Übergangsbereich
- Keilförmige Übergänge sind zu bevorzugen
- Wenn es geht, auskernern

Freie und behinderte Schwindung



Thermische Spannung σ

Einachsige Wärmedehnungsbehinderung

Beispiel: Thermische Spannung eines an beiden Enden eingespannten regelmäßig geformten geraden Stabes bei einer Temperaturänderung ΔT :

$$\varepsilon_x = 0 = \alpha \cdot \Delta T + \frac{\sigma_x}{E}$$

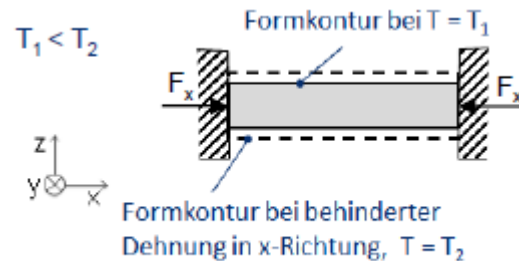
$$\sigma_x = -\alpha \cdot \Delta T \cdot E$$

mit:

E: Elastizitätsmodul

α : Wärmedehnungskoeffizient

ε : Dehnung



Zweiachsige Wärmedehnungsbehinderung

Beispiel: Thermische Spannungen in einer an den Rändern eingespannten Platte mit der Plattendicke d erhält man durch:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] = 0, \quad \varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] = 0$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]$$

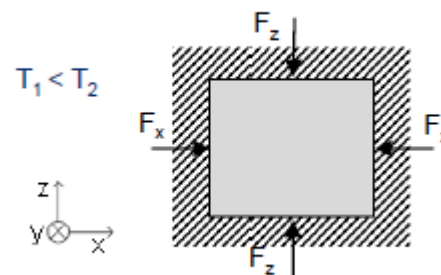
Freie Ausdehnung in y-Richtung: $\sigma_y = 0$

$$\sigma_x = \sigma_z = -\frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta T}{1 - \nu} \cdot \left(\frac{y}{d} + \frac{1}{2} \right)$$

Max. Spannung bei $y = d/2$:

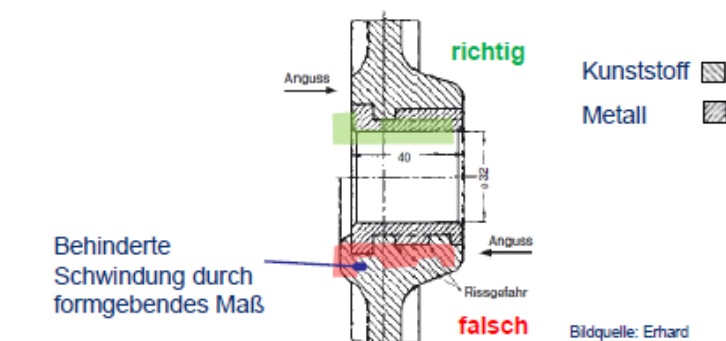
$$\sigma_{max} = -\frac{E \cdot \alpha}{1 - \nu} \cdot \Delta T$$

mit ν : Poisson'sche Zahl, d : Dicke



Maßnahmen zur Vermeidung thermischer Spannungen

Konstruktive Gestaltung → Beispiel: gedrehte Metallwelle mit aufgespritztem Zahnrad

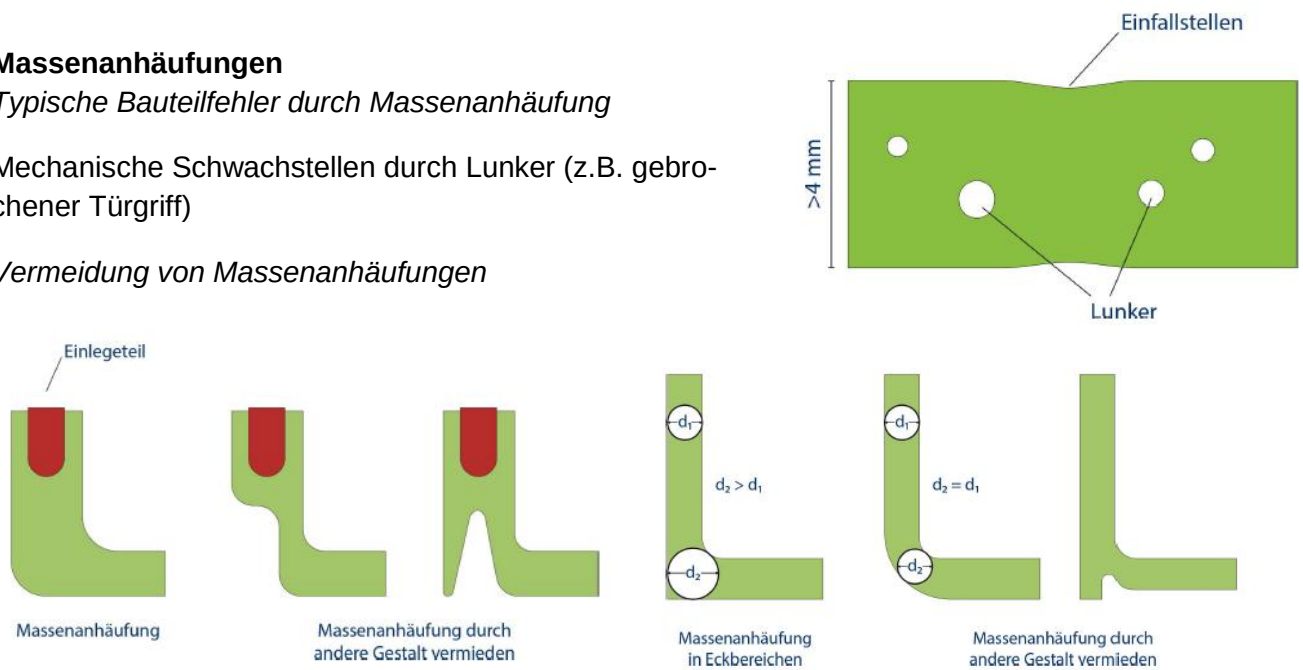


Massenanhäufungen

Typische Bauteilfehler durch Massenanhäufung

Mechanische Schwachstellen durch Lunker (z.B. gebrochener Türgriff)

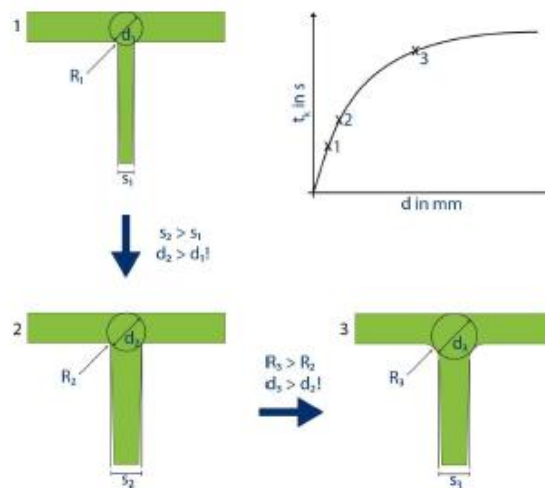
Vermeidung von Massenanhäufungen



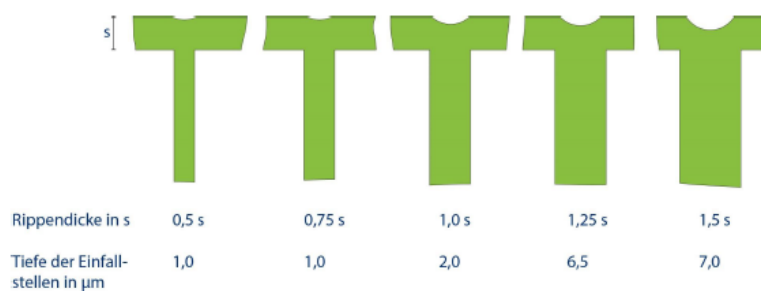
Massenanhäufungen bei Rippen

- Natürliche Rippen zur Versteifung (z.B. Blatt)
- Rippen in Kunststoffbauteilen an KFZ-Pedalteil

Rippendicke und -radius



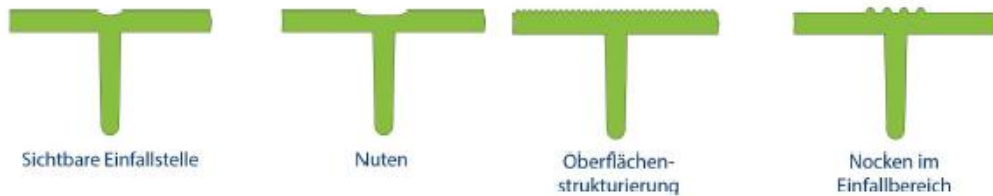
Zusammenhang zwischen Rippendicke und Einfallstellentiefe



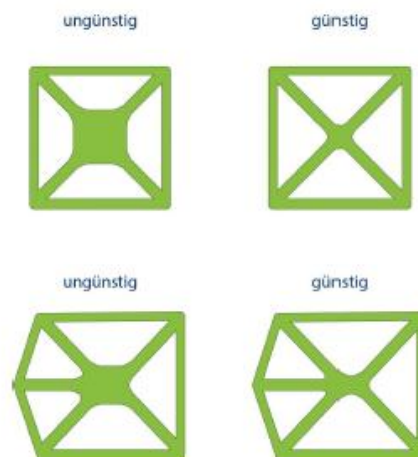
Kaschieren von Einfallstellen

Methoden zum Kaschieren (Verbergen) von Einfallstellen auf der gegenüberliegenden Seite von Rippen und Verdickungen:

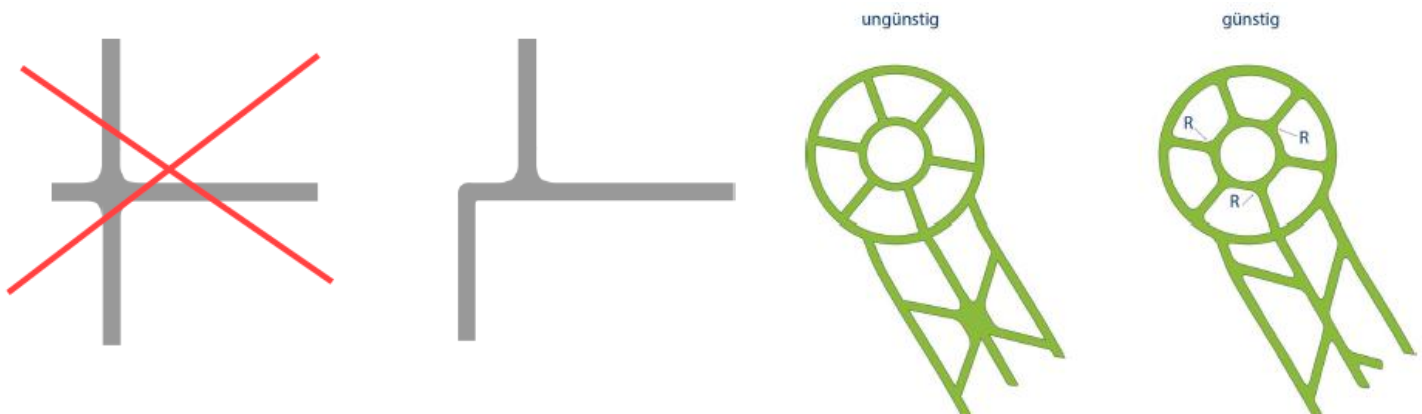
- Einbringen von Nuten
- Definierte Oberflächen (z.B. Nocken, Narbung, Struktur)



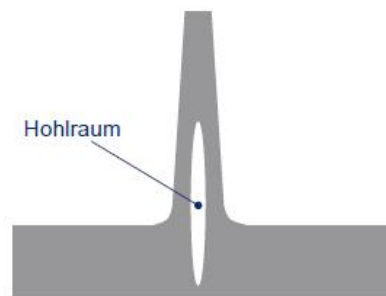
Gestaltung von Rippenkreuzungspunkten



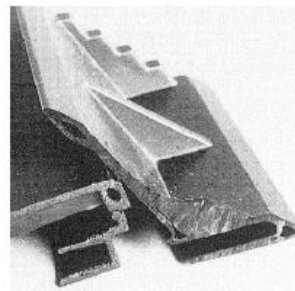
Vermeiden von Rippenkreuzungen → Verwendung von Kantenrippen statt Kreuzungspunkten



Hohlblasen von Rippen (mit Hilfe von GIT/WIT)



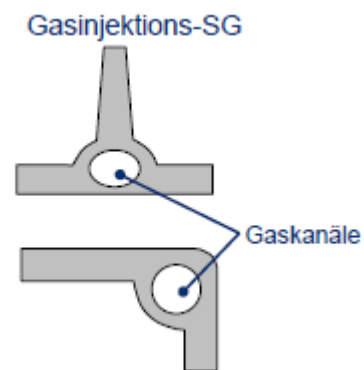
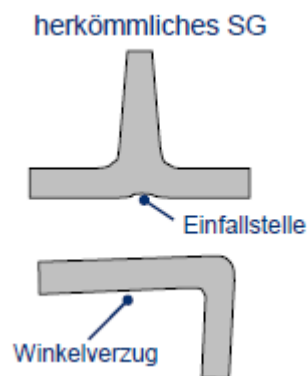
Quelle: Phillips/Engel/Schwertberg



Mit Gasinnendrucktechnik (GIT) hohlgeblasene Verstärkungsrippen zur Randverstärkung eines Fernsehgehäuses

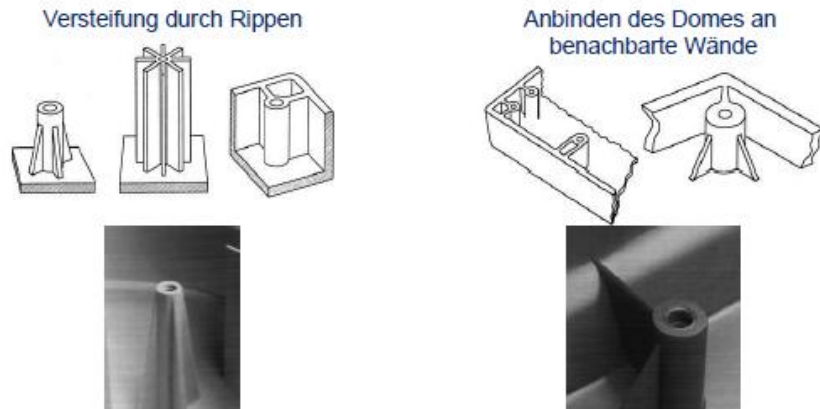
Anordnung von Gaskanälen

Typische Gaskanalgeometrien für das Gasinnendruck-Spritzgießen. Gaskanäle sind üblicherweise über Rippen hinaus, auch in Ecken oder anderen Gestaltungselementen mit erhöhter Wanddicke integriert.



Massenanhäufungen bei Schraubdomen

Vermeidung von Massenanhäufungen



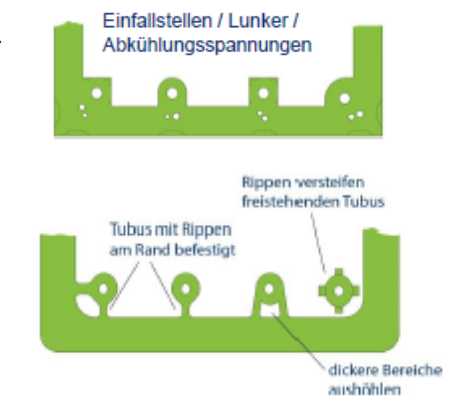
Gestaltungsrichtlinien

Für die Gestaltung von Schraubdomen gelten ähnliche Richtlinien wie für Rippen.



Durch die Materialanhäufung an Schraubdomen können sich Einfallstellen oder Hohlräume bilden.

Schraubdome sind daher normalerweise freistehend, versteift oder über dünne Rippen mit dem Bauteilrand verbunden, um die Biege- und Torsionssteifigkeit zu erhöhen und das Einschrauben zu erleichtern.



Eigenerwärmung von Kunststoffbauteilen

Dissipation bei schwingender Belastung

Aufgrund ihrer inneren Dämpfung setzen Kunststoffe dynamische Wechselbelastung in Dissipationswärme um

$$\Delta T = \frac{\sigma_a^2}{E(T)} \cdot d(T) \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{s}{\alpha(T)} = E(T) \cdot \varepsilon_a^2 \cdot d(T) \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{s}{\alpha(T)}$$

mit	ΔT :	Temperaturerhöhung
	σ_a, ε_a :	Schwingungsamplitude
	$E(T)$:	E-Modul
	$d(T)$:	mechanischer Verlustfaktor
	f :	Belastungsfrequenz
	s :	Wanddicke
	$\alpha(T)$:	Wärmeübergangskoeffizient

- Da E , d und α temperaturabhängig sind, muss ΔT iterativ bestimmt werden
- Es kann zu einem Temperaturgleichgewicht oder einem Aufschaukeln kommen

Zusammenfassung: Werkstoffgerechtes Konstruieren

- Große Verformbarkeit von Kunststoffen erlaubt charakteristische Konstruktionen (selbstschneidende Schraubverbindungen, Filmscharniere, Schnappverbindungen)
- Ausnutzung der Gestaltungsvielfalt: Herstellung im Urformverfahren gestattet Funktionsintegration ohne anschließende Montage
- Geringer E-Modul kann durch Verrippung/andere Versteifungsmaßnahmen kompensiert werden
- Thermische Eigenschaften von Kunststoffen erfordern dünnwandige, schwindungs- und verzugsarm herstellbare Konstruktionen
- Gleiche Wanddicken vorsehen für gleichmäßige Abkühlung und Schwindung
- Berücksichtigung von Abkühl-Eigenstressungen, insbesondere bei Materialverbindungen
- Spannungsführende Teile ohne Kerben und Ecken!
- Kriechneigung und Wärmedehnung beachten!

Übersicht: Werkstoffgerechtes Konstruieren

Bei der Gestaltung von Spritzgießprodukten gilt:

- Gestaltungsspielraum im Urformprozess nutzen
- Gleiche Wanddicken vorsehen für gleichmäßige Abkühlung und Schwindung
- Masseanhäufungen vermeiden (Gefahr von Lunkern und Eigenstressungen)
- Nutzung von Rippen zur geometrischen Versteifung (Ausgleich der geringen mechanischen Werkstoffeigenschaften)
- Rippen spritzgießgerecht gestalten zur Einfallstellenvermeidung auf der Rückseite
- Anbindung von Schraubtuben über Stege
- Großflächige ebene Fläche vermeiden, um Verwerfungen zu reduzieren
- Ecken und Kanten mit Radien versehen (geringere Kerbspannungen)

Bei der Gestaltung von Pressprodukten gilt:

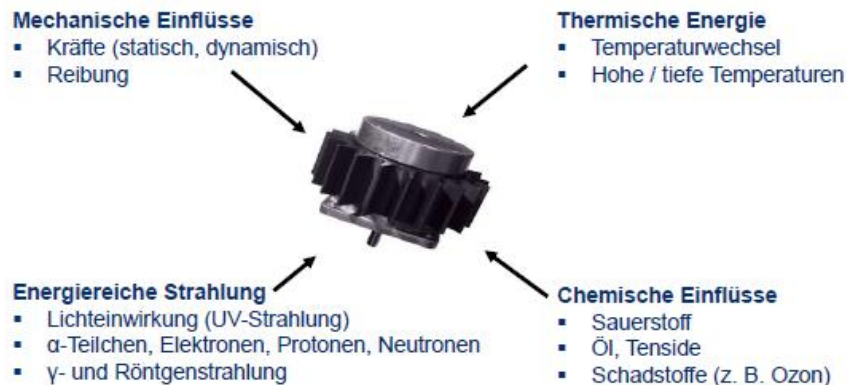
- Wanddicke so gering wie möglich, um eine geringere Zykluszeit zu realisieren
- Gleiche Wanddicken vorsehen für gleichmäßige Abkühlung und Schwindung
- Masseanhäufungen vermeiden (Gefahr von Lunkern und Eigenstressungen)
- Rippen pressgerecht gestalten, damit keine Einfallstellen auf der Rückseite zu erkennen sind
- Ecken und Kanten mit Radien versehen (geringere Kerbspannungen)

Bei der Gestaltung von Blasformprodukten gilt:

- Gleiche Wanddicken vorsehen für gleichmäßige Abkühlung und Schwindung
- Masseanhäufungen vermeiden (Gefahr von Lunkern und Eigenstressungen)
- Großflächige ebene Flächen vermeiden, um Verwerfungen zu reduzieren
- Butzen so klein wie möglich halten, um Material zu sparen

6) Beanspruchungsgerechtes Konstruieren

Beanspruchungen im Einsatz



Systembedingte Einflüsse, die oft erst im Praxiseinsatz klar werden



Verrippung

Erhöhung des Flächenträgheitsmoments durch Rippen

Das Flächenträgheitsmoment eines Bauteils erhöht sich mit steigendem Abstand des Schwerpunkts zur Drehachse (Steiner-Anteil)

- Höhere Bauteilsteifigkeit im Vergleich zu einem massiven Bauteil
- Materialeinsparung bei gleicher Tragfähigkeit → Kosteneinsparung
- Reduzierung von Gewicht und Kühlzeit → Kosteneinsparung



Platte 400 · 400 · 10

Belastung	8 kg
Durchbiegung	1,6 mm
Gewicht	1680 g
Kühlzeit	200 s

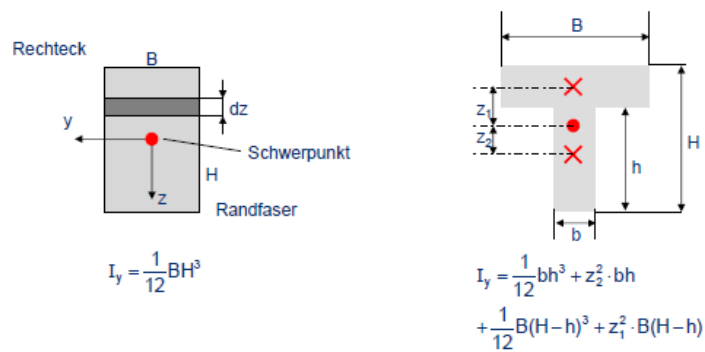


Platte 400 · 400 · 4
(mit 4 Rippen 30 · 2,7)

Belastung	8 kg
Durchbiegung	1,6 mm
Gewicht	810 g
Kühlzeit	50 s

Konventionelle Auslegung einzelner Baugruppen

Flächenträgheitsmoment I_y

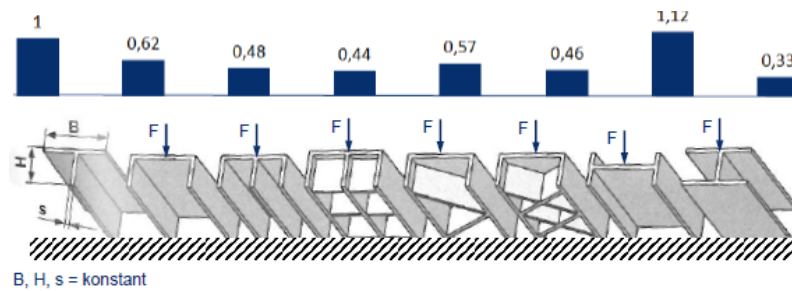


Multiplikation mit E-Modul: $E \cdot I_y$ (Biegesteifigkeit)

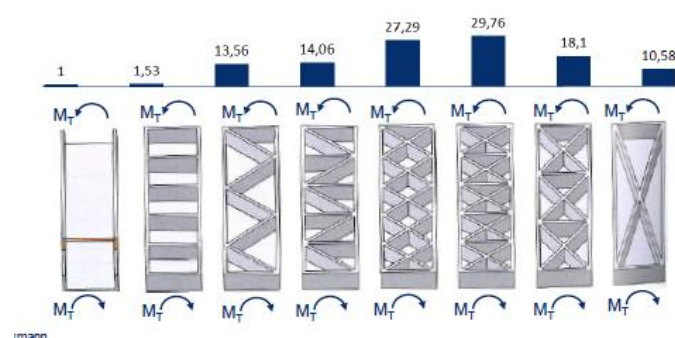
Geometrische Versteifung von Kunststoffbauteilen

Künstliche Rippen zur Versteifung

Relative Nachgiebigkeit unterschiedlicher Profile:



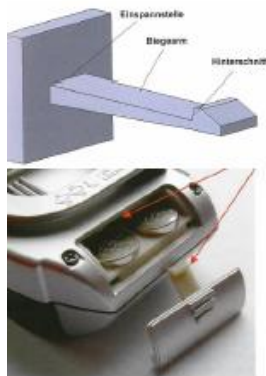
Relative Torsionssteifigkeit unterschiedlicher Profile:



Auslegung von Schnappverbindungen

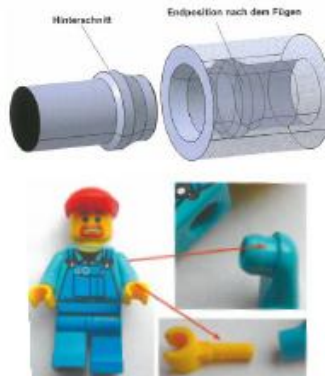
Integration von Funktionselementen

Schnapphaken



Bildquelle: Brinkmann

Ringschnappverbindung



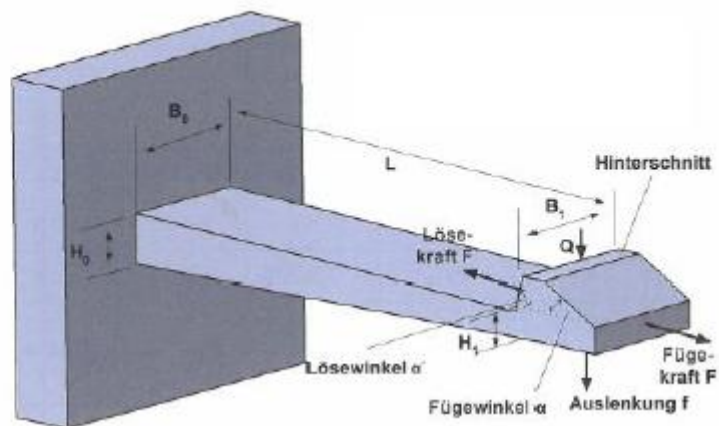
Torsionsschnappverbindung



Auslegung von Schnapphaken

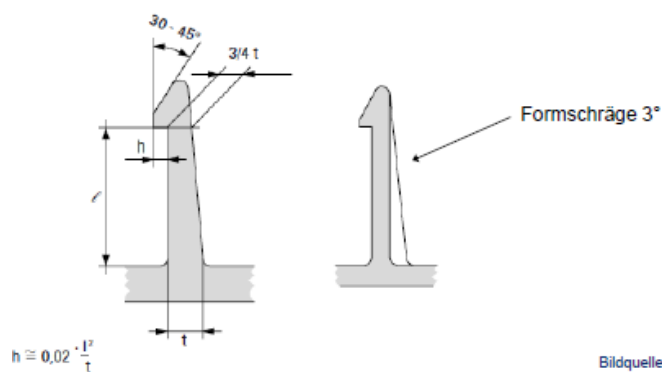
Geometrische Kenngrößen

Prinzipskizze: Schnapphaken mit Kenngrößen



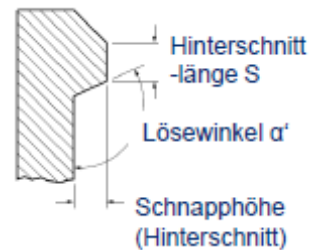
Fügewinkel und Lösewinkel

Typische Fügewinkel für eine geringe Montagekraft bzw. typische Lösewinkel bei nicht häufigem Lösen liegen zwischen 15° und 30° (max. 60°)



Bildquelle: DuPont

Vermeidung des Lösens durch Retardation/Kriechen

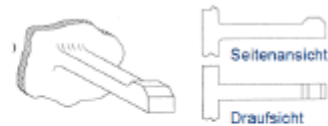


→ Zug- statt Biegebeanspruchung d.h.

- Lösewinkel α' von 90° (Verbindung unlösbar) oder
- Großer Lösungswinkel α' und große Hinterschnittlänge S

Querschnitt

**Schnappverschluss
(konstanter Querschnitt)**



**sich verjüngender Schnappverschluss
(verjüngt sich in Dickenrichtung)**



**sich verjüngender Schnappverschluss
(verjüngt sich in Dicke und Breite)**



Schnappverschlüsse mit verjüngendem Querschnitt haben eine gleichmäßigere Spannungsverteilung und eine höhere zulässige Durchbiegung als Schnappverschlüsse mit konstantem Querschnitt.

Konstruktive Optimierung

- Ausreichend Nachgiebigkeit durch konstruktive Optimierung gewährleisten!

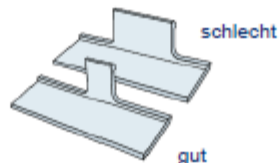
Ungünstige Federung



Günstige Federung im Bauteil

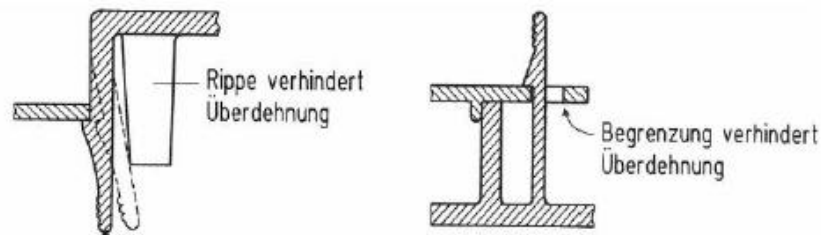


- Lange Schnapphaken anstreben oder Torsionsschnappverbindung (Geringere Randfaserdehnung)



Zusatzfunktionen

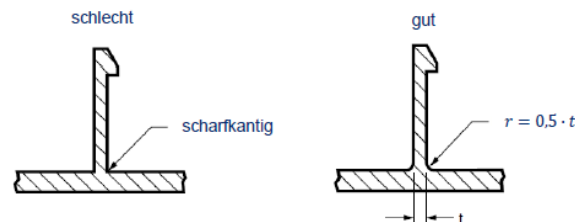
- Überdehnungssicherung bei besonders dünnen, bruchgefährdeten Schnapphaken



- Haltesicherung und Verschlussglieder
- Öffnungshilfen (z.B. nur für spezielle Werkzeuge)
- Kraftspeicher mittels einer geringen Vorspannung (Ausgleich von Spiel und Toleranz)

Ausrundung der Formteilwanderung

Ausreichende Verrundung des Schnapphakens zur Formteilwanderung ($r > 0.5 \text{ mm}$) vorsehen!



Ausrundungsradius

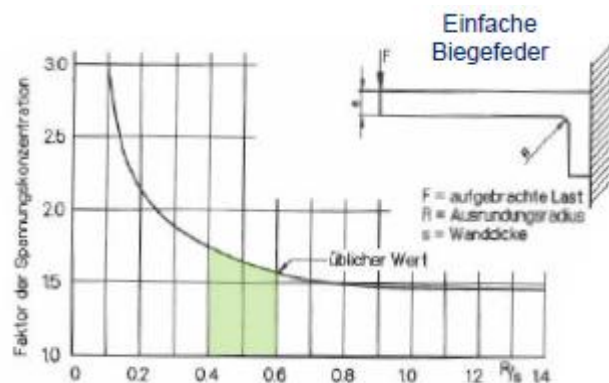
Ausrundungsradius an Eckbereichen

Das Verhältnis des Ausrundungsradius R zur Wanddicke s sollte grundsätzlich im folgenden Bereich liegen:

$$0.4 \leq \frac{R}{s} \leq 0.6$$

empfohlener Mindestradius
für Ecken $r_{\min}$:

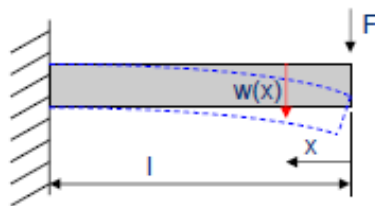
$$0.2 \text{ mm} \leq r_{\min} \leq 0.5 \text{ mm}$$



Schädigungsbeginn in Kunststoffen: Fließzonen und Crazes

Kunststoffe sind weniger kerbanfällig als Metalle, da sich in den Fließzonen „Brücken“ durch Fibrillen bilden, die eine Ausweitung zum Bruch zunächst „bremsen“. Dennoch Radien vorsehen!

Biegebalken



Biegebalken:

Für diesen eingespannten Balken konstanter Biegesteifigkeit $E \cdot I_y$ soll die Biegelinie $w(x)$ der neutralen Faser bestimmt werden.

Biegemomentenverlauf $M_y(x) = -F \cdot x$

Es gilt bei konstanter Biegespannung: $E \cdot I_y \cdot w''(x) = -M_y(x)$ $E \cdot I_y \cdot w''(x) = F \cdot x$

1. Integration: $E \cdot I_y \cdot w'(x) = F \cdot \frac{x^2}{2} + C_1$

2. Integration: $E \cdot I_y \cdot w(x) = F \cdot \frac{x^3}{6} + C_1 \cdot x + C_2$

Randbedingungen:

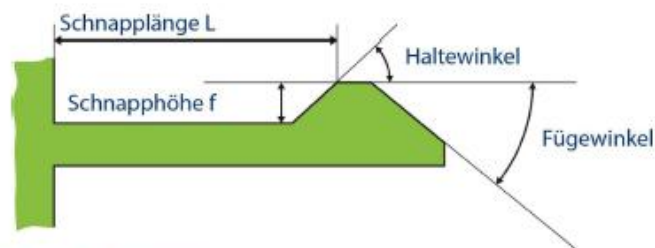
$$\left. \begin{array}{l} w(x=l) = 0 \\ w'(x=l) = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} 0 = F \cdot \frac{x^3}{6} + C_1 \cdot l + C_2 \\ 0 = F \cdot \frac{x^2}{2} + C_1 \end{array}$$

$$\left. \begin{array}{l} C_1 = -F \frac{l^2}{2} \\ C_2 = F \frac{l^3}{3} \end{array} \right\}$$

Biegelinie: $w(x) = \frac{F}{6EI_y} (x^3 - 3l^2x + 2l^3)$

max. Durchbiegung bei $x = 0$: $w(0) = \frac{l^3}{3EI_y} \cdot F$

Federnder Biegebalken/Schnapphaken



Randfaserdehnung beim Fügen

$$\varepsilon_{rand} = f \cdot \frac{3h}{2l^2}$$

Schnappverbindung muss im eingeschnappten Zustand entlastet sein, um nicht zu relaxieren.

Richtwerte für zulässige Kurzzeit-Dehnung

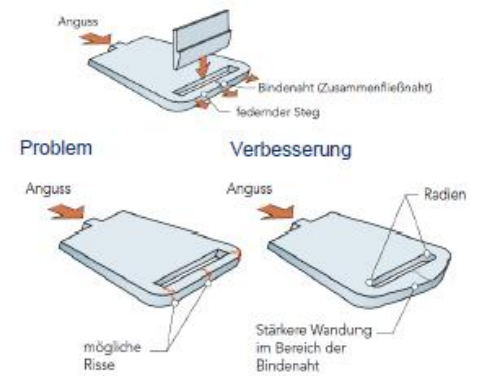
Schnappverbindungen werden bei Lösen/Verbinden mechanisch belastet!

ungefüllte teilkristalline Thermoplaste	ε_{zul}	ungefüllte amorphe Thermoplaste	ε_{zul}	glasfaserverstärkte Thermoplaste	ε_{zul}
PE	8,0 %	PC	4,0 %	30 % GF-PA	2,0 %
PP	6,0 %	PC + ABS	3,0 %	30 % GF-PA trocken	1,5 %
PA feucht	6,0 %	ABS	2,5 %	30 % GF-PC	1,8 %
PA trocken	4,0 %	CAB	2,5 %	30 % GF-PBTP	1,5 %
POM	6,0 %	PVC	2,0 %	30 % GF-ABS	1,2 %
PBT	5,0 %	PS	1,8 %	45 % GF-PPS	1,0 %

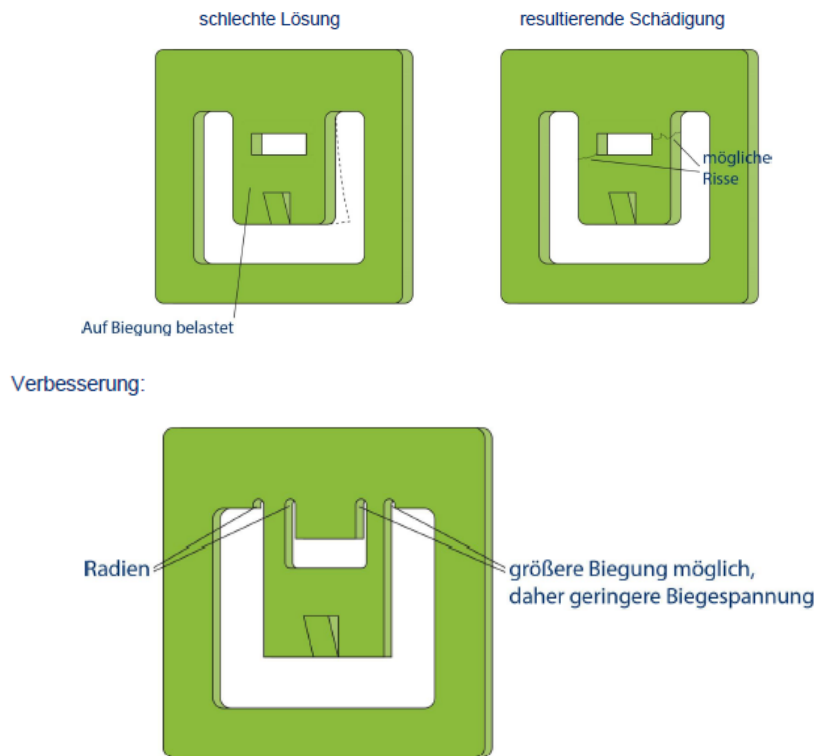
Richtwerte für zulässige Dehnung ε_{zul} von Schnappverbindungen bei kurzzeitiger Beanspruchung während des Fügevorgangs.

Gestaltungsrichtlinien

An Schwachstellen des Querschnitts (Fließnähte, Angusstur-
bulenzen, Lunker) Radien anbringen oder Wanddicke erhö-
hen, scharfkantige Durchbrüche vermeiden



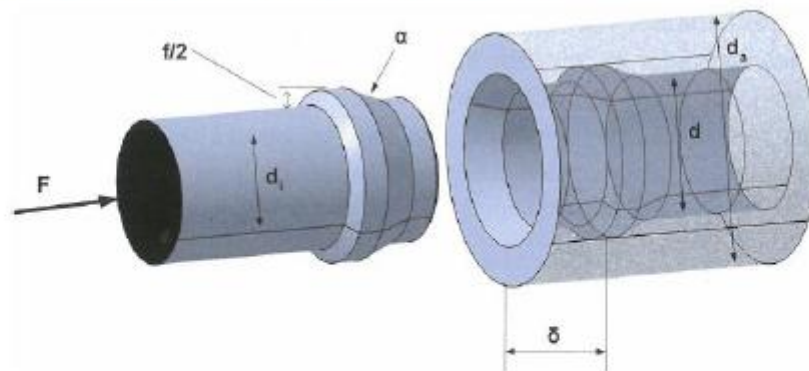
Auftreten von Kerbspannungseffekten



Auslegung von Ringschnappverbindungen

Geometrische Kenngrößen

Prinzipskizze Ringschnappverbindung mit Kenngrößen



d = Fügedurchmesser
 d_a = Außendurchmesser
 d_i = Innendurchmesser

δ = Abstand vom Bohrungsanfang
 f = Hinterschnitt
 α = Fügewinkel

Bildquelle: Brinkmann

Lage des Wulstes (Schnappnut)

	Wulst am Außenteil (WA)	Wulst am Innenteil (WI)
Endferne Schnappverbindung (EF): $\delta \leq 1,8 \cdot \sqrt{d \cdot s}$		
Endnahe Schnappverbindung (EN): $\delta \geq 1,8 \cdot \sqrt{d \cdot s}$		

Auslegung von Schraubdomen

Gestaltungsrichtlinien

Entlastungssenkung

→ verhindert Spannungsüberlagerung

runder Kernlochquerschnitt

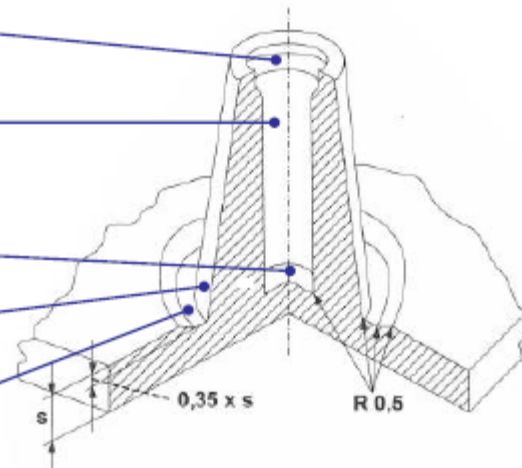
→ Vermeidung von Spannungsspitzen

Kernloch ~1/3 in Boden eintauchen

Konizität von 0,5°-1°

→ bessere Entformbarkeit

Aussparung um den Schraubdomfuß,
Tiefe ~ 1/3 der Bodenwanddicke



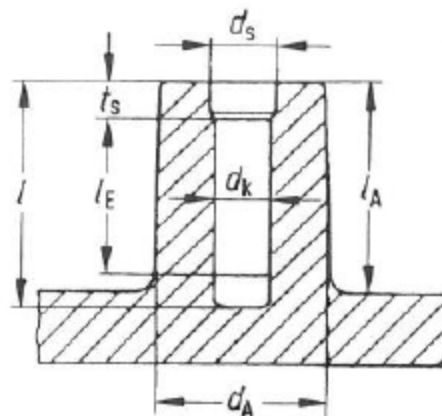
Bildquelle: Ehrenstein, G.

Empfohlener Wert für den Durchmesser der
Entlastungssenkung d_s und die Tiefe t_s

$$d_s = 1,1 \cdot d$$

$$t_s = 0,3 \text{ bis } 0,6 \cdot d$$

mit d = Nenndurchmesser der Schraube



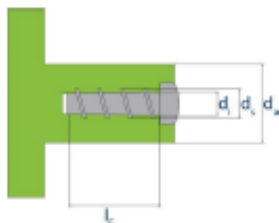
Scherschub- und Zugspannungen

Abscheren des Gewindes

Auftretende Scherschubspannung:

$$\tau_s = \frac{F_1}{d_s \cdot l_E \cdot \pi}$$

mit F_1 : Schraubenlängskraft
 d_s : Schraubenaußendurchmesser
 l_E : Einschraublänge



Bruch durch Zugspannung

Auftretende Zugspannung:

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{A_{\min}}$$

$A_{\min}$: kleinster Tubusquerschnitt
→ $A_{\min} = \pi/4 (d_s^2 - d_k^2)$
 d_s : Tubusaußendurchmesser

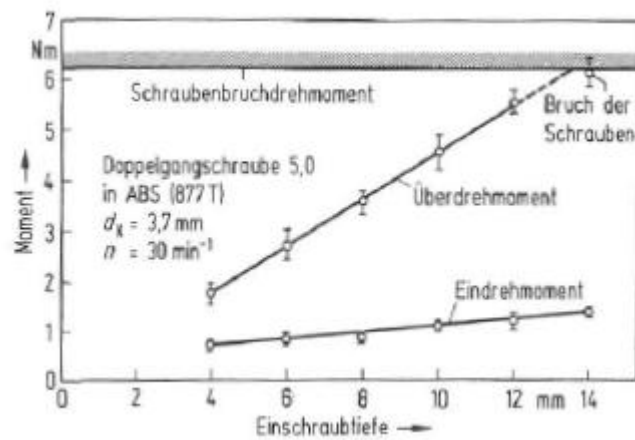
Richtlinien zur Abschätzung

- $0,7 d_s < d_k < 0,95 d_s$
- $1,8 d_s < d_a < 2,5 d_s$
- $2,0 d_s < l_E < 3,0 d_s$

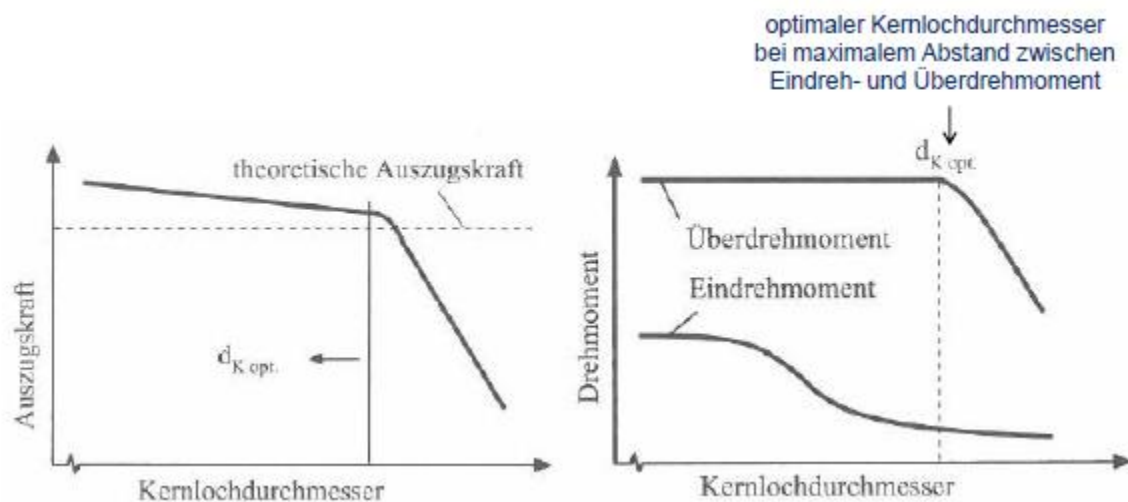
Quellen: Erhard, Brinkma

Eindrehmoment und Überdrehmoment

Eindrehmoment und Überdrehmoment in Abhängigkeit von der Einschraubtiefe



Anzugskraft und Drehmoment



Vermeiden von Setzverlusten bei Schraubpunkten

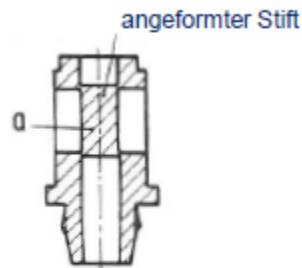
- Zusatzrippen
- Metallische Setzhülsen
- Großflächige Unterlegscheiben

Auslegung von Ringschnappverbindungen

Zusatzfunktion Haltesicherung

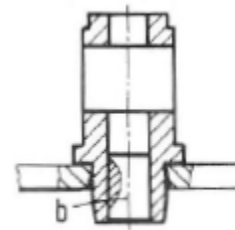
Haltesicherung durch Füllstift

a) vor der Montage:



Der Füllstift ist nur durch dünne Schwimmhäute direkt an das Bauteil angebunden.

b) nach der Montage:



Der Füllstift wird durch die Fügeachse gestoßen.

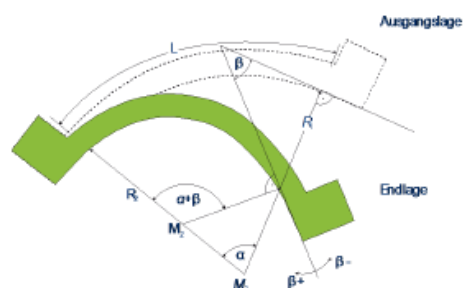
Quelle: Siege

Auslegung von Filmscharnieren

Lasteinleitung ohne lokale Spannungsspitzen



Ermittlung der Randfaserdehnung $\varepsilon_{b \text{ vor}}$



Aus den geometrischen Abmessungen lässt sich unter Berücksichtigung einer Verformung von $\pm \beta$ die vorhandene Randfaserdehnung $\varepsilon_{b \text{ vor}}$ bestimmen:

$$\varepsilon_{b \text{ vor}} = \frac{h}{2} \cdot \left(\frac{\alpha}{L} - \frac{\alpha \pm \beta}{L} \right)$$

Alterung und Lebensdauervorhersage

Grundlagen

Alterung (DIN 50035) ist die Gesamtheit aller im Laufe der Zeit in einem Material irreversibel ablaufenden chemischen und physikalischen Vorgänge.

Erscheinungsformen



Entscheidung für Versagensmechanismus und Grenzwert

Tatsächliche Einsatzbedingungen deutlich vor Augen führen:

- mechanische Belastungen (statisch, dynamisch, ...)
- Temperatur (min., max., Zyklen, ...)
- Medien (Kühlmittel, Kraftstoffe, ...)
- Strahlung (UV-, Röntgen-, ...)

Entscheidung für relevanten Versagensmechanismus:

- Suche nach Hauptausfallkriterium
- Überlegung der richtigen Beschleunigungsfaktoren
 - Temperatur
 - Medienkonzentration
 - Zyklen
 - kombinierte Einflüsse

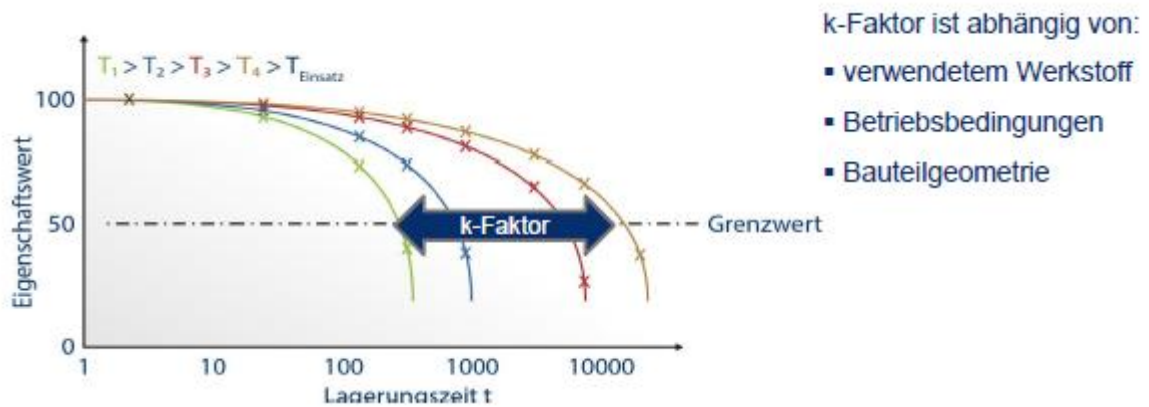
➔ Grenzwert festlegen, der das eventuelle Bauteilversagen hinreichend charakterisiert (z.B. Abfall der Schlagzähigkeit um 50 %)

Konzept der zeitraffenden Einlagerung

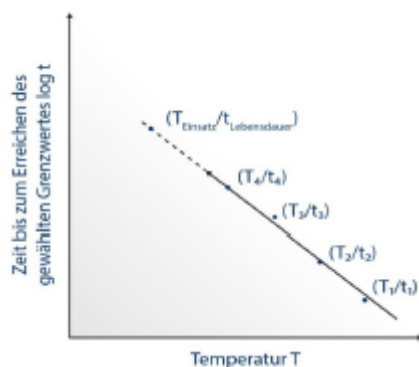
- Zeitraffende Einlagerung von Proben (z.B. höhere mechanische Belastung, zyklische Belastung, höhere Temperatur oder Medienkonzentration)
- Entnahme der Probe nach verschiedenen Zeiten und Prüfung auf charakteristische Eigenschaft (z.B. Abfall der Schlagzähigkeit um 50%)
- Durchführen der Messungen bei mindestens drei weiteren (höheren) Temperaturen, Entnahme und Prüfung der Proben wie oben

Kalibrieren der Arrheniusfunktion

Auftragen der Messergebnisse (Lagerzeit wird meist logarithmisch aufgetragen) Kalibrierung der sog. Arrheniusfunktion mit mindestens drei Wertepaaren für Temperatur und Zeit



Extrapolation der Lebensdauer auf Einsatztemperatur



Lebensdauerkurve

Auftragung der Zeiten t bis zum Erreichen des gleichen gewählten Grenzwertes bei mind. zwei, hier vier versch. Temperaturen (T_1, T_2, T_3, T_4), Extrapolation auf Einsatztemperatur führt zu Abschätzung der Lebensdauer

Achtung!

- Beschleunigungsfaktoren verkürzen den Zeitaufwand, führen aber zu Ungenauigkeiten
- Extrapolationen über mehr als eine Zeitdekade gelten als kritisch (Gültigkeit des Arrhenius-Ansatzes gilt dann als umstritten)
- Unbekannte Versagensmechanismen können nicht zeitraffend erfasst werden

Grenzen der zeitraffenden Prüfung

Synergismen zwischen verschiedenen Beanspruchungsarten können durch Einlagerungsversuche nur schwer abgebildet werden.



Zusätzlich: Strahlungsschädigung kann eine Stufenfunktion sein: Solange eine gewisse Dosis nicht überschritten wird → keine Schädigung

Bsp.: UV-Strahlung der Sonne auf menschliche Haut: Als Grenze zur Einstufung einer gerade noch verträglichen Strahleneinwirkung, gilt die sog. „Erythemschwelle“: Sie bezeichnet die höchste UV-Dosis, bei der einige Stunden nach der Einwirkung von Sonne noch keine Hautrötung auftritt.

Prüfung der Beständigkeit

Bewitterungstest

- Freiluftbewitterung
- Künstliche Bewitterung

Übertragbarkeit nur bei Vorliegen von Erfahrungswerten möglich

7) Bauteildimensionierung

Beanspruchungsgerechte Konstruktion:

- Bauteildimensionierung
- Werkstoffmodelle
- Einführung in die FEM

Bauteildimensionierung

Ablaufschema einer Bauteilauslegung

Mechanische Auslegung (Vorgehensweise)



Grundlagen

Basis zur Dimensionierung

- Vorgegebene Belastungen (Lastannahmen)
- Gemessene Werkstoffkennwerte oder Werkstoffkennwerte aus Datenbanken
- Strukturmechanische Berechnungsverfahren
- Berücksichtigung von Umgebungseinflüssen
- Auslegeszenarien bis zum Erreichen des Gebrauchs- oder Lebensendes

Achtung: eine unnötige Überdimensionierung führt zu

- Steigerung der Bauteilkosten
- Erhöhung des Gewichts
- Vergrößerung der Bauteilmaße
- Entscheidung gegen die Lösung aus Kunststoff (!)

Probleme: Realität verhält sich anders als geplant!

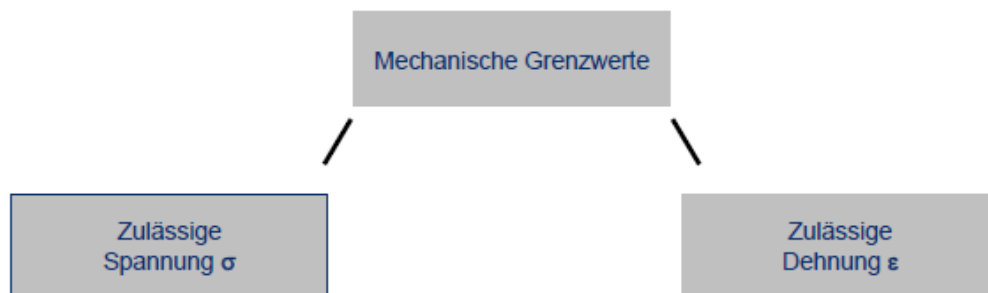
- Änderungen der Lastannahmen im Betrieb
- Strukturberechnungsmethoden sind evtl. falsch vereinfacht
- Werkstoffkennwerte streuen in gewissen Grenzen
- Änderung der Umgebungseinflüsse
- Vorschädigung des Bauteils bei der Fertigung oder im Betrieb

Diese Risiken müssen durch ausreichende Berücksichtigung wie Toleranzen gegenüber Unzulänglichkeiten oder angewendeten Methoden, unsicheren Abschätzungen oder Schwankungen der Beanspruchung oder potentiell auftretenden Schäden abgesichert werden.

→ Einführung eines Sicherheitsfaktors

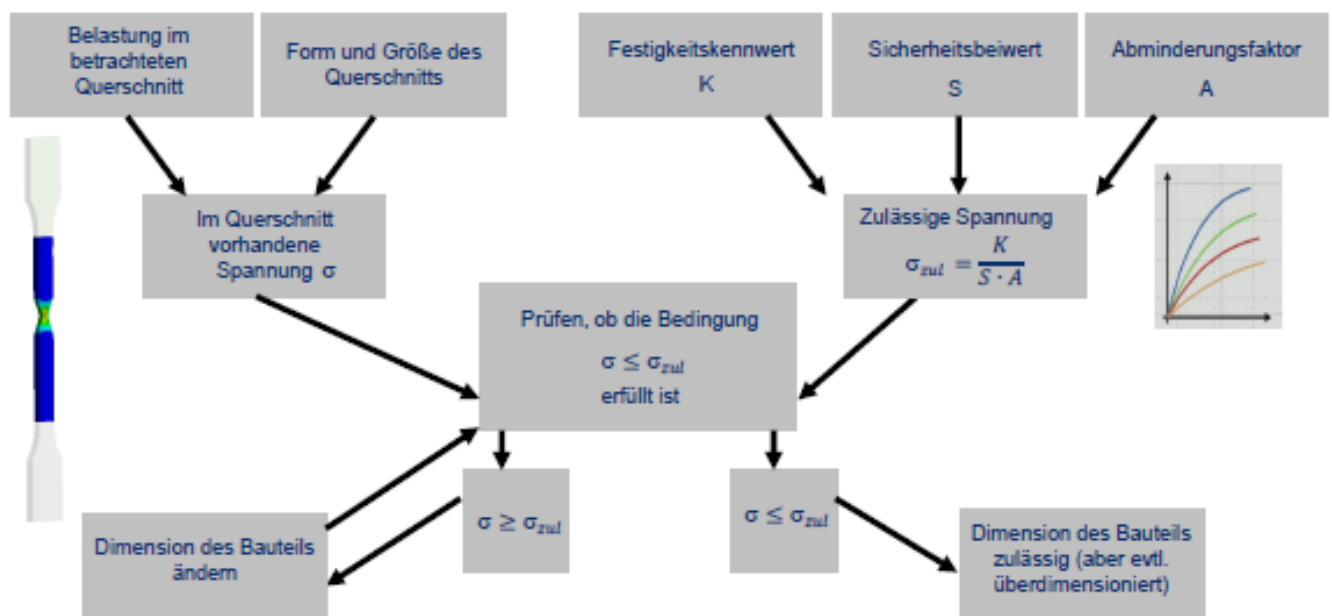
Zwei unterschiedliche Dimensionierungsgrenzen

Mechanische Dimensionierung von Kunststoffbauteilen erfolgt, wie auch bei anderen Werkstoffen, gegen Grenzwerte. Dabei finden 2 Möglichkeiten Anwendung:



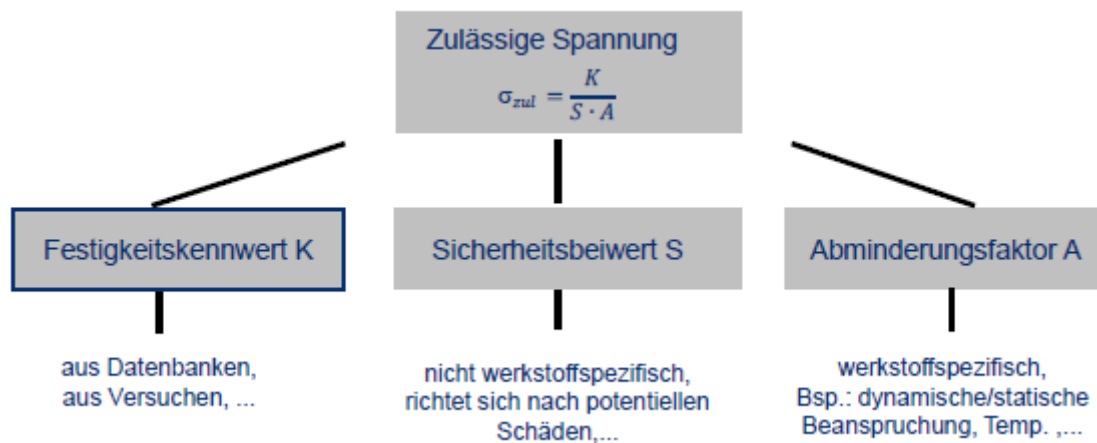
→ Nachfolgend werden beide Möglichkeiten erläutert.

Dimensionierung gegen zulässige Spannung



→ Abminderung des Risikos

Bestimmung einer zulässigen Spannung



Abminderungen werden multipliziert und führen u.U. zur drastischen Absenkung des Kennwertes.

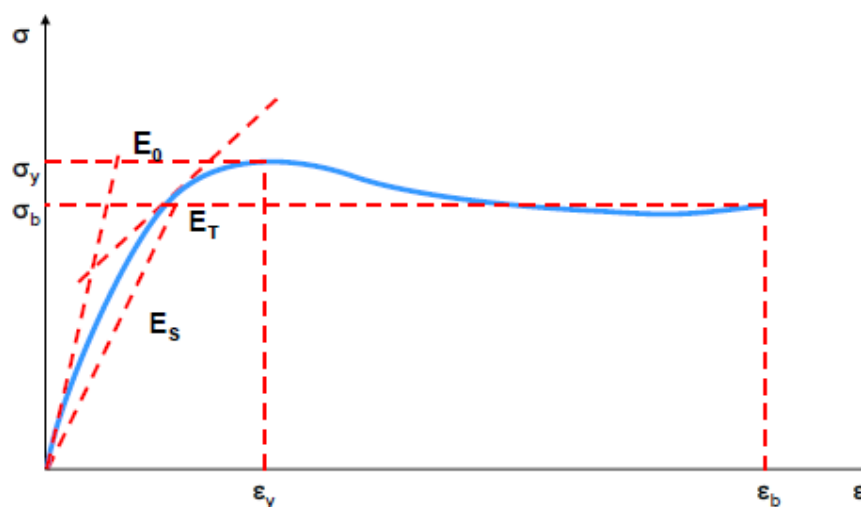
Abgrenzung zu klassischen Werkstoffen

Das Berechnen von Bauteilen aus Kunststoff ist viel schwieriger als aus klassischen Konstruktionswerkstoffen wie Stahl und Holz. Dies liegt v.a. an:

- Dem viskoelastischen Verformungsverhalten
- Starkem Einfluss von Zeit, Temperatur und Höhe der Belastung auf die Kennwerte
- Dem Fehlen von Kennwerten bei komplexer Beanspruchung
- Dem starken Einfluss der Verarbeitung auf die Eigenschaften

Da es häufig nicht möglich ist, Bauteile aus Kunststoff genau zu berechnen, sind Näherungsverfahren und überschlägige Berechnungen geboten.

Erinnerung: Kennwerte aus dem Zugversuch



Streckdehnung	ε_y	Streckspannung σ_y	
Bruchdehnung	ε_b	Bruchspannung σ_b	
Ursprungs-Elastizitätsmodul	E_0	Zusammenhang zwischen erster Spannung und erster Verformung („Widerstand gegen Verformung“)	$E_0 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$
Sekantenmodul	E_s	Widerstand gegen Verformung zwischen Nullpunkt+Lastpunkt	
Tangentenmodul	E_T	Widerstand gegen Verformung am Lastpunkt gegenüber zunehmender Belastung	
Kriechmodul	E_C	Kennwert für zeitabhängige Belastungen: Verhalten zwischen Spannung und sich zeitabhängig einstellender Verformung	$E_C = \frac{\sigma}{\varepsilon_{ges}(t)}$

Festigkeitskennwerte

Kennwerte hängen bei Kunststoffen stark von den Fertigungs- und Prüfbedingungen ab. Daher ist bei Vergleich (auch ähnlicher Kunststoffe) Vorsicht geboten.

Wenn gegen Kurzzeit-Festigkeitswert K dimensioniert werden soll, kann man verschiedene Spannungs- oder Festigkeitswerte heranziehen:

- Streckspannung: Zugspannung bei der die Steigung der σ/ε - Kurve erstmals den Wert 0 annimmt
- Zugfestigkeit: Spannung bei Höchstkraft des Zugversuchs
- Reißfestigkeit: falls keine Streckspannung oder %-Dehnspannung ermittelt werden kann
- X%-Dehnspannung: Zugspannung, bei der die σ/ε - Kurve vom linearen Verlauf um x% Dehnung abweicht. Diese wird insbesondere genutzt, wenn ein Werkstoff keine ausgeprägte Streckspannung und ein hohes Dehnvermögen aufweist (sehr nichtlineares Verhalten)

Sicherheitsfaktoren

→ gibt an, um welchen Faktor die Tragfähigkeit eines Bauteils höher ausgelegt werden muss, damit dieses in Gebrauch gerade noch versagt.

Funktion:

- Vermeidung des vorzeitigen Versagens aufgrund unabwägbarer Einflüsse
- „eingeplante“ Überdimensionierung zur Vermeidung von Risiken

Es gilt:

- Maßvoller Umgang mit den Werten sollte angestrebt werden, da Kunststoffe generell geringer belastbar sind als Metalle
- Sicherheitsbeiwerte sollte behutsam gewählt werden, da ansonsten viele Anwendungen in Kunststoff nicht realisierbar sind

Für Festlegung der Sicherheitsfaktoren S gibt es eine Reihe von Gesichtspunkten, die nur wenig werkstoffbedingt sind:

- Für technisch wichtige Fälle werden Sicherheitsbeiwerte S in Bemessungsvorschriften, Richtlinien, DIN-Blättern oder Werksunterlagen festgelegt, durch den Konsens

anerkannter Fachleute aufgrund vorliegender Erfahrungen und Untersuchungsergebnisse

- Trotz gleicher Beanspruchungszustände können die S in versch. Ländern aufgrund unterschiedlicher Erfahrung auch verschieden sein
- Grad der Gefährdung von Lebewesen und Dingen bei Versagen wird bei der Überdimensionierung durch S berücksichtigt
- Je genauer die Gebrauchsbeanspruchung vorhersehbar, desto niedriger können S gewählt werden
- Je sicherer und genauer die Berechnungsmethoden sind und je zuverlässiger das Werkstoffverhalten bewertet werden kann, um so niedriger wird S festgelegt
- Versagensbetrachtungen wegen Instabilität müssen mit größeren S ausgeführt werden, weil geringe Abweichungen von der Soll-Geometrie und der beabsichtigten Krafteinteilung bereits zu einer Belastungsüberhöhung führen können
- Bei inhomogenen Beanspruchungszuständen muss bei Verwendung von Werkstoffkennwerten, die unter homogener Spannungsverteilung ermittelt wurden, meist ein erhöhter S verwendet werden
- Bauteile aus Kunststoffen mit starker Kriechneigung und erhöhter Beeinflussbarkeit durch Umweltfaktoren, müssen neben den werkstoffbedingten Abminderungsfaktoren A auch erhöhte S aufweisen.
- Teilkristalline Thermoplaste können wegen ihres duktilen Werkstoffverhaltens mit einem niedrigeren S belegt werden als amorphe Thermoplaste, Duomere oder faserverstärkte Kunststoffe

Die S sind dem technischen Fortschritt der Fertigungstechnik, der Materialqualität, den Berechnungsmöglichkeiten, den Erfahrungen, den Kenntnissen, den Beanspruchungszuständen usw. anzupassen. → Beispiele für Sicherheitsfaktoren:

- $S_{\min} > 2$: Berechnung gegen Bruch
- $S_{\min} > 3$: Berechnung gegen Knicken und Beulen
- $S_{\min} > 1,2$: bei Berechnung gegen Schadensspannung durch Rissbildung, mit der zusätzlichen Bedingung $S_{\min} > 2$ gegen Festigkeit
- $S_{\min} = 1$: Berechnung gegen $S_{0,5\%}$ mit der zusätzlichen Bedingung $S_{\min} > 2$ gegen Festigkeit

Abminderungsfaktoren

$$A = \frac{\sigma_{\text{Zug (ohne Einwirkung)}}}{\sigma_{\text{Zug (mit Einwirkung)}}}$$

Abminderungen werden multipliziert und führen u.U. zur drastischen Absenkung des Kennwertes.

A_{dyn} = dyn. Belastung

$A_{\text{ST.}}$ = Zeitstandbelastung

A_A = Alterung

A_T = Temperatureinfluss

A_W = Feuchteinfluss

A_K = Kerbeinfluss

A_{BN} = Bindenahteinfluss

A_F = Fertigungseinfluss (1,05 - 1,25)

Temperatureinfluss A_T

Berücksichtigt den Temperatureinfluss auf die Streckspannung bzw. die Zugfestigkeit in einem Temperaturbereich zwischen 0°C und 100°C. Abminderungsfaktor wird berechnet:

$$A_T = \frac{1}{1 - [k(T - 20)]}$$

Der k-Wert der Formel wird mittels einer linearen Interpolation der Streckgrenze im oben angegebenen Temperaturbereich ermittelt.

Quelle: Brinkmann

k-Wert bei 20 °C

Polymertyp	k-Wert
PA66	0,0112
PA6	0,0125
PBT	0,0095
PA GF und PBT GF	0,0071
POM	0,0082
ABS/PVC	0,0117
PC	0,0095
PP	0,0116
PE-HD	0,0113

Zeitdauer der statischen und dynamischen Belastung

A_{st} berücksichtigt die Zeitdauer der statischen Belastung

$A_{st} = 1,3-1,4$	bei einer Belastungsdauer von wenigen Stunden
$A_{st} = 1,6-1,7$	bei einer Belastungsdauer von Wochen
$A_{st} = 1,7-1,8$	bei einer Belastungsdauer von Monaten
$A_{st} = 2$	bei Belastungsdauer von einigen Jahren

A_{dyn} berücksichtigt den Festigkeitsabfall aufgrund dynamischer Belastung

$$A_{dyn} = 1,3 - 1,7$$

Einfluss von Bindenähten A_{BN}

Bindenähte in belasteten Bereichen erfordern erhebliche Abminderungen

Definition des Bindenaht-Faktors nach Oberbach:

$$A'_{BN} = \frac{\sigma_{mBN}}{\sigma}$$

mit

$$A = \frac{1}{A'_{BN}}$$

Quotient der Zugfestigkeit eines Prüfkörpers mit Bindenaht zu einem Prüfkörper ohne Bindenaht. Als Prüfkörper dient meist Zugstab.



mit Bindenaht
(zweiseitig
angegossen)

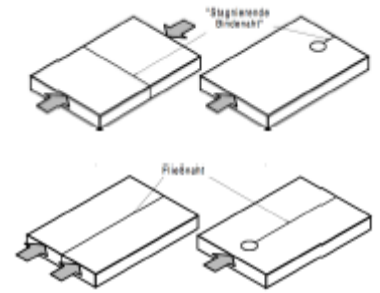
Quelle: Brinkmann/Ehrl



ohne Bindenaht
(einseitig
angegossen)

Es werden 2 Bindenahttypen unterschieden:

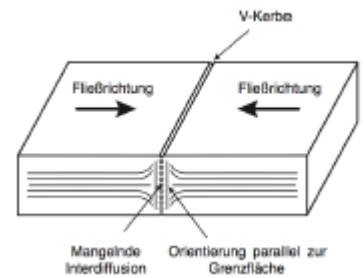
- Stagnierende Bindenähte: frontales Aufeinandertreffen zweier Schmelzströme
- Fließnähte: Schmelzströme treffen seitlich zusammen und fließen anschließend als vereinte Front weiter



Ursache für begrenzte Festigkeit an Bindenähten

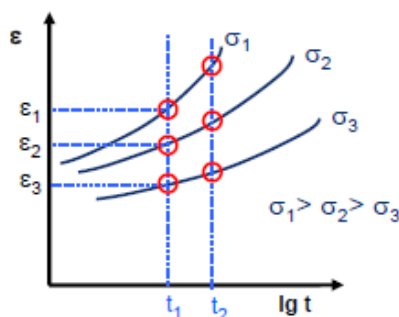
Es werden 3 Teilursachen unterschieden:

- Mangelnde Verschweißung der Schmelzfronten über die neu-geschaffene Grenzfläche hinweg
- Hohe Orientierung der Makromoleküle parallel zur Bindenaht
- Ausbildung einer an der Oberfläche um das Bauteil umlaufenden V-Kerbe

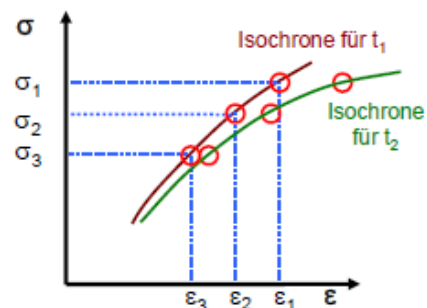


→ dynamische Beanspruchung kritischer als statische Beanspruchung

Ermittlung des isochronen Spannungs-Dehnungs-Diagramms

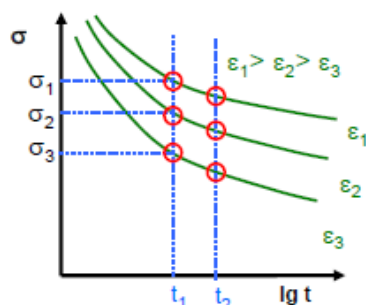


- Kriechkurven für verschiedene Spannungen $\sigma_{1,2,3}$
- Betrachtung des Zeitpunkts t_1 liefert Wertepaare: $(\sigma_1, \varepsilon_1)$, $(\sigma_2, \varepsilon_2)$, $(\sigma_3, \varepsilon_3)$

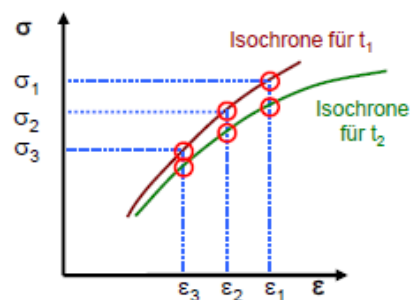


- Auftragen der Wertepaare im isochronen Spannungs-Dehnungs-Diagramm führt zu einer sog. Isochronen
- Wiederholung für verschiedene Zeitpunkte $t_{1,2, \dots}$

Alternative Ermittlung des isochronen Spannungs-Dehnungs-Diagramms



- Relaxationskurven für verschiedene Dehnungen $\varepsilon_{1,2,3}$
- Betrachtung des Zeitpunkts t_1 liefert Wertepaare: $(\sigma_1, \varepsilon_1)$, $(\sigma_2, \varepsilon_2)$, $(\sigma_3, \varepsilon_3)$



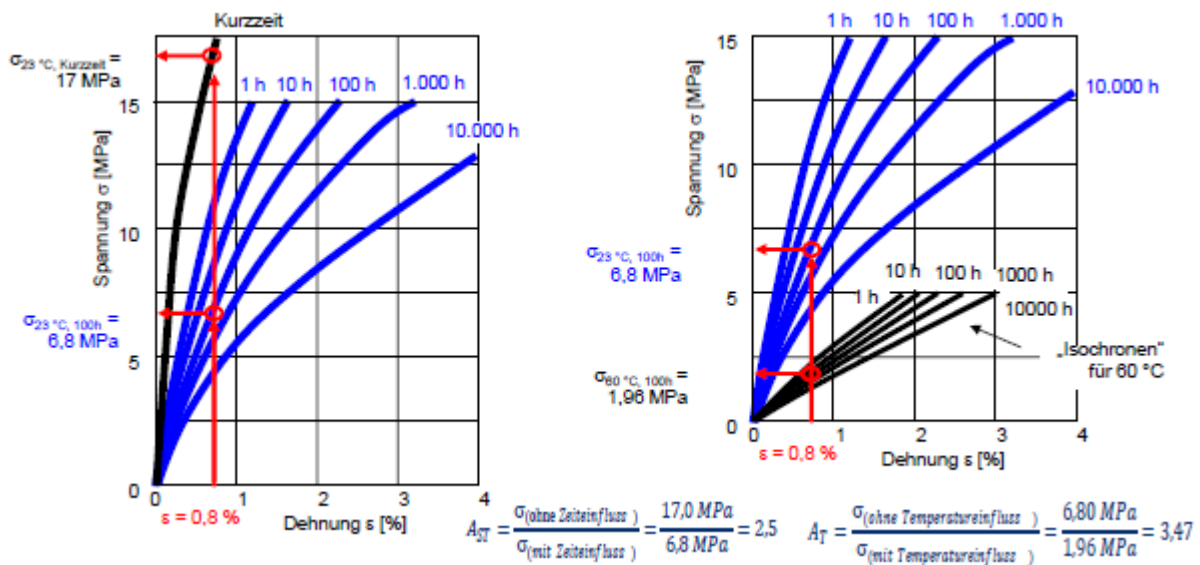
- Auftragen der Wertepaare im isochronen Spannungs-Dehnungs-Diagramm führt zu einer sog. Isochronen
- Wiederholung für verschiedene Zeitpunkte $t_{1,2, \dots}$

Isochrone Spannungs-Dehnungslinien werden in der Regel über Zeitstand-Zug-Versuche ermittelt.

Vorteile des isochronen Spannungs-Dehnungs-Diagramms

- Messpunktgenauigkeit ist bei niedrigen Lasten geringer, durch Festlegung des Nullpunkts als Fixpunkt (durch den die Diagramme verlaufen müssen $\rightarrow \sigma = 0, \varepsilon = 0$)
- Das linear-viskoelastische Verhalten des Werkstoffes kann sofort am linearen Verlauf der Kurve erkannt werden bzw. das nichtlinear-viskoelastische am nichtlinearen Verlauf
- Darstellung ist übersichtlich und lässt sich für kurze und lange Zeiten gleichzeitig darstellen und extrapolieren

Beurteilung der Abminderung durch die Zeit und Temperatur



Beispiele für zulässige Beanspruchungen

PA66GF30

90 °C, 10.000 h, spritzfrisch

$\varepsilon_{\text{zul}} = 1,1 \%$

$\sigma = 32 \text{ MPa}$

(aus isochronem σ - ε -Diagramm)

Abminderung Glykol: $A_1 = 1,96$

Abminderung Anisotropie: $A_2 = 1,49$

Sicherheitsbeiwert: $S = 1$

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{\sigma}{A \cdot S} = 10,96 \text{ MPa}$$

PPSGF40

120 °C, 1.000 h

$\varepsilon_{\text{zul}} = 0,8 \%$

$\sigma = 30 \text{ MPa}$

(aus isochronem σ - ε -Diagramm)

Abminderung Glykol: $A_1 = 1,25$

Abminderung Anisotropie: $A_2 = 1,68$

Sicherheitsbeiwert: $S = 1$

$$\sigma_{\text{zul}} = \frac{\sigma}{A \cdot S} = 14,3 \text{ MPa}$$

Nachweis der Zulässigkeit einer Bauteilgeometrie

- Betrachtung der Werkstoffanstressungen: z.B. beginnende Rissbildung, plastische Verformung oder Bruch
- Interpretation der Bauteilkräfte: z.B. Montagekräfte beim Ineinanderschieben von Schnappverschlüssen
- Interpretation der Bauteilverformungen: insbesondere bei Dichtigkeits- oder Passungsfragen

Versagenskriterien

Bauteile unterliegen mehrachsigen Spannungszuständen

- Experimentelle Ermittlung der einzelnen Kennwerte für jeden Lastfall liegen nicht vor
- Bestimmen von sog. Vergleichsspannungen

Es existieren verschiedene Versagenskriterien, um die ertragbaren Lasten bis zum Versagen abzuschätzen.

- Diese führen z.T. zu einer Über- oder Unterschätzung der tatsächlichen Versagensspannungen (häufige Ursache: mathematische Beschreibung der Modelle)
- Speziell bei anisotropen Kunststoffen (Verarbeitungsorientierung, Füllstoffe) gibt es spezielle Versagenskriterien
- Konservative Abschätzungen sind zu bevorzugen, führen aber evtl. zu unnötigen Überdimensionierungen

Festigkeithypothesen

Problem: Mehrachsige Spannungszustände

- Technische Bauteile unterliegen unter Betriebsbedingungen meist einem mehrachsigen Spannungszustand

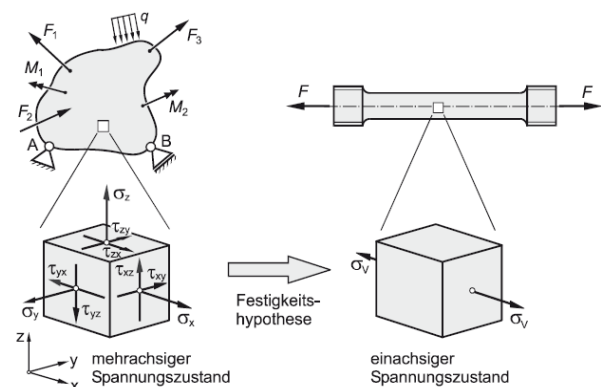
Problem:

- Versuchsanordnungen sind mit einem hohen experimentellen Aufwand verbunden. Entspricht dann einer Bauteilprüfung
- Bauteilprüfung lässt keine allgemeingültigen Aussagen über das Versagensverhalten bei mehrachsiger Beanspruchung zu

Idee: Mehrachsige Beanspruchungen in gleich effektive uniaxiale Beanspruchungen überführen.

Lösung:

- Entwicklung von Festigkeithypothesen
- Aus den mehrachsigen Spannungen wird auf Basis von Festigkeithypothesen eine Vergleichsspannung berechnet. Diese kann dann wie einachsige Zug- und Druckspannungen behandelt werden
→ unmittelbarer Vergleich mit einachsigen ermittelten Kennwerten aus dem Zugversuch möglich



Andere Quelle: Hypothese der Gestaltänderungsenergie (GEH)

- Energie, die bei einem räumlichen Spannungszustand für die Gestaltänderung eines Körpers erforderlich ist
- Erreicht diese einen werkstoffabhängigen Grenzwert (z.B. ermittelt aus einem einachsigen Zugversuch), versagt der Werkstoff

Drückt man diesen Grenzwert über die Hauptnormalspannungen $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ aus, erhält man die Vergleichsspannung σ_v nach der GEH:

$$\sigma_v = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

Die GEH wird auch als HMM-Kriterium (Kriterium der größten Gestaltänderungsarbeit nach Huber, von Mises und Hencky) bezeichnet.

Quelle: Lämple

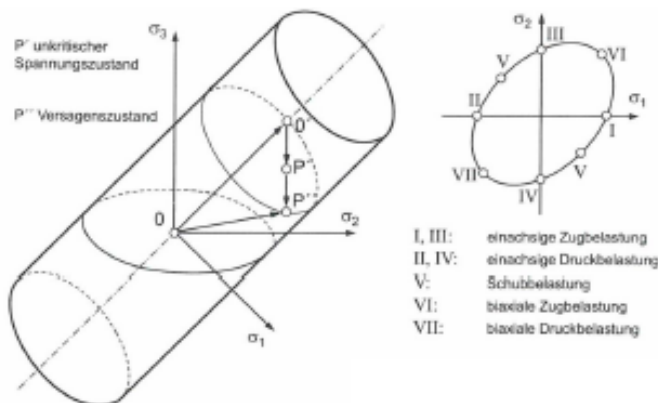
Anwendbarkeit der Vergleichsspannungen

Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Vergleichsspannung ist die Annahme eines isotropen Werkstoffs (gleiche Eigenschaften in alle Richtungen)

→ Allerdings ist dies auch bei ungefüllten Kunststoffen selten der Fall

Äquipotentialflächen

- Gesamtheit aller Spannungszustände, die zum Werkstoffversagen führen, liegen im Hauptnormalspannungsraum auf einer gemeinsamen Fläche
- Jeder Punkt auf der Fläche bedeutet eine äquivalente Werkstoffanregung



hier:

Äquipotentialfläche = Zylinderkriterium

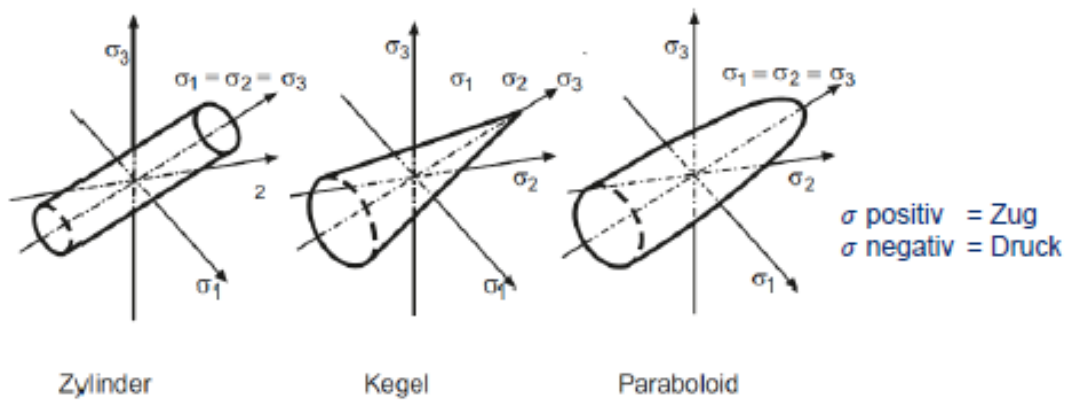
berechenbar durch von-Mises-Vergleichsspannung

$$\sigma_{V, \text{Mises}} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

Quelle: Stommel

Kegel- und Paraboloidkriterium

Der durch die Kompressibilität von Kunststoffen bedingte Unterschied in den Werkstoffeigenschaften unter Druck- und Zugbeanspruchung findet in der herkömmlichen GEH keine Berücksichtigung. Daher besser geeignet: Kegelkriterium oder Paraboloidkriterium



Für das Kegelkriterium gilt:

$$\sigma_V = \frac{m-1}{2m} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \pm \frac{m+1}{2\sqrt{2m}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

Für das Paraboloidkriterium gilt:

$$\sigma_V = \frac{m-1}{2m} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \pm \sqrt{\left(\frac{m+1}{2m}\right)^2 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + \frac{1}{2m} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

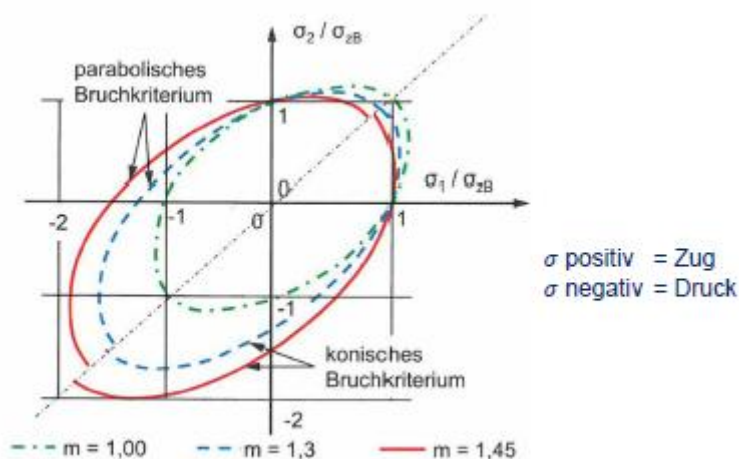
mit $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ Hauptspannungen

$$m = \frac{\sigma_{zul. \text{ einachsiger Druck}}}{\sigma_{zul. \text{ einachsiger Zug}}}$$

Sowohl das Kegel- als auch das Paraboloidkriterium gehen für $m = 1$ in das HMM-Kriterium über.

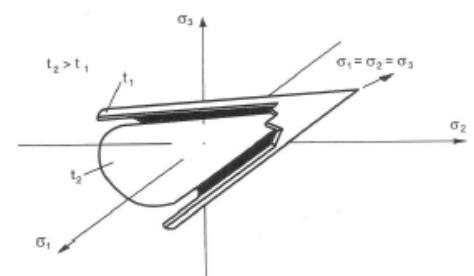
Vergleich im ebenen Hauptspannungsdiagramm

Gegenüberstellung der drei Kriterien in einem ebenen Hauptspannungsdiagramm



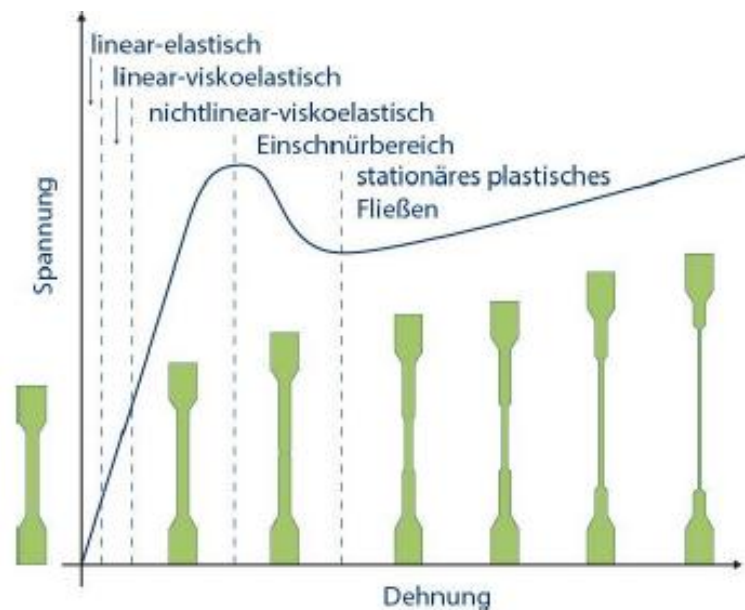
Zeitstandfestigkeit beim Kegelkriterium

Der 3D-Versagenskörper (kegelförmig) gibt Auskunft über die ertragbaren Lasten bis zum Bauteilversagen in Abhängigkeit vom anliegenden dreiachsigen Spannungszustand. Das Bauteil versagt, wenn eine Spannungskomponente außerhalb des Kegels liegt. Ineinander gestufte Versagenskörper können verschiedene Zeiten bis zum Versagen berücksichtigen



Werkstoffmechanik

Werkstoffverhalten von Kunststoffen



Linear-elastisches Materialverhalten

Das linear-elastische Materialverhalten wird durch das Hook'sche Gesetz beschrieben (=lineare Abhängigkeit der Verformung von der Belastung). Dabei gilt für den einachsigen Spannungszustand: $\sigma = E \cdot \varepsilon$

Das linear-elastische, spontan reversible Verformungsverhalten endet bei den meisten Polymerwerkstoffen bei einem Gesamtdehnungsbereich von unter 1%. Dieser Bereich wird bei Belastung weit überschritten und damit auch der Gültigkeitsbereich des Hook'schen Gesetzes.

Dennoch Anwendung: Vorauslegung (Vordimensionierung) von einfachen Kunststoffbauteilen.

Nichtlineares-viskoelastisches Materialverhalten

Oberhalb des linearen Bereichs (sei er elastisch oder viskoelastisch), nehmen die irreversiblen Verformungsanteile überproportional zu.

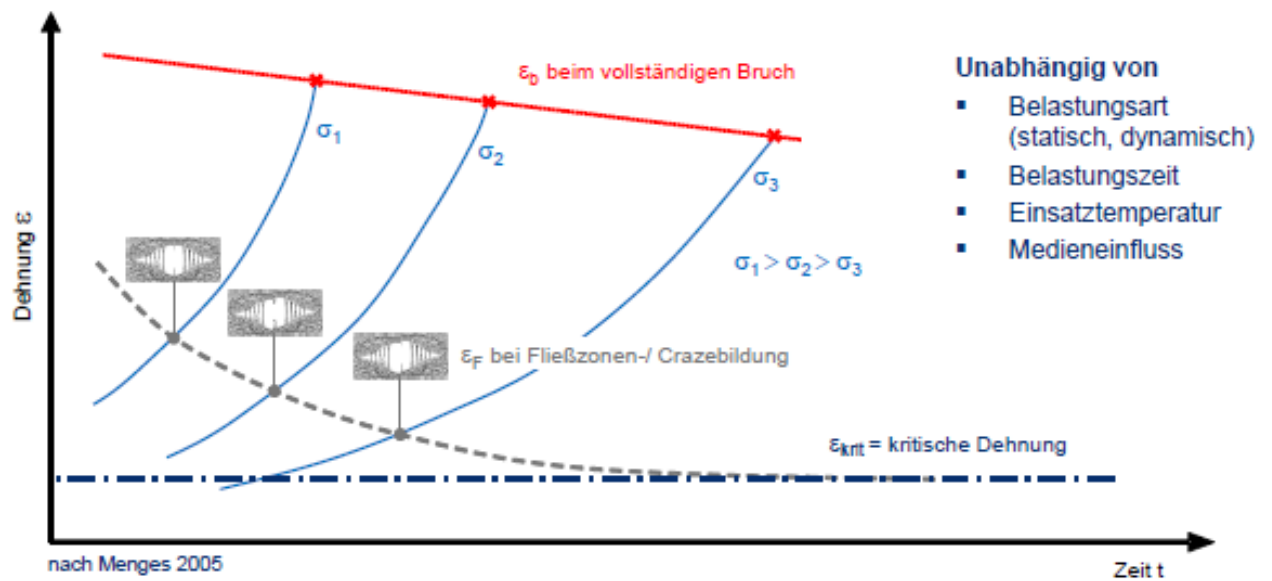
→ Steigung der Spannungs-Dehnungskurve (E-Modul) hängt nicht mehr nur von der Belastungszeit und -temperatur, sondern auch von der Belastungshöhe ab

Es kommt zur Ausbildung von Crazes.

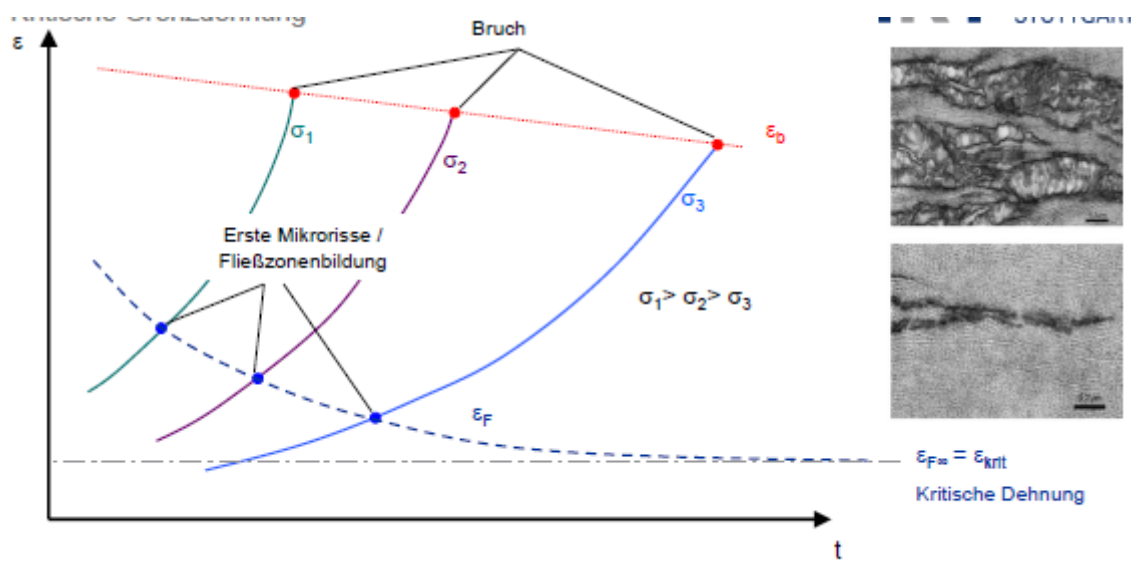
Die meisten konstruktiven Anwendungen werden in diesem Bereich belastet (was die Berechnung und Gestaltung eines Bauteils erschwert)

Auslegung von Kunststoffbauteilen

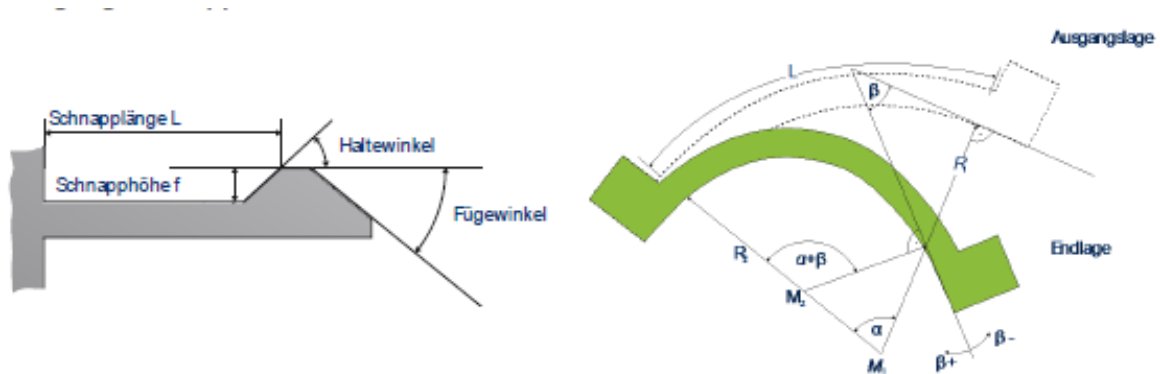
Kritische Dehnung



Kritische Grenzdehnung



Auslegung Schnapphaken/Filmscharnier



Randfaserdehnung beim Fügen:

$$\varepsilon_{rand} = f \cdot \frac{3h}{2F}$$

Randfaserdehnung:

$$\varepsilon_{rand} = \frac{h}{2} \cdot \left(\frac{a}{L} - \frac{a \pm \beta}{L} \right)$$

Auslegung von Schnapphaken und Filmscharnieren über die maximale Randfaserdehnung, anstatt über Spannungswerte. → Ist ein dehnungsbezogener Ansatz kunststoffgerechter?

Kritische Grenzdehnung als Auslegungskriterium – kunststoffgerechter?

Vorteile:

- Einfach und sichere Auslegung
- Verwendung geringerer Abminderungs- und Sicherheitsfaktoren
- Breiter Gültigkeitsbereich der kritischen Dehnung
- Kein Versagen des Bauteils, selbst bei Langzeitbelastung
- Keine Unterscheidung zwischen statischer und dynamischer Belastung

Nachteile:

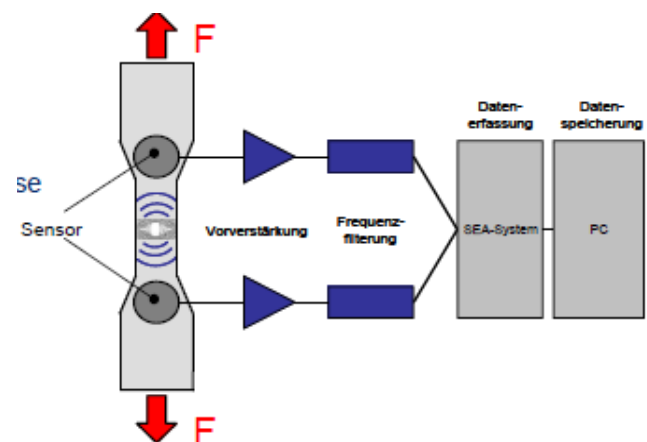
- Ermittlung im Zeitstandversuch → sehr zeitaufwändig
- Kritische Dehnung ist Werkstoffeigenschaft → diese ist bei Kunststoffen jedoch stark abhängig von der Verarbeitung
- Lang- bzw. endlosfaserverstärkte Kunststoffe sind kaum für das Kriterium der kritischen Dehnung geeignet (aufgrund Anisotropie nach der Verarbeitung)

Detektion von Mikroschädigungen

Aufbau des Schallemissionsmesssystems

Schallemissionsanalyse (SEA): Elastische Wellen, die bei plastischer Deformation im Werkstoff freigesetzt werden, durch Rissbildung und Rissausbreitung

Die SEA erfasst Umwandlungsprozesse im Werkstoff bzgl. Zeitpunkt, Ort, Intensität und Art



Sicherheitsbeiwerte für die kritische Dehnung

$$\varepsilon < \varepsilon_{krit} = \frac{\varepsilon_{krit}}{S}$$

Abschätzungen für Sicherheitsbeiwerte:

$S_{min} = 1$	bei statischer Belastung in Luft
$S_{min} = 1,5$	bei Zugschwellbelastung
$S_{min} = 1,5$	bei Spannungsrissgefahr

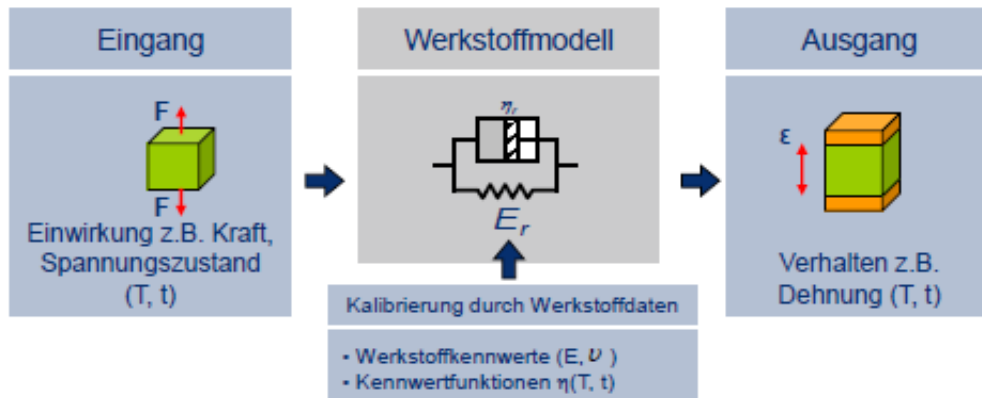
Bei einem Einsatz in aggressiven Medien oder bei gravierenden Fertigungseinflüssen (z.B. Bindenähten), muss die kritische Dehnung über Versuche weiter abgemindert werden.

8) Werkstoffmodelle

→ Gehört zur beanspruchungsgerechten Konstruktion

Was ist ein Werkstoffmodell?

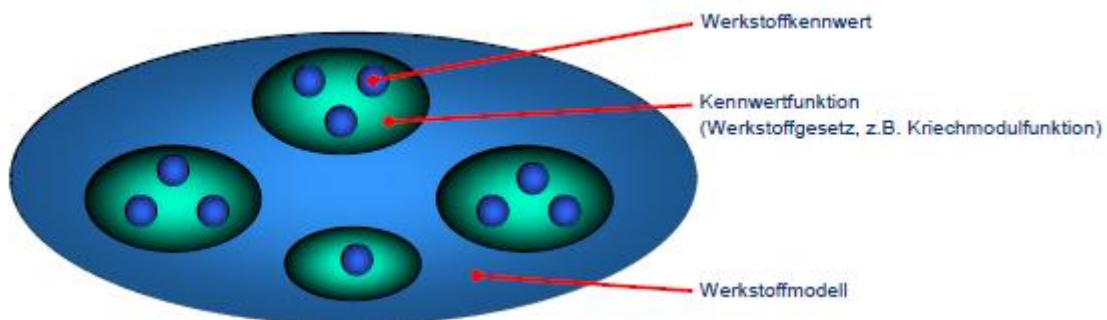
= beschreibt mathematischen Zusammenhang zwischen Spannung, Dehnung, Zeit und Temperatur in Abhängigkeit von bestimmten Materialparametern. So kann man die sich einstellenden Spannungen aus aufgeprägten Verformungen oder umgekehrt die Verformung durch eine angreifende Spannung errechnen.



Vom Werkstoffkennwert zum Modell

Werkstoffmodelle müssen mit charakteristischen Daten des Werkstoffes, den sie beschreiben sollen, kalibriert werden. Hierbei muss stets ein Kompromiss zwischen der Genauigkeit des Modells und dem Aufwand, der für dessen Kalibrierung betrieben wird, gefunden werden.

Meist gelten Werkstoffmodelle nur unter bestimmten Randbedingungen (z.B. kleine Dehnungen). Es gilt, diese Randbedingungen bei der Interpretation der Ergebnisse stets zu berücksichtigen



Werkstoffmodell für Metalle

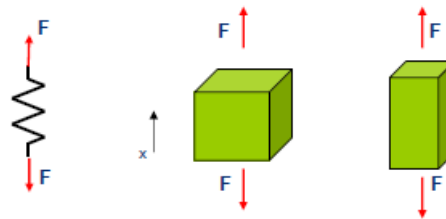
Linear-elastische Werkstoffmodelle (isotrope Elastizität)

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \cdot \sigma$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} (\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z))$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z))$$

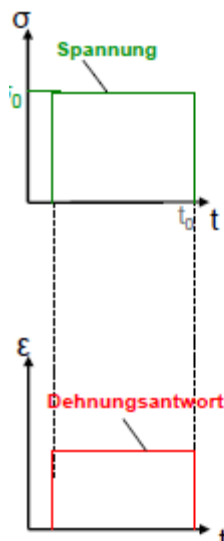
$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} (\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y))$$



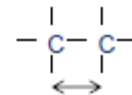
Für eine reine Gestaltoptimierung dürfen auch bei Kunststoffen linear-elastische Ansätze verwendet werden.

Werkstoffmechanik

Elastisches Verhalten (Spontan+ reversibel)



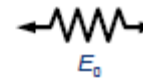
Elastisches Verhalten ist bedingt durch spontane Abstandsänderung von Atomen ...



... und Valenzwinkelveränderungen (hauptsächlich chemische Bindungen)



▪ Ersatzmodell:



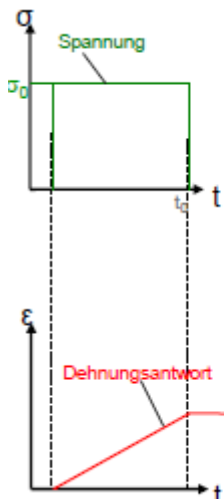
▪ Verformung unter $\sigma_0 = \text{const.}$:

$$\varepsilon_{\text{elastisch}} = \frac{\sigma_0}{E_0}$$

▪ Entlastung bei $t > t_0$:

$$\varepsilon_{\text{elastisch}} = 0$$

Viskoses Verhalten (zeitabhängig+irreversibel)



Fließfähige Medien/Werkstoffe verhalten sich viskos. Die nicht zurückstellende Molekülbewegung, um unter Beanspruchung zu neuem Gleichgewicht zu gelangen, nennt man irreversibel.

▪ Ersatzmodell:



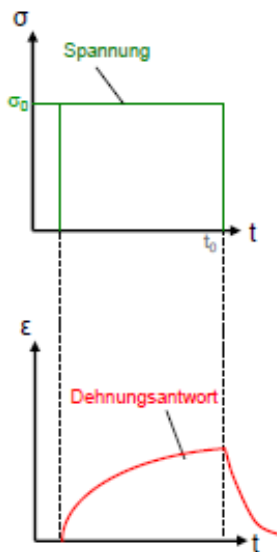
▪ Verformung unter $\sigma_0 = \text{const.}$:

$$\varepsilon_{\text{viskos}} = \frac{t \cdot \sigma_0}{\eta_0}$$

▪ Entlastung bei $t > t_0$:

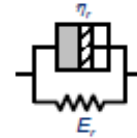
$$\varepsilon_{\text{viskos}} = \frac{t \cdot \sigma_0}{\eta_0}$$

Retardation- und Relaxationsverhalten (zeitabhängig+reversibel)



Retardation und Relaxation bezeichnen Umlagerungen von Ketten und Verknäuelungen mit der Zeit, um unter aufgeprägter Beanspruchung (Spannung oder Dehnung, hier Spannung) zu einem neuem Gleichgewichtszustand zu gelangen.

▪ Ersatzmodell:

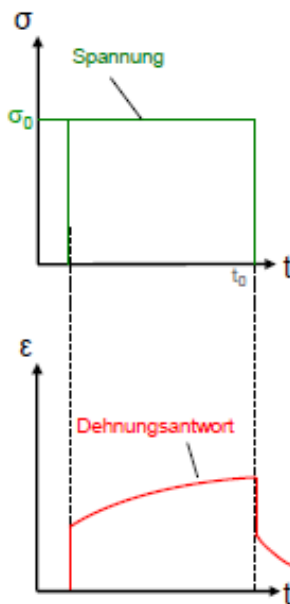


▪ Verformung unter $\sigma_0 = \text{const.}$:

$$\varepsilon_{\text{relax}} = \frac{\sigma_0}{E_r} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

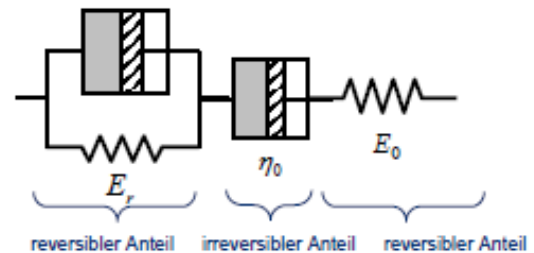
▪ Entlastung bei $t > t_0$: $\varepsilon_{\text{relax}} = \varepsilon_{\text{relax}}(t_0) \cdot e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}}$ mit $\tau = \frac{\eta_r}{E_r}$

Viskoelastisches Verhalten (zeitabhängig+teilweise irreversibel)



Das viskoelastische Gesamtverhalten ist eine Kombination elastischen, viskosen und relaxierenden/retardierenden Verhaltens.

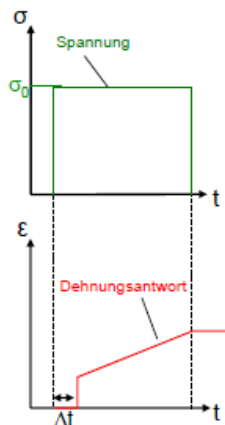
▪ Ersatzmodell:



▪ Verformung unter $\sigma_0 = \text{const.}$: $\varepsilon_{\text{viskoelastisch}} = \varepsilon_{\text{elastisch}} + \varepsilon_{\text{viskos}}(t) + \varepsilon_{\text{relax}}(t)$

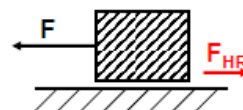
▪ Entlastung bei $t > t_0$: $\varepsilon_{\text{ges}} = \varepsilon_{\text{ges}}(t_0) - \varepsilon_{\text{elastisch}}(t) - \varepsilon_{\text{relax}}(t_0) \cdot e^{-\frac{(t-t_0)}{\tau}}$

Plastisches Verhalten (zeitabhängig+irreversibel)



Zu plastischem Verhalten kommt es bei Überschreitung einer Fließ- bzw. Lastgrenze. Durch spontane Rissbildung und Risswachstum kommt es zu einer sprunghaften, irreversiblen Dehnung, gefolgt vom Fließen des Werkstoffs.

Ersatzmodell:



Im Gegensatz zu den übrigen werkstoffmechanischen Grundprinzipien ist das plastische Verhalten nicht ohne Weiteres mathematisch beschreibbar.

Lineares und nicht-lineares Verhalten von Kunststoffen

- Solange Gesamtverformung durch Addition der analytisch darstellbaren Einzelverformungsanteile $\varepsilon_{elastisch}$, ε_{relax} , ε_{viskos} zusammengesetzt werden kann, spricht man von linear-viskoelastischem Verhalten
- Das heißt, die elastischen und nicht-elastischen Verformungsanteile sind dann stets proportional lastabhängig (hohe Last, hohe Verformung)
- Oberhalb dieses Verhalten treten stärkere nicht-elastische, nicht-reversible Verformungen, z.B. aufgrund von molekularen (mikroskopischen) und makroskopischen Schäden auf, die sich nicht proportional zur Last verhalten. Das Verhalten wird nicht-linear-viskoelastisch und entzieht sich der analytischen Beschreibung
- Da Bauteile meist bis in den nichtlinear-viskoelastischen Bereich belastet werden, ist die Bauteilauslegung ggü. Z.B. den elastischen Metallen erschwert.

Querkontraktionszahl

- Bindeglied zwischen ein- und mehrachsiger Beanspruchung
- Ermittlung im Zugversuch aus dem Verhältnis von Quer- (ε_q) und Längsdehnung (ε_l)

$$\nu = \frac{-\varepsilon_q}{\varepsilon_l}$$

- Bestimmung des Schubmoduls G aus dem E-Modul (sonst nur im Torsionspendel ermittelbar)



$$G = \frac{E}{[2 \cdot (1 + \nu)]}$$

- Beschreibung des Verformungsverhalten quer zur Hauptbelastung:

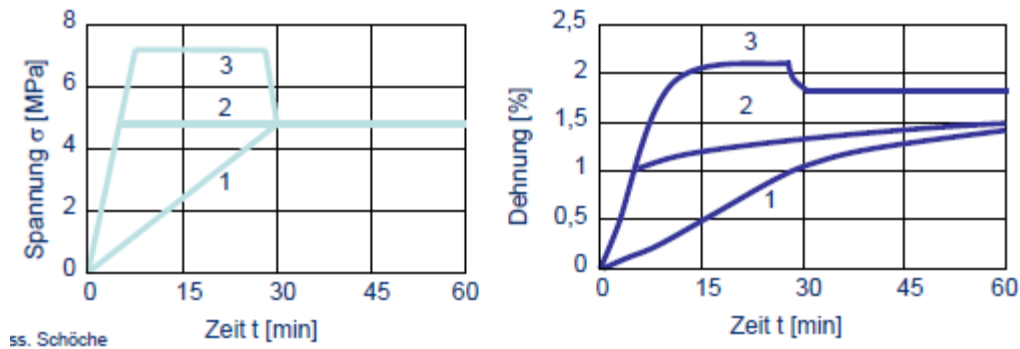
$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_y}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_z}{E}$$

- $\nu=0,5$: keine Volumenänderung (z.B. bei Elastomeren)
- Bei den meisten technischen Werkstoffen: zumindest kurzzeitige Volumenänderung unter Belastung $\rightarrow \nu = 0,2 \dots 0,5$ (Kunststoffe: $\nu = 0,3 \dots 0,5$)
- Ggf. Eintreten von Formänderung bei längerer Belastung: Volumenvergrößerung $\nu \rightarrow 0,5$
- Überschlägig:

$$\nu(t, T, \sigma_0) = \nu_0 + \left[(0,5 - \nu_0) \cdot \left(1 - \frac{E(t, T, \sigma)}{E_0} \right) \right]$$

Berücksichtigung der Belastungsgeschichte

Es ist nicht gleichgültig, auf welchem „Weg“ ein Belastungszustand erreicht wurde. Aufgrund der Möglichkeit der Molekülketten, sich einer gewissen Beanspruchung in einer gewissen Zeit bei einer gewissen Temperatur durch aneinander Abgleiten zu entledigen bzw. diese zu reduzieren, wird der Spannungs-/Dehnungs-Zustand nicht exakt allein durch die momentan anliegende Belastung bestimmt



Nutzung elastischer Werkstoffmodelle

Anwendungen und Einsatzgrenzen

- Bei kleinen Dehnungen ($\epsilon < 2\%$) von Kunststoffen oder der reinen Gestaltoptimierung reicht linear-elastische Betrachtung meist aus
- Bei größeren Dehnungen ist zu beachten, dass zum einen die Spannungs-Dehnungskurve nicht mehr linear verläuft, zum anderen sie zunehmend von der Kurve der wahren Dehnung abweicht.
- Nachteile dieser einfachen Vorgehensweise: weder plastische noch viskose Effekte, weder unterschiedliche Belastungsgeschichten, noch Zeitabhängigkeit der Belastungsantwort werden durch linear-elastische Werkstoffmodelle erfasst.

Werkstoffmodelle zur Gestaltoptimierung

Linear-elastisch

Bei einer Gestaltoptimierung werden meist durch vergleichende Berechnungen an Geometrievarianten nur die geometrisch bedingten Beanspruchungsspitzen minimiert. Eingangsdaten sind hier der z.B. Ursprungs-E-Modul aus dem einachsigen Zugversuch und die Querkontraktionszahl ν . Richtwerte für die Querkontraktionszahl von unverstärkten Thermoplasten sind 0,3 bis 0,35.

Glasfaserverstärkte Bauteile (linear-elastisch)

Berücksichtigung der Anisotropien

- Stark linear-elastisches Verhalten aufgrund der Fasern
- Anisotropes Verhalten bei Ausrichtung der Fasern in Vorzugsrichtung:
 - o Höherer E-Modul in Faserrichtung als quer dazu
 - o Rechnung richtungsabhängiger E-Moduln, Querkontraktionszahlen und Schubmoduln (Voraussetzung: Daten zu Fasern und Matrix vorhanden)
- Geschichteter Aufbau langfaserverstärkter Kunststoffe (Faserlänge $> 1\text{mm}$) erfordert geschichtete Modellierung
- Fasergehaltbestimmung durch Glührückstandtest nach EN60.
- Materialwerte für die Kalibrierung aus Zugversuchen an den einzelnen Schichten

Werkstoffmodelle für Duomere

Anwendung linear-elastische Werkstoffmodelle

- Viskoelastisches Werkstoffverhalten bei Duomeren nur gering ausgeprägt
- Auftretende Dehnungen sehr gering aufgrund des hohen E-Moduls → Beschreibung über linear-elastische Werkstoffmodelle meist zulässig
- Parameter für die Kalibrierung lassen sich meist den Spannungs-Dehnungs- oder auch den Kriechkurven entnehmen.

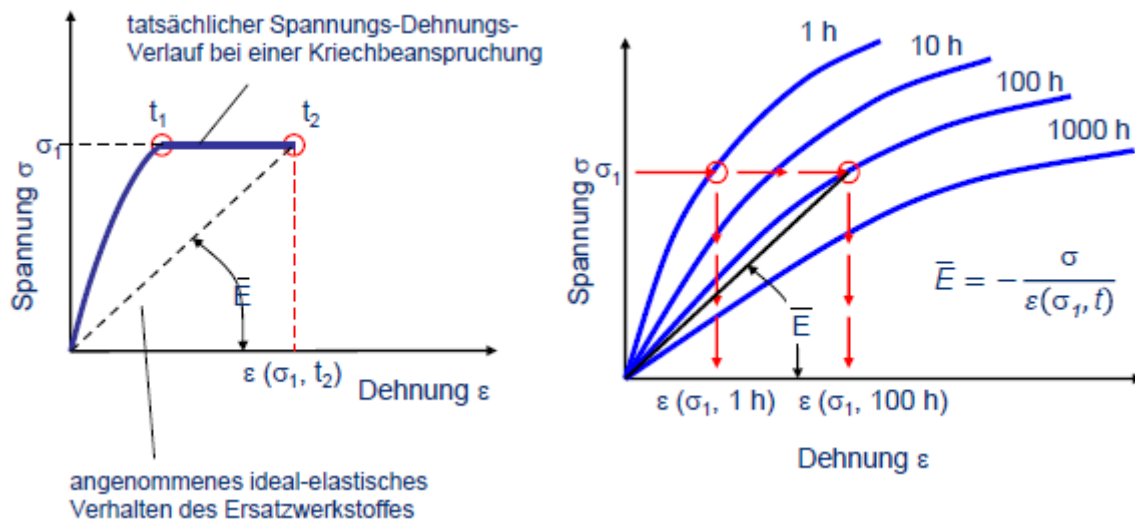
Linear-elastische Berechnung von Thermoplasten

Berücksichtigung des Kriechverhaltens

Um das langzeitige, viskoelastische Verhalten annäherungsweise zu beschreiben, behilft man sich mit dem Kriechmodul (elastischer Ersatzkennwert):

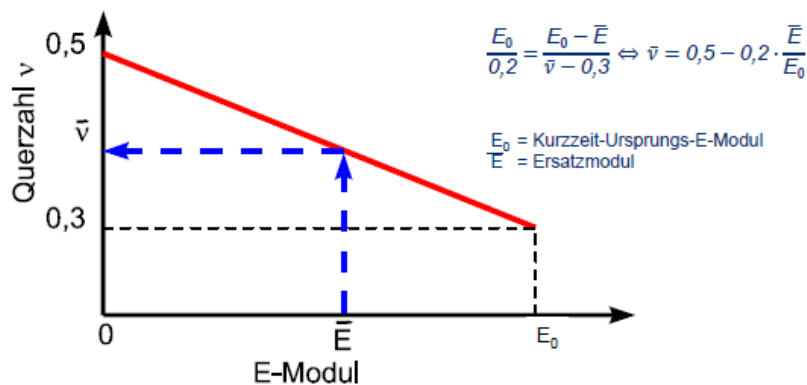
- Berechnung linear-elastisch mit Ursprungs-E-Modul und Querkontraktionszahl zur Abschätzung des Spannungsniveaus
- Bestimmung des Kriechmoduls E_c bei der voraussichtlichen Belastungsdauer t und Dehnung ε aus dem isochronen Spannungs-Dehnungsdiagramm.
- Berechnung einer neuen Querkontraktionszahl mit der Mischungsregel
- Berechnung linear-elastisch mit dem Kriechmodul E_c und der neuen Querkontraktionszahl
- Vergleich der Spannungsniveaus und ggf. Iteration

Nutzung des Kriechmoduls



Mischungsregel

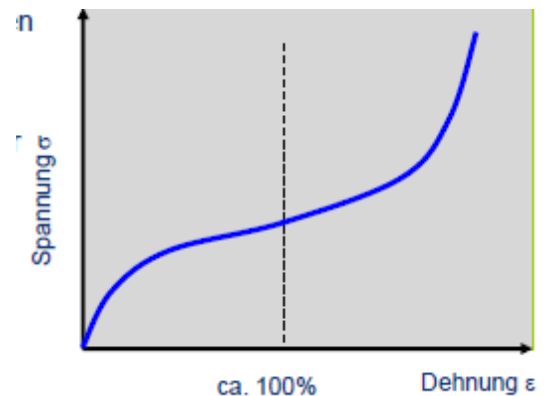
Überschlägige Bestimmung der Querkontraktionszahl



Werkstoffmodelle für Elastomere und TPE

Hyperelastizität

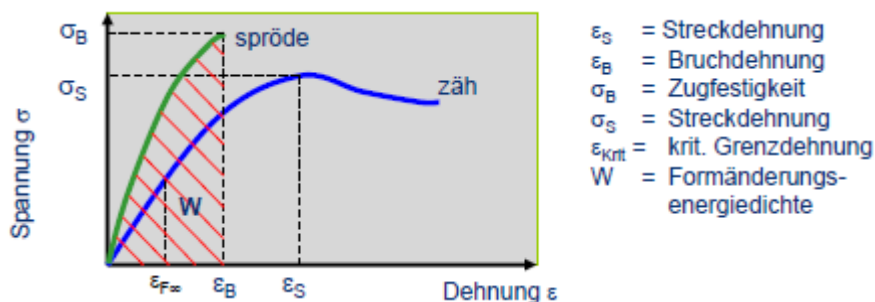
- Verhalten von Elastomeren und TPE bis zum Versagen zu großen Teilen elastisch aber nicht linear.
→ Hyperelastizität/Green-Elastizität
- Werkstoff kann aufgrund der großen Dehnungen nicht mehr über den E-Modul charakterisiert werden
- Vollständige mathematische Beschreibung aller Aspekte des mechanischen Verhalten der Elastomere noch nicht gelungen. → nichtlineare-elastische, inkompressible Verhalten der Werkstoffe wird mittels sog. Hyperelastischer Modelle angenähert



Anwendung Hyperelastische Werkstoffmodelle

Spannungs-Dehnungsbeziehung wird aus der Formänderungsenergiedichte W (volumenspezifische Energieaufnahme/Zähigkeit des Werkstoffs) heraus abgeleitet.

Ansätze von Rivlin, vereinfacht durch Mooney und von Odgen setzen die Energieaufnahme W rechnerisch in Verhältnis zu der aufgeprägten Dehnung. Spannungen werden durch Ableitung der Energieaufnahme nach der dabei erfahrenen Dehnung berechnet. Das Mooney-Rivlin-Modell erlaubt eine recht genaue Berechnung bis zu Dehnungen von 100%



Zur Beschreibung der Werkstoffmodelle (in FEM-Programmen) werden Kennwerte zur Kalibrierung benötigt. Diese werden möglichst in biaxialen Zugversuchen in Verbindung mit uniaxialen bestimmt.

Bei der Ermittlung der Kennwerte ist die Prüftemperatur und –geschwindigkeit zu berücksichtigen

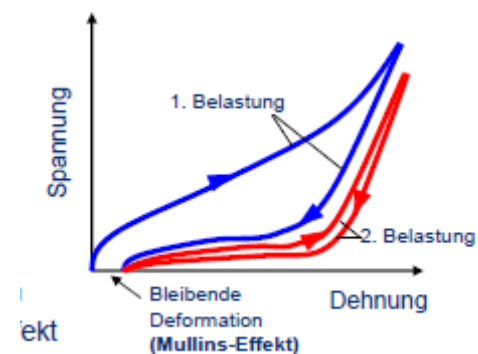
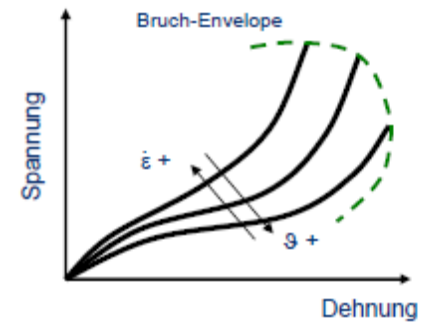
Die Messdaten sind Grundlage für die Anpassung der Parameter der verschiedenen statistischen Rechnungsansätze. Auch die Shore A-Härte (DIN 53505) kann für grobe Anpassungen einiger Rechnungsansätze genutzt werden.

Problematisch ist auch das viskoelastische Verhalten von Elastomeren durch kommerzielle FEM-Programme sehr selten hinreichend beschrieben.

Eine weitere Besonderheit stellt der Mullins-Effekt dar, welcher für die Verwendung der Modelle berücksichtigt werden muss.

Für Elastomere zeigt sich häufig eine große Abweichung zwischen der ersten und der darauf folgenden Belastung für den Spannungs-Dehnungsverlauf

Die Fläche innerhalb der Be- und Entlastungskurven stellt die dissipierte Energie während des Mullins-Effekts dar.

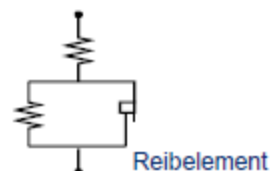
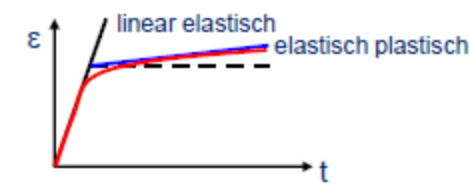


Elastisch-plastische Werkstoffmodelle

- Annahme linear-elastischen Werkstoffverhaltes unterhalb Streckspannung
- Ideal-plastische Reaktion bei Überschreitung der Streckspannung (Fließen)

Nachteil:

- Bei vorgegebener Belastung: kein eindeutiger Dehnungszustand zuordenbar → Abbruch bei Berechnung
- Bei vorgegebener Verformung: sofortige Verformung in den Endzustand
- Mit Definition eines E-Moduls im plastischen Bereich → Vermeidung eines Berechnungsabbruchs
- Kalibrierung durch eine Kriech- oder Relaxationskurve



Nichtlinearität approximierender Kurven

Die Nichtlinearität viskoelastischer Werkstoffe kann durch approximierte Kurven beschrieben werden.

Eine Parallelschaltung verschiedener Maxwell-Elemente z.B. nähert das Relaxationsverhalten eines Thermoplasten an (Prony-Reihe). Zeit- und Temperatureinflüsse können allerdings nicht beschrieben werden

Werkstoffmodelle für Thermoplaste

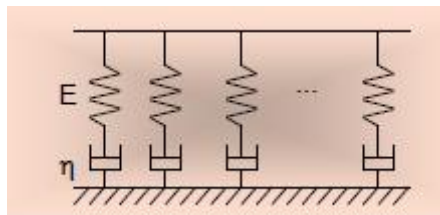
Zwischenfazit

Mängel derzeitig verwendeter viskoelastischer Werkstoffmodelle:

- Nur isotrope Werkstoffe werden beschrieben, (zeitabhängiges) Verhalten kurz- oder langfaserverstärkter Kunststoffe kann noch nicht realitätsnah beschrieben werden
- Belastungsgeschichte wird nicht berücksichtigt
- Thermische Wechselbeanspruchung könne nicht beschrieben werden

Neuere Werkstoffmodelle für Thermoplaste

Viskoelastische Werkstoffmodelle – Deformationsmodell nach Schmachtenberg



Für jedes der Elemente des Deformationsmodells wird zwischen 3 Zuständen unterschieden:

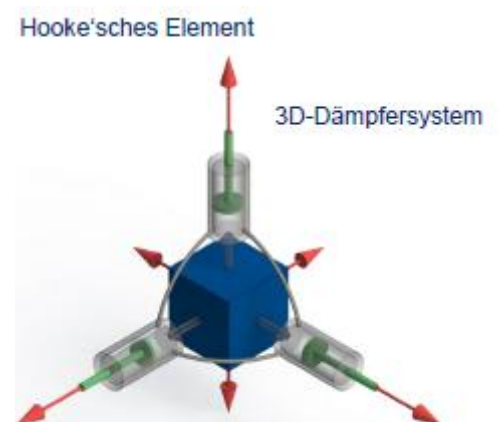
- Rein elastischer Zustand (Dämpfer inaktiv)
- Aktiver Zustand (Feder und Dämpfer aktiv)
- Viskoser Zustand (Feder inaktiv)

3D-Modell von Wanders

Wanders'sche Modell baut auf dem Schmachtenberg'schen Modell mit der Erweiterung von Schöche auf. Es erfasst die Interaktion der Dehnungen und Spannungen in den verschiedenen Raumrichtungen und berücksichtigt nichtlinear-viskoelastische Effekte sowie Anisotropien.

Kalibrierung erfolgt durch E-Module und Querkontraktionszahlen sowie durch Retardationsversuche.

Diese Werkstoffmodelle sind in noch kein kommerzielles Programm implementiert.



Fazit Werkstoffmodelle

- Einsatz linear-elastischer Werkstoffmodelle für steife Werkstoffe (Duromere, faserverstärkte Thermoplaste)
- Anwendung linear-elastischer Werkstoffmodelle außerdem für reine Geometrieoptimierung, allerdings niemals Werkstoff-„Ausreizungen“
- Verwendung hergeleiteter elastischer Ersatzkennwerte (Stichwort Kriechmodul) zur Berechnung einfacher Beanspruchungsfälle von unverstärkten Thermoplasten
- Bestimmung des Beanspruchungszustandes nur mit nichtlinear-viskoelastischen Werkstoffmodellen
- Hyperelastische Werkstoffmodelle für sehr dehnfähige Werkstoffe

9) Einführung in die FEM

→ Beanspruchungsgerechte Konstruktion

Ziele der Auslegung von Kunststoffprodukten

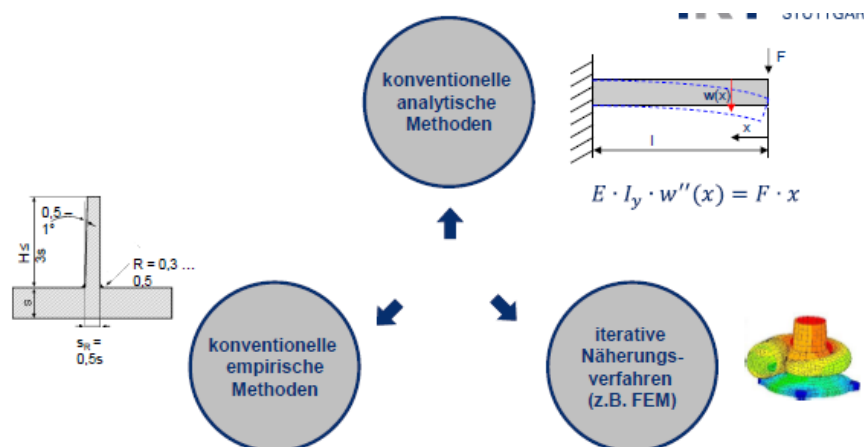
Zur Bewertung der mechanischen Auslegung (Dimensionierung) eines Kunststoffbauteils werden

- Verformte Geometrie
- Inneren Beanspruchungen wie Spannungen und Dehnungen
- Sich ergebende Auflagekräfte und Einspannmomente betrachtet

Ziele der Auslegung: Vorhersage des Bauteilverhaltens unter den im praktischen Betrieb vorliegenden Rand- und Belastungsbedingungen sowie der dabei auftretenden Werkstoffbeanspruchung

Tritt keine Überbeanspruchung oder unzulässige Verformung auf, so ist das Bauteil aus geometrischer Sicht optimiert.

Möglichkeiten der mechanischen Auslegung



Konventionelle, analytische Methoden

- Einfache Lastfälle
- Nur bei einfachen Geometrien/Anwendungen hilfreich ($I_y \neq f(x)$ und $E = \text{const.}$)

Aber:

- Bei komplexen Bauteilen $I_y = f(x)$
- Reale Bedingungen $E = f(T, t, c_{H20}, F, \dots)$ sowie $E_x \neq E_y \rightarrow$ keine Isotropie!
- Überschlägige Vordimensionierung von Entwürfen durch Zerlegung in einfache Strukturen (Stäbe, Balken, Platten, Schalen, ...) und Superposition

Konventionelle, empirische Methoden

- Empirisch=auf Tatsachen oder Versuchen aufbauend
- Berechnungsgrundlagen aufgrund von Bauteilversuchen → Formeln unter Berücksichtigung von Bauteilversuchen
- Werden zur überschlägigen Dimensionierung gerne genutzt
- Integration von Bauteilmakros in CAD-Software



Iterative Näherungsverfahren

Vorteile

- Darstellung komplexer Geometrien
- Lastangriff ohne geometrische Einschränkungen (Punkt, Linie, Volumen, Fläche,...)
- Zeitliche Veränderung des Lastangriffs möglich
- Komplexe Kontaktprobleme
- Nichtlinearitäten (Geometrie, Material, Randbedingungen)

Grundlagen der Finite-Elemente-Methode

Diskretisierung

Ziel einer Dimensionierung:

- Suche nach Antwort des Bauteils auf Beanspruchung (Kraft/Verformung)
- Betrachtung des Zustands, in dem Gleichgewicht zwischen äußeren Lasten und den Spannungen im Bauteil herrscht

Vereinfachungen der FEM

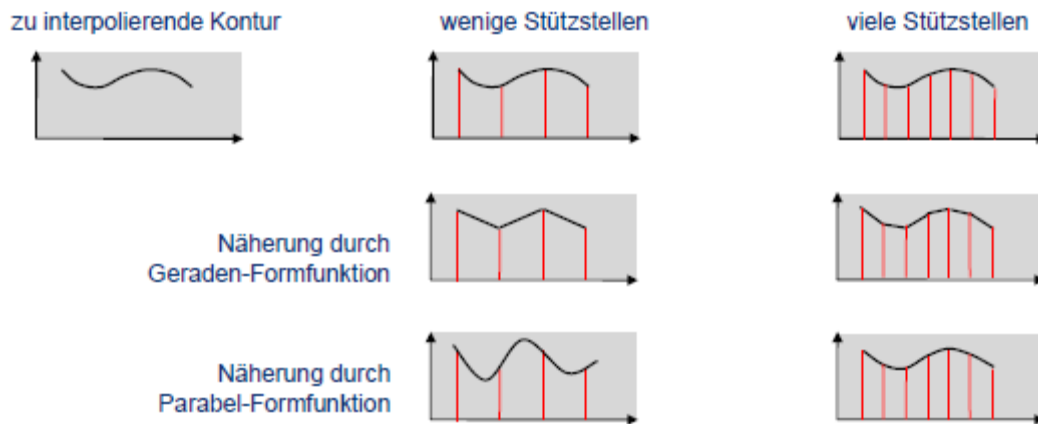
- Kontinuierliches Bauteil wird in kleinste Elemente, die untereinander in Beziehung stehen, unterteilt → Stichwort: Diskretisierung
- Bauteilverformung wird in den Bereichen zwischen den Stützstellen der Elemente interpoliert → Stichwort: Formfunktionen
- Beschreibung der Gesamtzusammenhänge zwischen Kräften und Verformungen erfolgt mit Differentialgleichungssystemen nicht für alle Stellen des Kontinuums, sondern nur für eine ausgewählte, endliche Anzahl an Stellen → endliche Anzahl an Unbekannten

Grundprinzip

- Diskretisierung des Bauteils
- Interpolation des Verformungsverhalten (durch Formfunktion)
- Zusammenhang Verformungen/Kräfte (Werkstoffmodell), z.B. Formulieren/Lösen des Gleichungssystems, Ausgabe der Ergebnisse

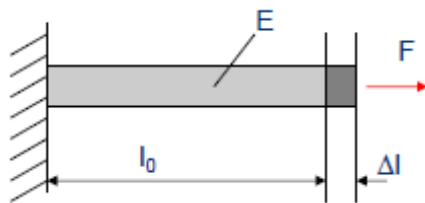
Formfunktion

Zwischen den Stützstellen wird ein Verformungsverhalten angenommen, welches durch eine Formfunktion beschrieben wird



Werkstoffmodelle

In FE-Programmen sind Werkstoffmodelle hinterlegt, so dass unter Vorgabe der Werkstoffdaten der Zusammenhang zwischen Spannung, Dehnung; Zeit und Temperatur berechnet werden kann.

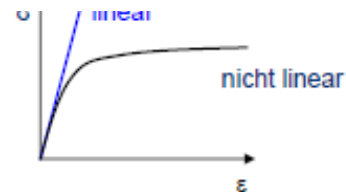


$$F = \sigma \cdot A \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

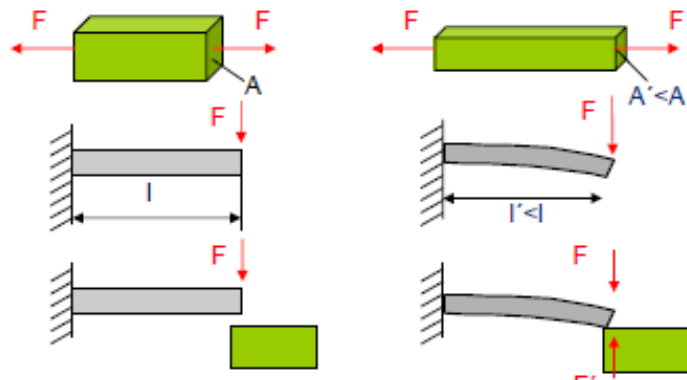
Hooke'sches Gesetz

Nichtlinearitäten

Nichtlineares Werkstoffverhalten
(mit steigender Dehnung steigt die Spannung schwächer an)



Geometrische Nichtlinearität
(Querschnittsfläche, Hebelarme etc. ändern sich mit der Verformung)

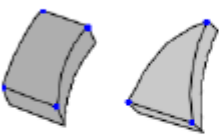
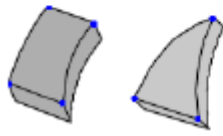


Nichtlinearität aufgrund sich ändernder Randbedingungen
(Einschnappen, Kontakt, Abheben)

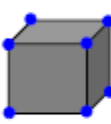
Erläuterung der eindimensionalen Strukturelemente

Art	Anwendung	Charakteristika	Bemerkungen
Stabelement 	Fachwerke Stabwerke	ausschließlich Kraft in Längsrichtung (keine Torsion, Biegung) keine Querschnittsänderung bei Verformung	keine Schubspannungen möglich Flächen bleiben konstant, hohe Verformungen führen dann zu niedrigen Spannungsannahmen.
Balkenelement 		auch Biegebelastungen und -momente mit Querschnittsänderung	Erfassung unterschiedlicher Spannungszustände im Abstand zur neutralen Faser (lineare Probleme: 3-Schichten nicht lin. Probleme: 5-Schichten) auch Schubspannungen dadurch möglich Schichten auch für Sandwich-Aufbau → Auswertung der einzelnen Schichten

Erläuterung der zweidimensionalen Strukturelemente

Art	Anwendung	Charakteristika	Bemerkungen
Schalenelement 	Schalenartige Bauteile, (Kunststoffbauteile) besonders für Biegebelastung (weniger für Torsionsbelastung)	Spannung in Dickenrichtung = 0 Zug/Druck, Biegung keine Momente um Dickenachse (!)	manchmal Schalenelemente aus „Bequemlichkeit“ auch für dickwandige Bauteile auch schichtweise möglich (Faserverbundbauteile mit Faserorientierung)
Membranelement 	sehr dünne und großflächige Bauteile ohne Biegesteifigkeit (Bänder, Riemen, Membranen, Ballons)	Zug/Druck keine Momente möglich	

Erläuterung der dreidimensionalen Strukturelemente

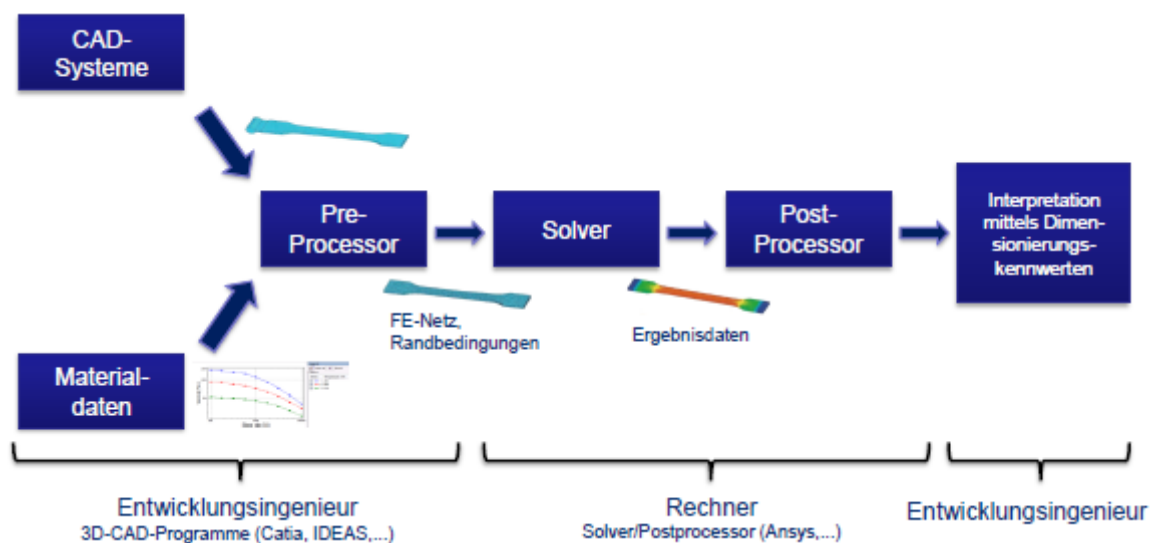
Art	Anwendung	Charakteristika	Bemerkungen
Volumenelement  (Tetraeder, Hexaeder)	dickwandige Bauteile wenn Spannungsverteilung in Dickenrichtung relevant wenn bei der Beanspruchung Schubspannungen dominant	jeder Belastungsfall möglich hoher Aufwand bei Vernetzung und Berechnung	Verschiebungen innerhalb des Elements werden aus den Knotenverschiebungen mit Hilfe der Formfunktionen interpoliert. auch hier Schichtaufbau möglich

Freiheit der Strukturelemente

- Je mehr Elemente, desto genauer die Berechnung
- Rechenzeit steigt quadratisch mit der Elementzahl
- Kompromiss zwischen Genauigkeit und Zeitaufwand/Kosten
- Höhere Feinheit des Netzes in Bereichen kritischer Stellen mit hohem Spannungs- oder Dehnungsgradienten (Kerben, Wanddickensprung, Durchbruch, punktförmiger Kraftangriff,...)
- Vorausberechnung mit grobem Netz (hilft auch, um Randbedingungen zu prüfen), schrittweise Verfeinerung in Bereichen großer Gradienten, wenn Fehler beseitigt sind

Arbeitsablauf einer FE-Analyse

Interaktion Ingenieur/Computer



Preprocessing (Modellaufbereitung)

Wichtige Fragen

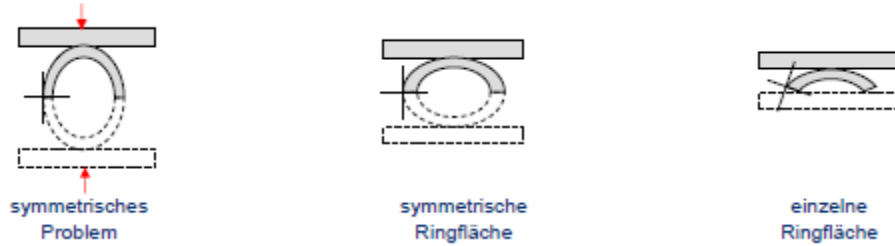
- Liegt in einem zu modellierenden Bereich ein Belastungszustand oder eine Bauteilgeometrie vor, die die Verwendung von vereinfachenden Strukturelementen erlaubt? (Bei der Dimensionierung von Strukturen, die z.B. hauptsächlich auf Biegung belastet werden, sollten Schalenelemente gewählt werden)
- Ist die Größe der Elemente dem zu lösenden Problem angemessen? (In der Nähe von Kerben sollte das Netz feinmaschiger sein)
- Welche Einzelheiten des Bauteils müssen im Modell nachgebildet werden? (z.B. muss das Logo des Herstellers wirklich mit modelliert werden)

1. Randbedingung

Kinematische Randbedingung: aufgeprägte Verformung erfordert Verschiebung mindestens eines Knotens

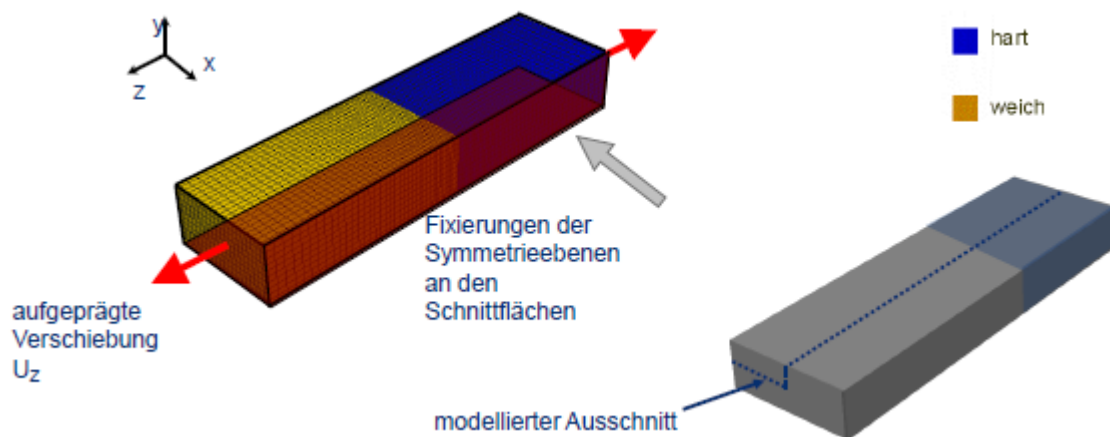
Einspannungen: Mindestens ein Freiheitsgrad muss unterbunden sein (entspricht die Einspannung den realen Verhältnissen?)

2. Symmetriebedingungen: symmetrische Bauteile, symmetrische Last



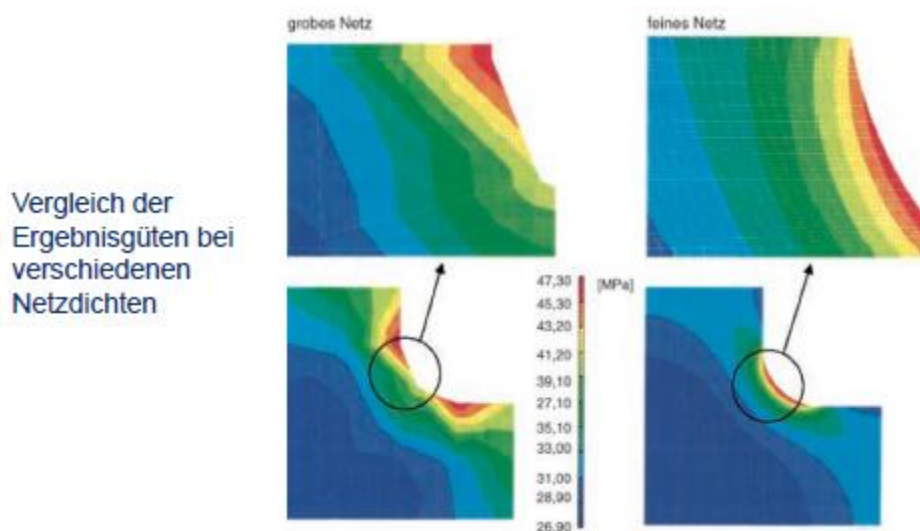
3. Lasten: punktförmig, linienförmig, flächig (Drücke), volumenartig (Massenkräfte)
 4. Wahl des Werkstoffmodells!

Reicht es nicht vielleicht aus, für die vorliegende Fragestellung nur einen Teilbereich des Bauteils zu modellieren?

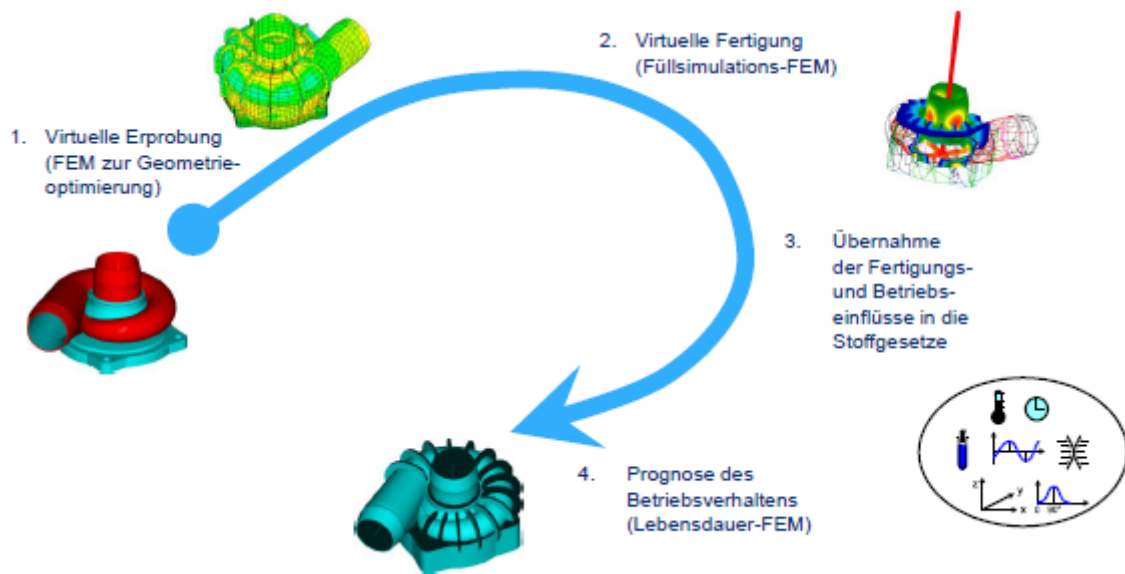


Ergebnisdarstellung: müssen durch den Ingenieur unter Berücksichtigung der getroffenen Randbedingungen interpretiert werden. „Bunte Bilder“ helfen dem erfahrenen Ingenieur bei der Interpretation, der Laie zieht hieraus falsche Schlüsse

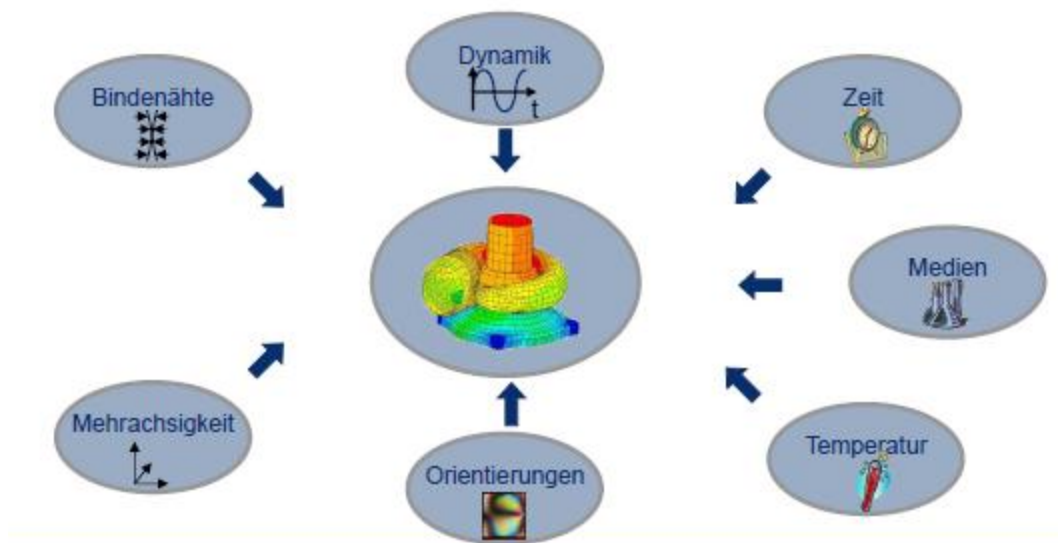
Einfluss der Feinheit der Vernetzung



FEM in der Formteilkonstruktion Heute und Morgen

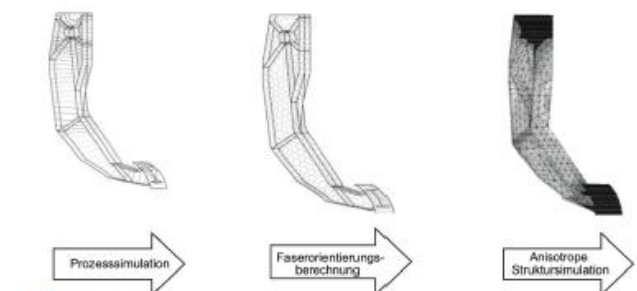


Blick in die Zukunft: Lebensdauer-FEM Einflüsse auf Bauteilverhalten berücksichtigen



Kopplung verschiedener Simulationen

Um eine genauere Vorhersage der Bauteileigenschaften zu ermöglichen, können verschiedene Simulationsmethoden gekoppelt werden
→ Kopplung von Prozess- und Strukturanalyse



Simulationsberechnungen in der Kunststofftechnik

Thermoformsimulation

- Optimierung der Waddicken und Waddickenverteilungen
- Optimierung der Prozessführung
- Optimierung der Zeitsteuerung

Simulation des Extrusionsprozesses

- Optimierung der Mischvorgänge im Extruder
- Rheologisch optimierte Düsen

RTM-Simulation

- Berechnung der Formfüllung
- Tränkung der Gewebestrukturen
- Berechnung von Prozessparametern und Reaktionskinetik der Tränkharze

Formfüllsimulation Spritzgieß-/Pressverfahren

- Gibt Aussage über Herstellbarkeit und mögliche Probleme
- Möglichkeit zur optimierten Auslegung von Füllzeit und Füllstrategie
- Ableitung von Daten für Werkzeugtemperierung und erzielbare Zykluszeiten
- Auch über BEM (Boundary Element Methode) möglich

Faserorientierungssimulation

- Ermittlung der sich einstellenden Faserorientierung
- Berechnung der entstehenden Anisotropieverhältnisse
- Berechnete Faserorientierungen ermöglicht Einblick in den zu erwartenden Bauteilverzug

Verzugsimulation: Ermittlung der Abweichung der Bauteilgestalt von der Sollgeometrie

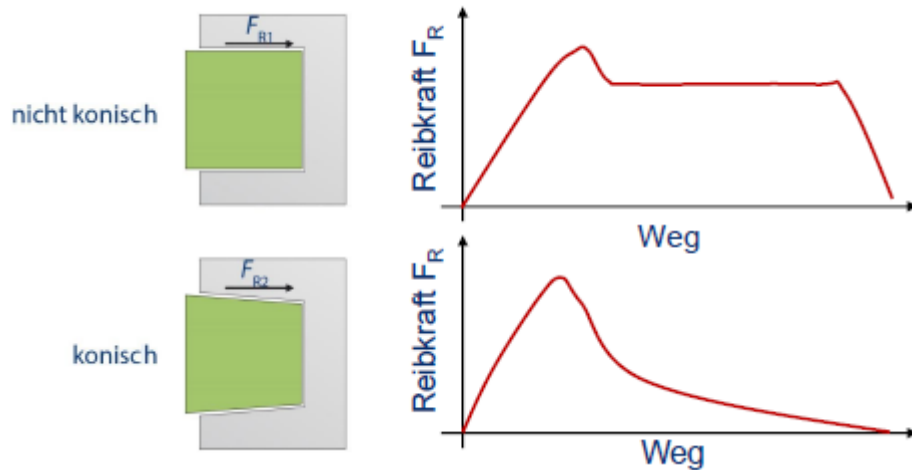
Crashsimulation

- Zur Ermittlung einer zutreffenden Vorhersage des Bauteilverhaltens bei einem Aufprall
- Benötigt werden Materialmodelle, die das kunststoffspezifische Verhalten und das aus der Faserorientierung herrührende Verhalten abbilden

10) Fertigungsgerechtes Konstruieren

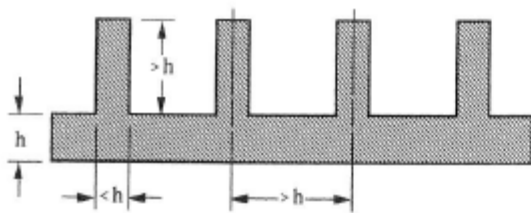
Vorsehen von Entformungsschrägen

Formschrägen erleichtern den Teilauswurf und verringern den Werkzeugverschleiß



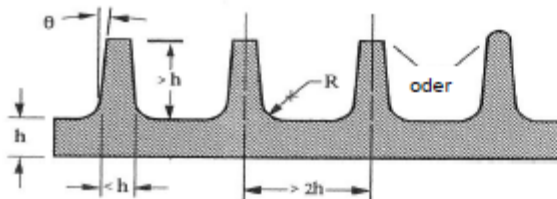
Fertigungsgerechte Rippengestaltung

Problematische Ausführung:



- scharfe Ecke am Grund
 - Überscherung der Schmelze
- ohne Entformungsschräge
 - schwierige Entformung

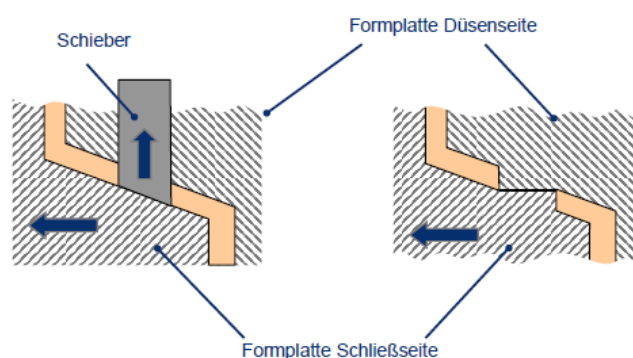
Rippenmodifizierung zur einfacheren Herstellung:



- + bessere Spritzgießbarkeit
 - + verringerte Spannungskonzentration
 - + verringerte Entformungskraft mit $\theta \uparrow$
 - Potenzial für Einfallstellen mit $R \uparrow$
 - verringerte Steifigkeit mit $\theta \uparrow$
- Quelle: Malloy

Vermeidung von Hinterschneidungen

- Bei Teil, das mit Form mit geradem Rückzug gefertigt werden kann, sind alle Merkmale so ausgelegt, dass die beiden Formhälften gerade auseinandergezogen werden können, ohne behindert zu werden
- Bei Teil mit Hinterschneidungen sind Geometrien notwendig, die seitlich und abgewinkelt zur Entformungsrichtung herausgezogen werden.



Empfohlene Vorgehensweise: Hinterschnidungen möglichst vermeiden durch Umgestaltung des Produkts (Werkzeugmehrkosten vermeiden)



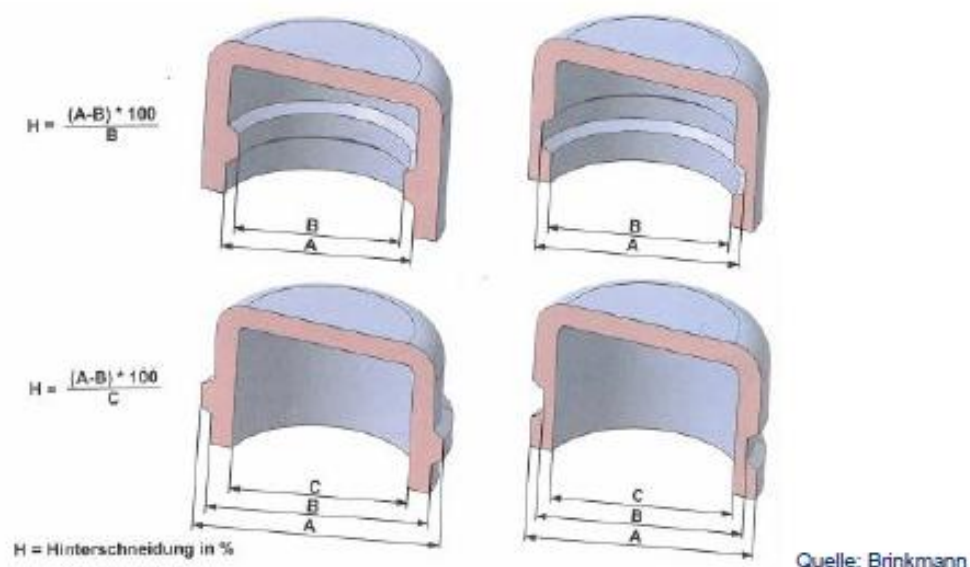
Vermeidung scharfer Kanten

- Scharfe Kanten stellen Belastung für die Schmelze dar, da diese dort stark gesichert wird
- Abformgenauigkeit in scharfkantigen Ecken ist schlecht
→ besser: Scharfe Kanten und Ecken vermeiden und ausreichen abrunden



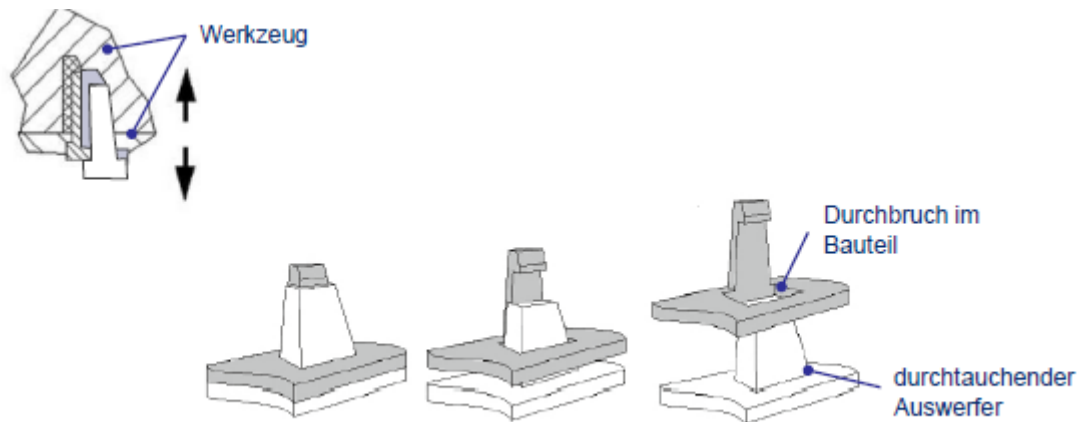
Zwangsentformung: maximal zulässige Hinterschneidung

Berechnung der Hinterschneidung von Formteilen



Möglichkeiten zur Entformung von Hinterschneidungen

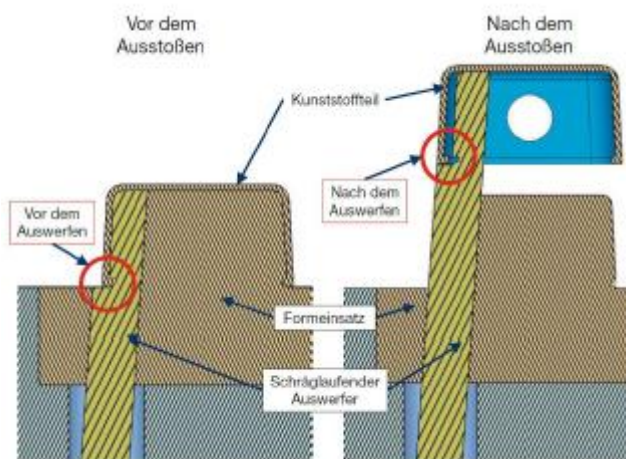
- a) Mit Hilfe von durchtauchenden Auswerfern oder geteilten Lochstiften, die sich nur in eine Entformungsrichtung bewegen (kostengünstige Variante)



→ seitliche Schieber werden vermieden

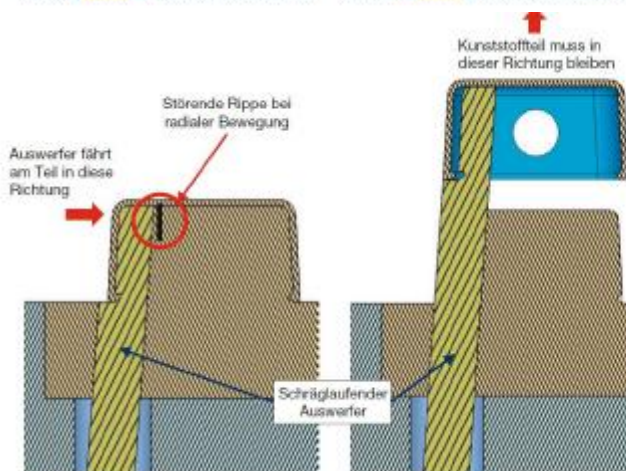
Bildquelle: Eyerer

- b) Mit Hilfe von schräg laufenden Auswerfern (höhere Kosten, verschleiß- und stör anfälliger):



- 1) Auswerferstift bewegt sich vom Bauteil weg
- 2) Hinterschnitt wird freigestellt
- 3) Bauteil kann ausgeworfen werden

Bildquelle: Dangel

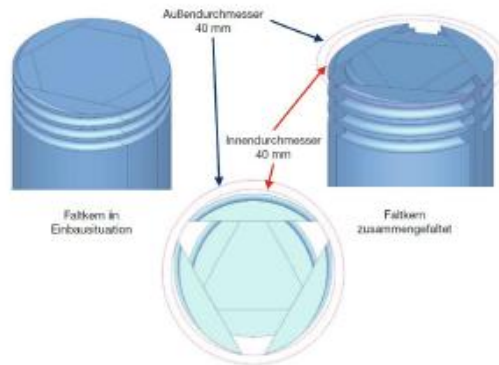


Zu Beachten:

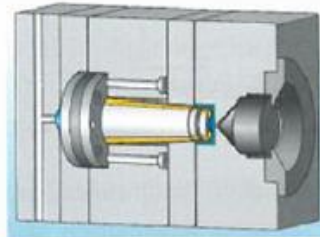
- Kollision mit Rippen o.ä. am Formteil
- Formteilkörperung zum Ablösen vom schräglaufenden Auswerfer notwendig

Bildquelle: Dangel

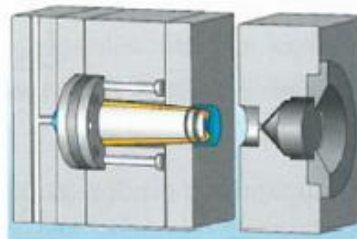
- c) Mit Hilfe von faltbaren Kernen, federnden Auswerfern, geteilten Kernstiften oder Schmelzkernen:
Bsp. Faltkern



- 1) Das Werkzeug ist geschlossen, Spritzgießzyklus wird durchlaufen.

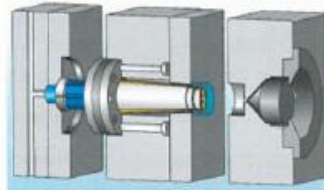


- 2) Nach Erreichen der Entformungstemperatur wird die Form in der Trennebene geöffnet.



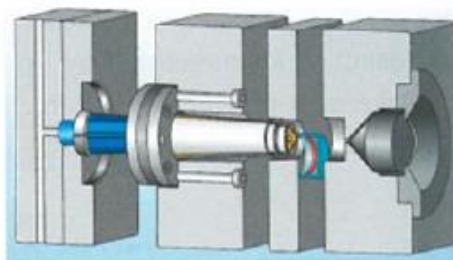
Bildquelle: Brinkmann

- 3) Auswerferseite wird geöffnet und damit der innere Stützkern aus dem Faltkern herausgezogen, Stützsegmente (gelb) und die äußeren konturbildenden Segmente bewegen sich nach innen und geben den Hinterschnitt frei.



Bildquelle: Brinkmann

- 4) Das Bauteil wird durch eine Abstreiferplatte vom Kern geschoben.



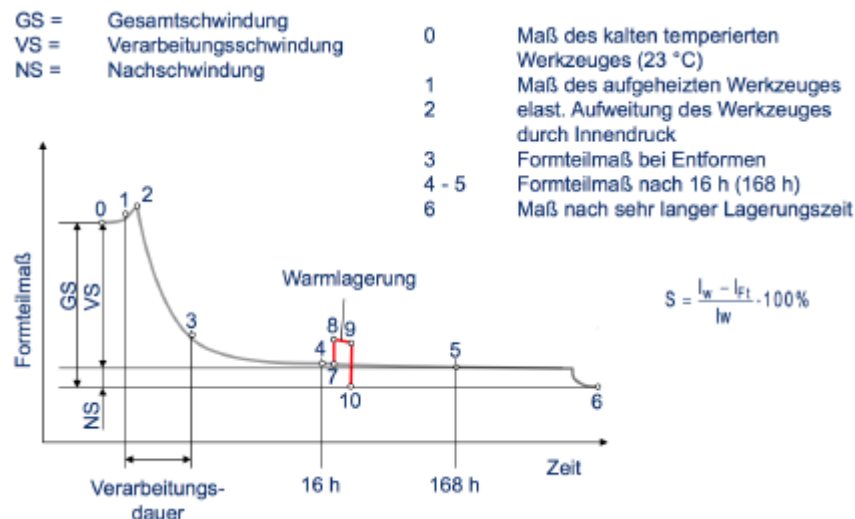
Maßänderungen berücksichtigen

Schwindung und Verzug haben Maßänderungen zur Folge. In diesem Zusammenhang spielen Toleranzen eine wichtige Rolle

Toleranzen:

- Erreichbare Maße von Kunststoffbauteilen stehen in linearer, prozentualer Abhängigkeit vom Nennmaß
 - o Normaler Spritzguss <1%
 - o Technischer Spritzguss <0.6%
 - o Präzisionsspritzguss <0.3%
- Für erreichbare Fertigungstoleranzen ist nicht die absolute Höhe der Schwindung, sondern die prozessbedingte Schwindungsstreuung entscheidend
- Unnötige Toleranzanforderungen führen nicht zu höherer Qualität, sondern zu höheren Ausschussquoten

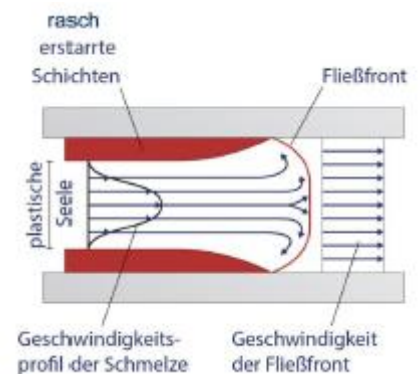
Schwindung an Spritzgießbauteilen



Neben den eigentlichen Fertigungstoleranzen müssen auch die im Betrieb zu erwartenden Maßänderungen beim Festlegen von Maßen und Toleranzfeldern miteinbezogen werden

Entstehung von Orientierungen

Durch Scherung, insbesondere an der Formwand, werden Makromoleküle ausgerichtet und beim raschen Erstarren in diesem Zustand eingefroren. Bei hohen Temperaturen und ausreichenden Verweilzeiten verknäulen bzw. relaxieren die Orientierungen wieder



Beeinflussung von Orientierungen

Möglichkeiten der Beeinflussung von Orientierungen

- Geeignete Wahl der Angusslage
- Überströmkanal
- Fließhilfen
- Fließbremsen
- Extremform von Orientierungen: Bindenaht

Ziel: gleichmäßige oder symmetrische Füllung

Überströmkanal

In Angussnähe und am Fließwegende sind Orientierungszustände weniger gut definiert, als dazwischen.

Wird bestimmte Orientierung bis über Fließwegende hinaus benötigt, kommen Überströmkanäle zum Einsatz

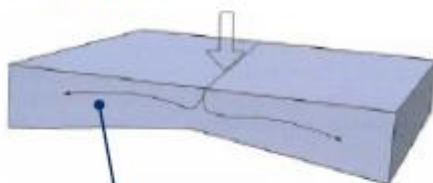
Überstromkanal: Formhohlung, die über das eigentliche Formteil hinausgeht

Fließhilfen bzw. Fließbremsen

Ausgleich von Druckunterschieden im Werkzeug durch Fließhilfen bzw. bremsen → gleichmäßige Füllung der Kavität

Fließhilfe

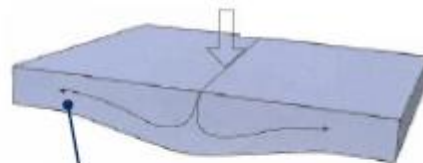
- Querschnittserweiterung
- kanalartige Vertiefung mit größerem Querschnitt



- geringerer Fließwiderstand
- höhere Geschwindigkeit

Fließbremse

- Querschnittsverengung



- höherer Fließwiderstand
- geringere Geschwindigkeit

Bildquelle:

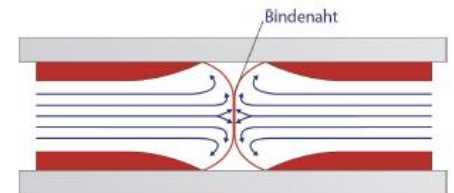
Fließhilfe: Vergleichmäßigung des Füllvorgangs (Verzugfreiheit)

Füllbildsimulation der Seitenwand

- Seitenwände kantenparallel durchströmt
- Verzugsfreiheit durch Faserorientierung
- Verringerung Winkelverzug

Bindenähte: Entstehung und Auswirkung

Extreme Form von Orientierung erzeugt das Zusammenfließen 2er Schmelzfronten. An der jeweiligen Schmelzfront werden Moleküle senkrecht zur Fließrichtung gedehnt und liegen dann an der Grenzfläche parallel vor.



An Bindenähten ist Kraftübertragung meist geringer als im Rest des Bauteils. Die Schwachstelle kann aber auch als Sollbruchstelle genutzt werden (Flaschenverschlüsse)

Beeinflussung von Bindenähten

Geometrie- und strömungsbedingte Bindenähte lassen sich manchmal nicht vermeiden, können aber beeinflusst werden durch:

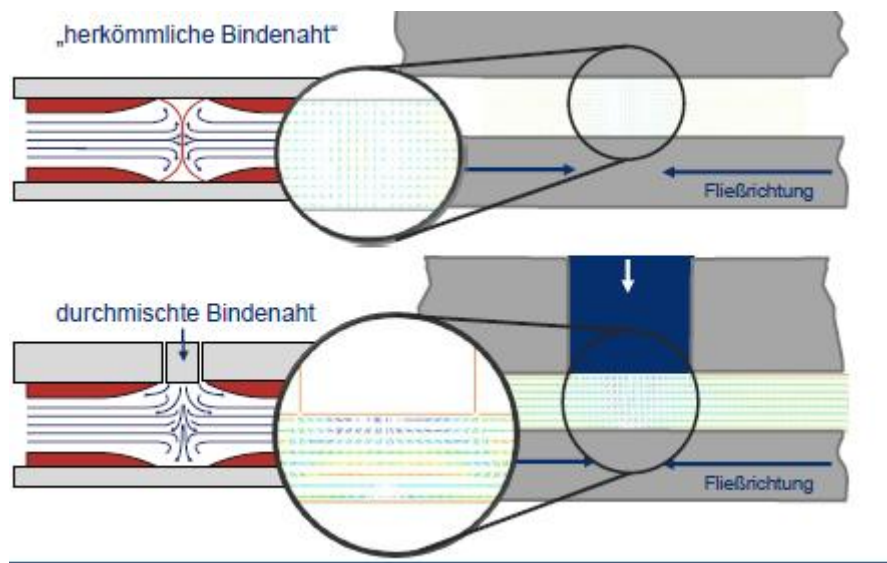
- Prozessbedingungen: Einfluss Massetemperatur bei amorphen Polymeren
- Werkzeugkonstruktion:
 - o Wahl des Angussortes bestimmt Lage der Bindenaht
 - o Mittels Fließhilfen oder –bremsen können Bindenähte aus kritischen Stellen verlagert werden
 - o Sequentielles Spritzgießen
 - o Kaskadenspritzgießen
 - o Schmelze mit Stempel zurückdrücken (Forschung IKT)
- Gestaltungsmaßnahmen: Wanddickenvergrößerung im Bindenahtbereich

Verbesserung der Bindenahtfestigkeit

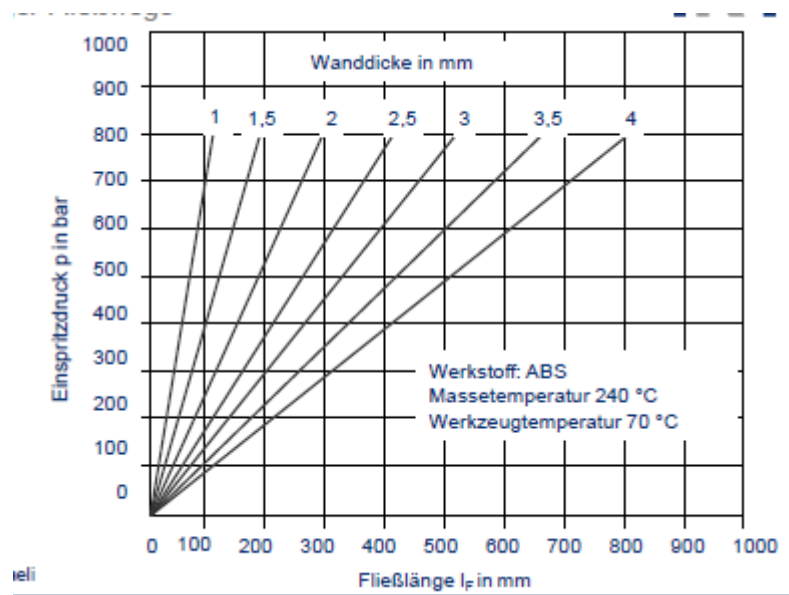
Aktuelle Anwendungen

- Bindenähte oft nicht vermeidbar
- Aktuelle Lösungsansätze lassen Bindenähte optisch verschwinden
- Bindenähte v.a. bei faserverstärkten Kunststoffen → weiterhin mechanische Schwachstelle

Faserorientierungen in der Bindenaht



Vermeidung langer Fließwege



Fertigungsgerechte Gestaltung

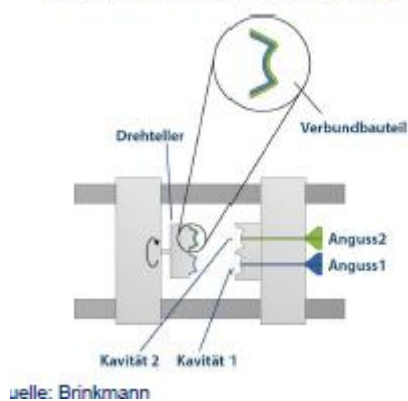
Hart-Weich-Kombination

Eigenschaften

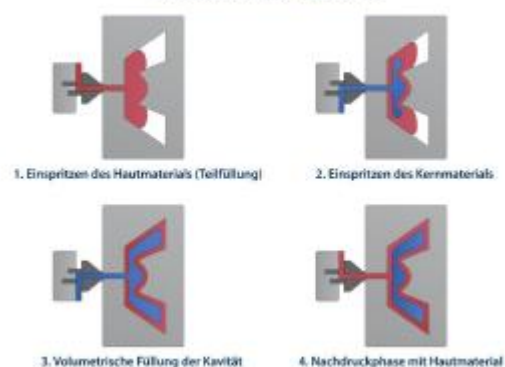
- Harter Grundkörper und hoher Griffkomfort (Haptik)
- Bewegungsfunktion
- Dichtung
- Formschluss
- Dämpfung

Herstellungsverfahren: Mehrkomponentenspritzgießen

Verbund- bzw. Montagespritzgießen



Sandwichspritzgießen



Typische Materialkombinationen

Thermoplast:	Elastomer:
PA6., PA12, PBT	SBR, NR, EAM, EPDM
Thermoplast:	Thermoplastisches Elastomer:
PP, PA	TPE-S
PA, ABS, POM, PC	TPE-U

Allgemeine Gestaltungsregeln (Mehrkomponentenspritzgießen hart-weich)

Grundsätzlich: Gleiche Gestaltungsregeln wie bei Einkomponenten-Spritzgießbauteilen

Ausnahmen: Regel „möglichst gleiche Wanddicke“ gilt nur innerhalb einer Komponente, durch Anspritzung kann Gesamtwanddicke uneinheitlich werden.

Die Regel „Hinterschneidungen vermeiden“ gilt nicht für Hinterschneidungen zwischen den verschiedenen Komponenten. Sie sind zum Teil erwünscht (formschlüssige Verbindung)

Gestaltungs- und Fertigungsvorschriften für Formteile mit thermoplastischen Elastomeren (TPE):

TPE haben während der Verarbeitung oft deutlich niedrigere Viskosität

- Besondere Ausführung der Entlüftung bzw. Dichtebereiche (Gratbildung und Überstpritzungen vermeiden)
- Entlüftungsschlitze mit einer Höhe von 1/100m
- Weichstellen möglichst gleichzeitig füllen

TPE haftet auf glatten Werkzeugoberflächen meist stärker

- Strukturierte Formnestoberflächen und großflächige Konturauswerfer
- Evtl. Unterstützung des Auswerfens durch Druckluft

Höheres Dehnvermögen im Vergleich zu klassischen Thermoplasten:

- Entformung kleinerer Hinterschnitte ohne Schieber möglich

Wanddickengestaltung

Optimale Gestaltung der Wanddicke unterliegt mehreren Kriterien:

- Druckverlust über Fließweg $\Delta p \sim 1/s^2$
- Kühlzeit $t_k \sim s^2$
- Faustregel: von dick nach dünn spritzen

Beeinflussung von Bauteileigenschaften durch die Fertigung

Innere Zustände

- Beschreiben den Zustand des Kunststoffes im Bauteil
- Änderungen der inneren Zustände bewirken Änderungen der Gebrauchseigenschaften
- Durch Verarbeitungsprozesse werden die inneren Zustände verändert (bei Schmelzefluss und Erstarrungsvorgang)
- Durch das Erfassen der Verarbeitungseinflüsse auf die inneren Zustände kann der Einfluss der Verarbeitung auf die Bauteileigenschaften genutzt werden
- Im Wesentlichen beeinflusst werden die inneren Zustände: Eigenspannungen, Orientierungen, Kristallisation

Füllbildermittlung

Berücksichtigung des Füllvorgangs bei der Werkzeuggestaltung

Einfluss der Formteillfüllung auf die Qualität von Spritzgießbauteilen

- Orientierungen
- Entstehung von Bindenähten
- Einschluss von Luft (Dieseleffekt, sog. Brenner)

→kritische Stellen vorher identifizieren und geeignete konstruktive Maßnahmen ergreifen!

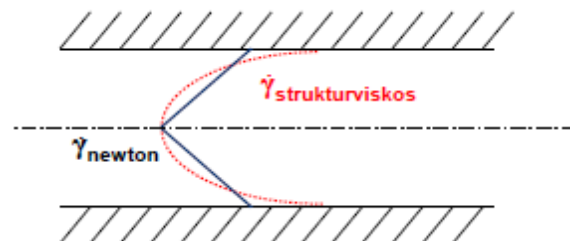
Anwendungen Huygens'schen Prinzip

- Vereinfachte Annahme: Füllvorgang verhält sich wie Wellenausbreitung
- Huygens'sches Prinzip: Jeder Punkt einer Wellenfront ist Ursprung neuer Welle
- Konsequenz: gleichmäßige Ausbreitung der Wellen- bzw. Fließfront in konzentrischen Kreisen
- „Brechungseffekte“ bei Geometrieänderung durch unterschiedliche Strömungswiderstände

Vereinfachte Konstruktion des Füllvorgangs

Vereinfachende Annahmen

- Verwendung Newton'scher Strömungsformel
- Isothermer Füllvorgang
- Auswirkung der seitlichen Kanalwände bei rechteckigen Querschnitten ist vernachlässigbar
- Druckverlust durch Dehnströmung ist vernachlässigbar



Fließfrontverlauf bei Ausbreitung durch zwei Geometrien

- Hagen-Poiseuille Gesetz gibt Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Druckgradienten einer Strömung an:

$$\Delta p = \frac{12 \cdot \dot{V} \cdot \Delta l \cdot \eta}{B \cdot s^3} \quad \text{bzw.} \quad \Delta p = \frac{8 \cdot \dot{V} \cdot \Delta l \cdot \eta}{\pi \cdot r^4}$$

(rechteckiger Querschnitt) (Kreisquerschnitt)

- Einführung der mittleren Fließgeschwindigkeit über dem Kanalquerschnitt:

$$\dot{V} = \bar{v}_x \cdot B \cdot s \quad \text{bzw.} \quad \dot{V} = \bar{v}_x \cdot \pi \cdot r^2 \quad \text{mit} \quad \bar{v}_x = \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

- Anwendung des Potenzgesetzes

$$\eta = K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

Fließfrontverlauf bei Ausbreitung durch 2 Geometrien

$$\Rightarrow \Delta p \sim \frac{\bar{v}_x \cdot \Delta l \cdot \eta}{s^2} \quad \text{bzw.} \quad \Delta p \sim \frac{\bar{v}_x \cdot \Delta l \cdot \eta}{r^2}$$

Annahme gleichen Druckverlusts ($\Delta p_1 = \Delta p_2$) in alle Fließrichtungen für Δt :

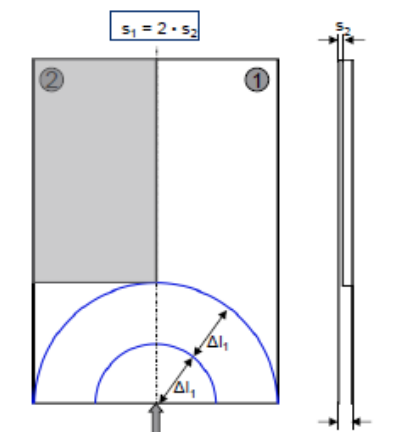
$$\Rightarrow \frac{\Delta l_1}{s_1} = \frac{\Delta l_2}{s_2} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\Delta l_1}{r_1} = \frac{\Delta l_2}{r_2}$$

Beispiele für Fließfrontkonstruktion bei einfachen, abwickelbaren Teilen

- Eben Platte mit Bereichen unterschiedlicher Wanddicke
- Ausbreitung der Fließfront im Bereich 1 in konzentrischen Kreisen (Mittelpunkt=Anguss) mit jeweiligem Abstand Δl_1

Anwendungsgrenzen

- Keine Berücksichtigung der Kontinuitätsgleichung durch Annahme gleicher Druckgradienten
 - o Unkritisch bei geringen Wanddickenunterschieden
 - o Bei Bauteilen mit großen Wanddickensprüngen müssen die Änderung der Druckgradienten und der Volumenströme berücksichtigt werden (hoher Rechenaufwand)
- Einfriereffekte in unterschiedlichen Geometrien können nicht ausreichend erfasst werden
 - o Ebenfalls vor allem für Bauteile mit hohen Wanddickensprüngen problematisch
- Füllbilder sind nicht gleichzusetzen mit Simulationen! Sie dienen vor allem einer ersten Abschätzung kritischer Bereiche im Werkzeug und sind nicht exakt



Füllbildermittlung mit Rechnern

- Füllbildermittlung auf Basis exakter Berechnungen am Rechner möglich
- Finite-Elemente-Methode auf Basis von Energie-, Impuls- und Massenerhaltungssatz
- Schnelle Variation von Angusszahl und –lage möglich zur Optimierung des Füllverhaltens

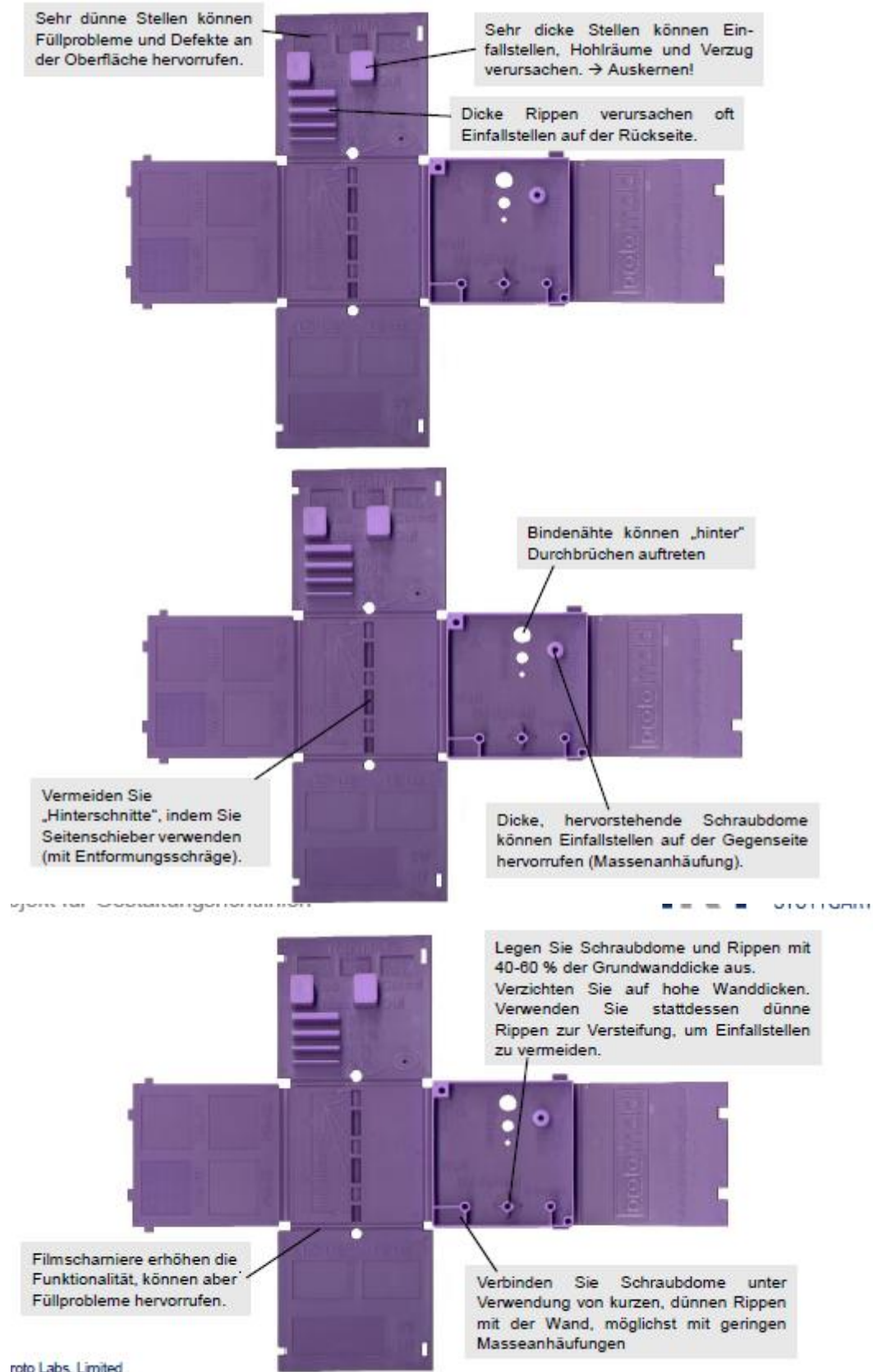
Ziele:

- Möglichst wenig Bindenähte
- Geeignete Orientierung
- Möglichst gleichlange Fließwege

Nutzen der Gestaltungsfreiheit

- Integration von Funktionselementen
- Schraubdome zur Gehäuseverbindung

Allgemeine Richtlinien der Produktgestaltung



Gestaltung von Spritzgießprodukten

Werkstoffgerechte Konstruktion

- Gleiche Wanddicken vorsehen und Massenanhäufungen vermeiden, damit Abkühlen und Schwindung gleichmäßig und Vermeidung von Lunkern und Verzug
- Kraftaufnahme so gestalten, dass Spannungsspitzen vermieden werden, z.B. durch großzügige Radien bei Filmscharnieren
- Rippen spritzgerecht gestalten zur Einfallstellenvermeidung auf der Rückseite
- Großflächige eben Flächen vermeiden, um Verwerfungen zu reduzieren
- Gewinde/Formteile spritzgerecht gestalten, um Nachbearbeitung zu vermeiden

Beanspruchungsgerechte Konstruktion

- Gleichmäßige Lasteinleitung vorsehen, Kernspannungseffekte durch scharfe Kanten vermeiden → Ausbuchtungen und Radien vorsehen
- Hohe Flächenträgheitsmomente über Rippen, Hohlstrukturen und Wölbungen realisieren
- Auslegung erfolgt überschlägig mit analytischen und empirischen Verfahren

Fertigungsgerechte Konstruktion

- Wanddicke so gering wie möglich, um geringe Zykluszeit zu realisieren. Hierbei muss allerdings die Fließfähigkeit des einzusetzenden Werkstoffs berücksichtigt werden
- Ecken und Kanten mit Radien versehen, für guten Materialfluss, gute Entformung sowie geringe Kerbspannung
- Ausreichende Konizitäten vorsehen für gute Entformung
- Hinterschneidungen vermeiden für möglichst einfaches Werkzeugkonzept
- Positionierung des Angusses beachten, um wenig Bindenähte, geeignete Orientierungen und gleichmäßige Fließwege zu erreichen

11) Fügegerechtes Konstruieren

Einteilung der Fertigungsverfahren:

Schaffen der Form	Ändern der Form				Ändern der Stoffeigenschaften
Zusammenhalt schaffen	Zusammenhalt beibehalten	Zusammenhalt vermindern	Zusammenhalt vermehren		
Hauptgruppe 1	Hauptgruppe 2	Hauptgruppe 3	Hauptgruppe 4	Hauptgruppe 5	Hauptgruppe 6
Urformen	Umformen	Trennen	Fügen	Beschichten	Stoffeigen-schaftändern

- Schweißen
- Kleben
- Schnappen
- Schrauben
- Nieten

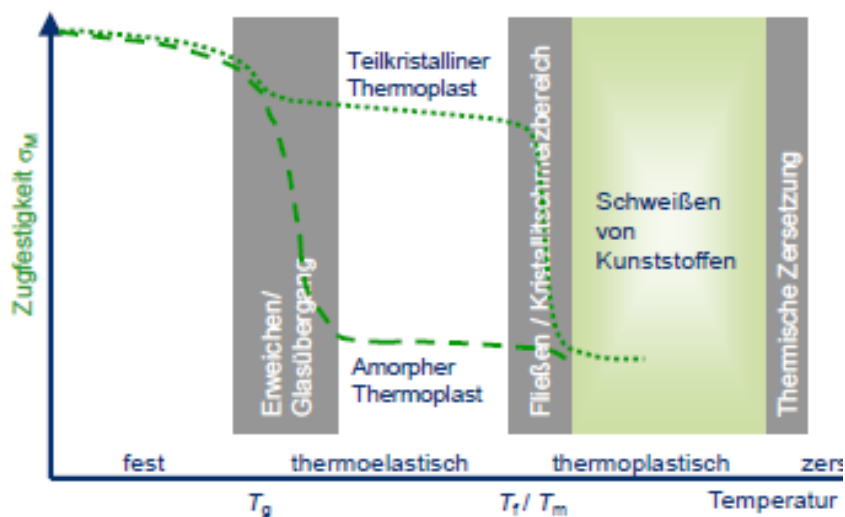
Schweißen

= unablösbare Verbinden von Bauteilen unter Anwendung von Wärme und/oder Druck, mit oder ohne Schweißzusatzstoffen.
Zum Schweißen von Kunststoffen müssen die Fügepartner in der Fügeebene im thermoplastischen Zustand sein → Duomere und Elastomere können nicht geschweißt werden.

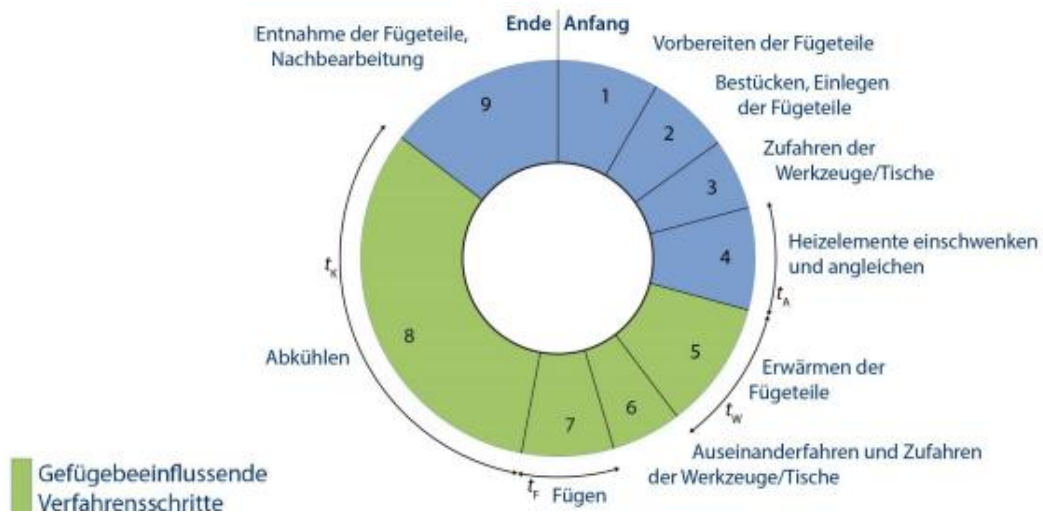
Bei ungleicher Werkstoffpaarung ist Schweißbarkeit zu prüfen



Der Fügevorgang lässt die Moleküle der Fügepartner verknäulen und gemeinsam erstarren



Grundlegende Prozessschritte



Allgemeine Gestaltungsgrundsätze von Schweißnähten

- Wanddickenunterschiede und Bindenähte im Bereich der Fügezone vermeiden

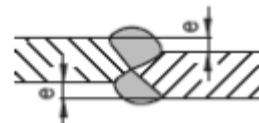


- Ausreichend groß bemessene Radien an Ecken und Übergängen
- Anhäufungen von Schweißnähten und Nahtkreuzungen vermeiden
- Fügeteile ausreichend dimensionieren für eine gleichmäßige Kraftübertragung in der Fügezone
- Bei Kehlnähten müssen die zur Kraftübertragung erforderlichen Querschnitte vorhanden sein
- Alle Verbindungen an der Wurzel gegenschweißen oder beidseitig schweißen, einseitig zugängliche Nähte an der Wurzel einwandfrei durchschweißen

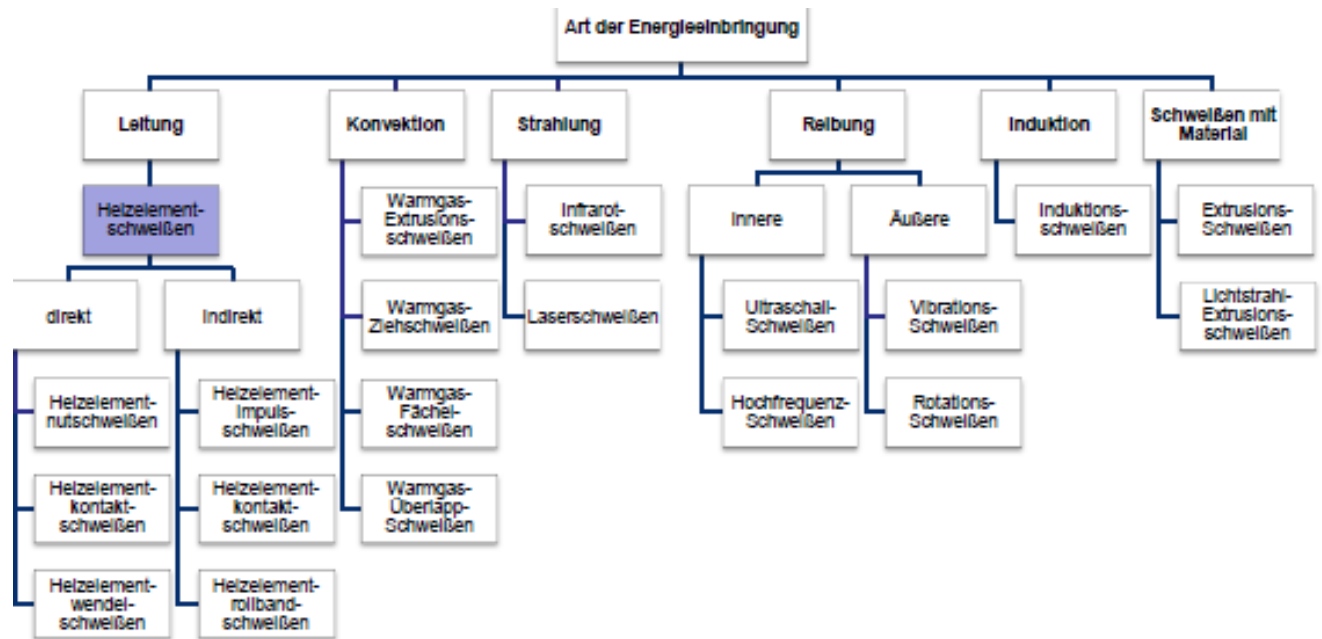
einseitig geschweißte Naht



beidseitig geschweißte Naht



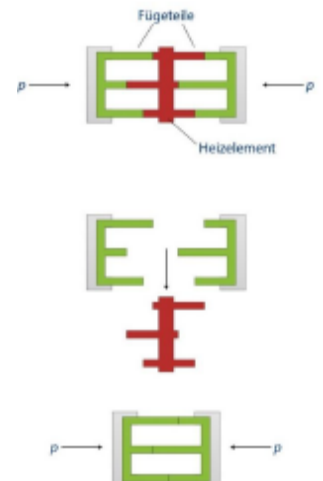
Schweißverfahren



Heizelementschweißen

Funktionsprinzip

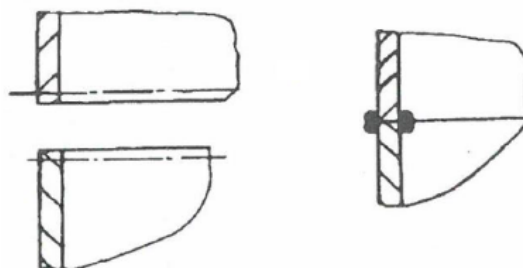
- 1) Angleichen von Unebenheiten/Erwärmen (Plastifizieren)
- 2) Umstellen (Entfernen des Heizelements)
- 3) Fügen (Schweißen der plastifizierten Fügeflächen unter Fügedruck) und Abkühlen



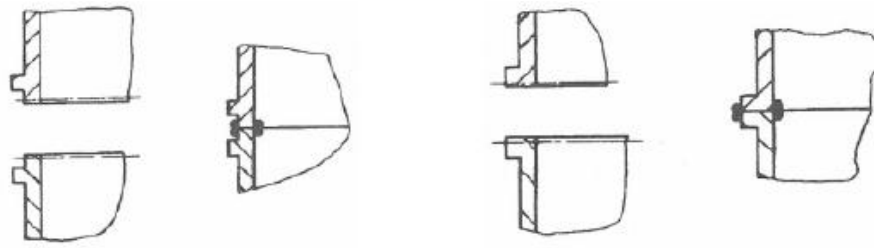
Vorteile	Nachteile	Nahteigenschaften
- Hohe Prozesssicherheit bei minimaler Fehlermöglichkeit - umfangreiche Kenntnisse vorhanden	- Eingeschränkte Werkstoffpalette durch Haftung am Heizelement - lange Zykluszeit - hoher Energiebedarf	- hohe Kurz- und Langzeitfestigkeiten - deutliche Wulstbildung

Fügezonengeometrie

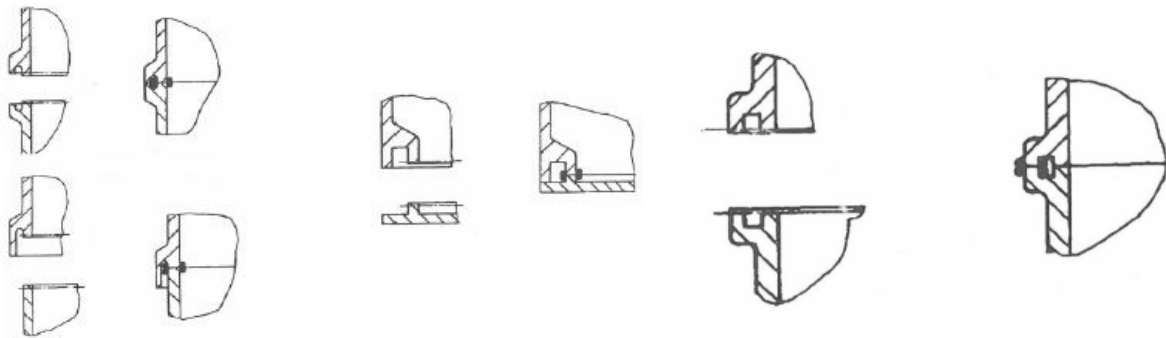
Stumpfstoß Grundform: einfacher Stumpfstoß



Modifizierter Stumpfstoß



Fügezonen mit verdeckter Schweißnaht (ästhetische Gründe)



→ auch Geräuschminderung, Strömungswiderstand verringern

Vibrations-Schweißen

Funktionsprinzip

Die Fügeteile werden durch Reibbewegung erwärmt und plastifiziert, steife Fügeebenen erforderlich

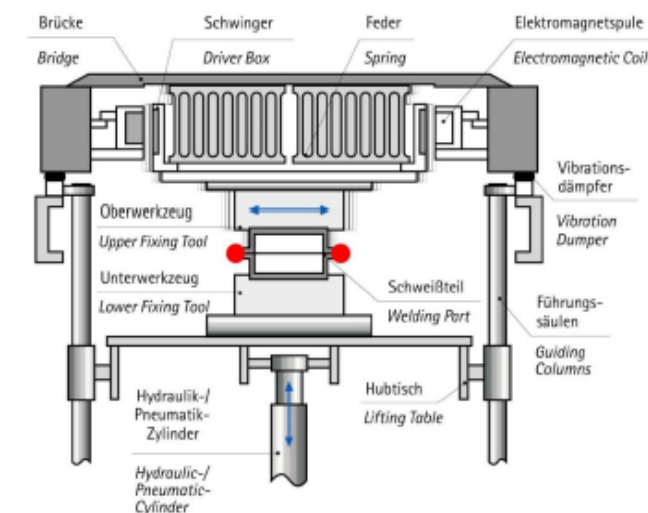
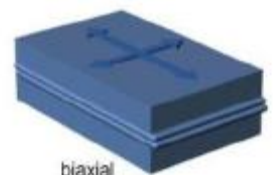
Linear

- 2,5 dimensionale Fügeflächen
- Einfachere Maschinenteknik gegenüber biaxialem Vibrations-schweißen



Biaxial

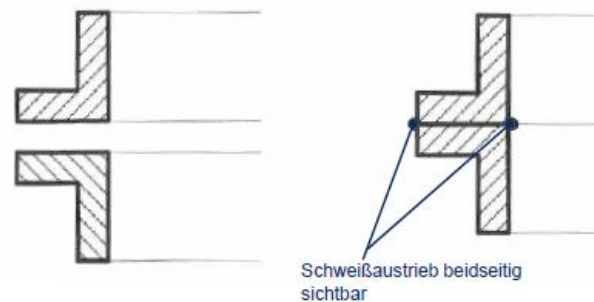
- 2-dimensionale Fügefläche
- Kürzere Zykluszeiten gegenüber linearem Vibrationsschweißen



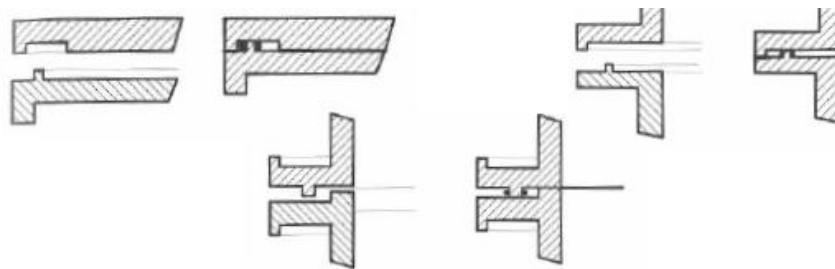
Vorteile	Nachteile	Nahteigenschaften
▪ kurze Zykluszeit ▪ mehr als 2 Teile können verbunden werden ▪ für große Teile geeignet (Stoßfänger) ▪ energieeffizient	▪ fusseliger Abrieb nicht immer zu vermeiden ▪ Schallschutz z. T. erforderlich	▪ gute Schweißqualität ▪ hohe Reproduzierbarkeit

Fügezonenengeometrie

Stumpfstoß Grundform

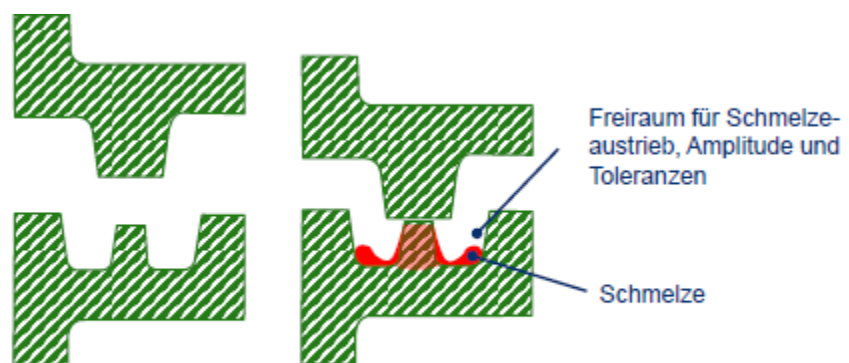


Modifizierter Stumpfstoß



→ Schweißaustrieb durch sog. Fangräume einseitig verdeckt

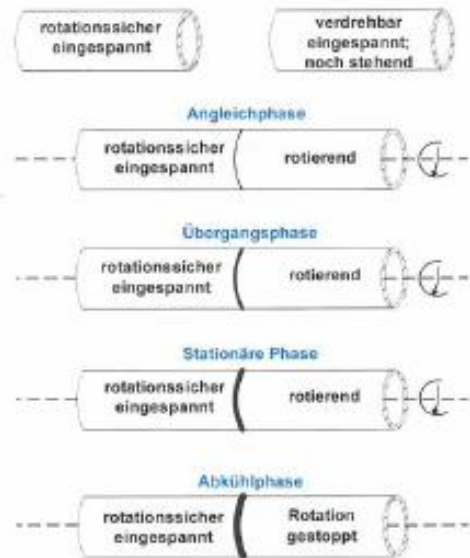
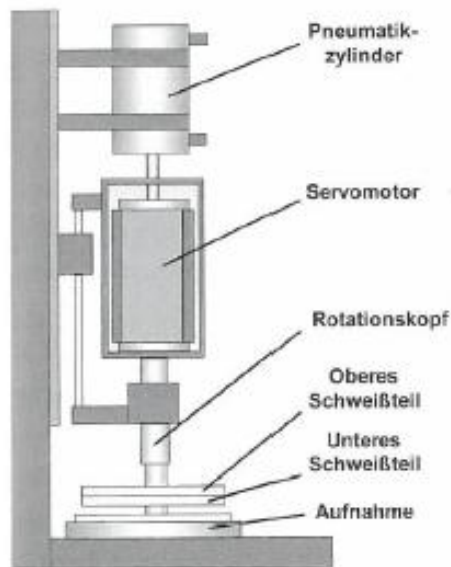
Doppelsteggeometrie



→ Berücksichtigung der zu erwartenden Schwingungsamplitude

Rotationsschweißen

Funktionsprinzip

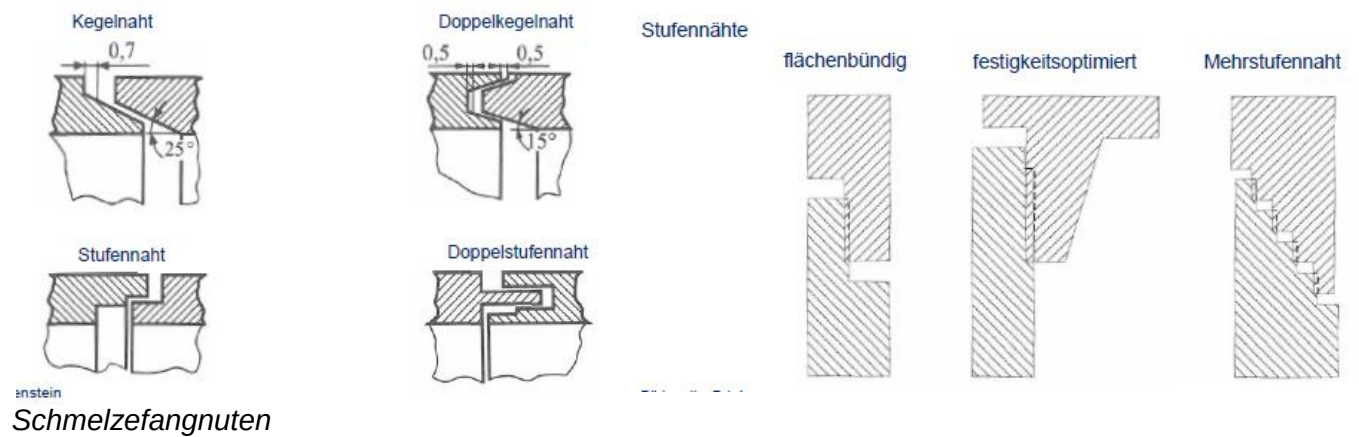


Vorteile	Nachteile	Nahtigenschaften
- kurze Zykluszeit - Schweißvorrichtung kann improvisiert werden (z. B. Drehmaschine)	Einschränkung auf Teile mit rotationssymmetrischer Naht	- gute Schweißqualität - hohe Reproduzierbarkeit

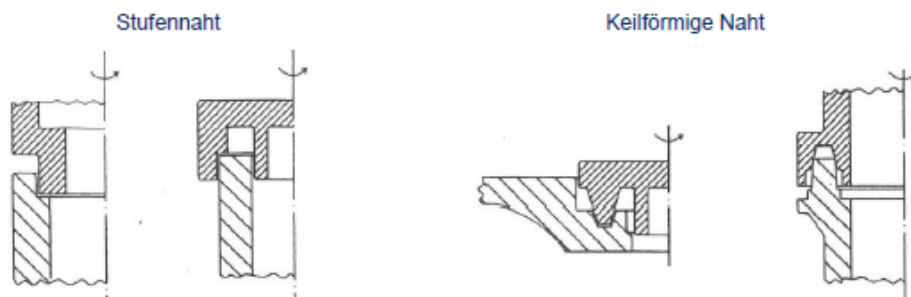
Gestaltungsmöglichkeiten von Rotationsschweißnähten

	Stumpfnah	Kegelnah	Stufennah
Vorteile	- preiswert, einfach herzustellen - Gleichmäßige Schmelzeschicht, homogene Fügenah	- Selbstzentrierung - größere Fügenahfläche	Selbstzentrierung
Nachteile	- keine Selbstzentrierung - fehlende Kaschierung des Schmelzeaustritts	teurer, Herstellung aufwendiger	- enge Toleranzen der Stufen - unterschiedlichen Schrumpf der Stufen, erhöhte Eigenspannungen - Schubbelastung bei Kraftübertragung

Fügezonengeometrie

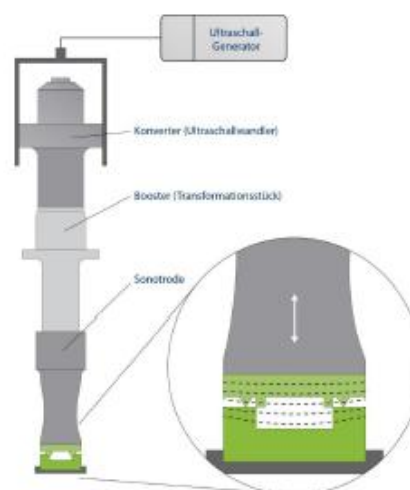


Für ästhetische Fügenähte muss der Schweißaustrieb aufgefangen und kaschiert werden.
→ Schmelzefangnuten



Ultraschall-Schweißen

Funktionsprinzip

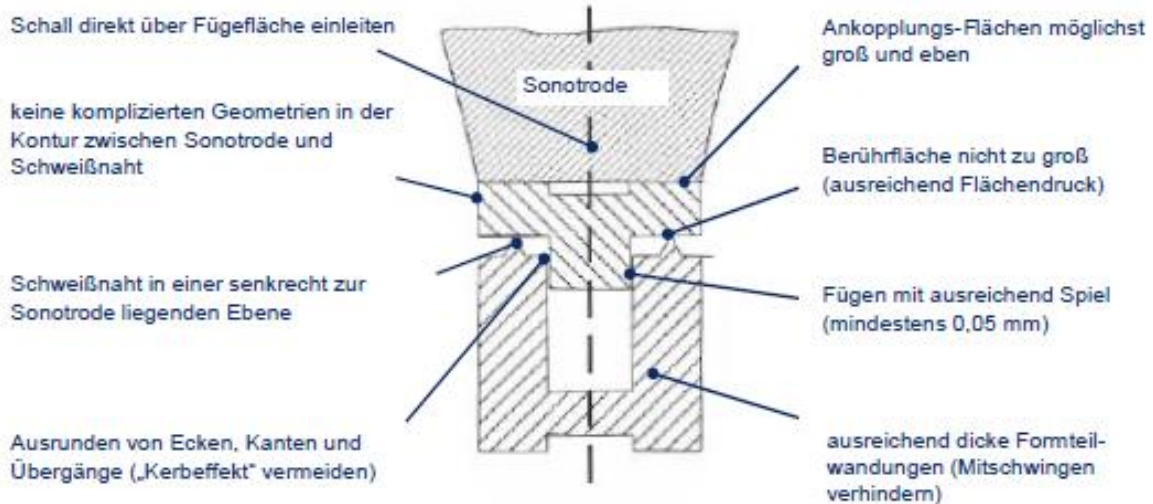
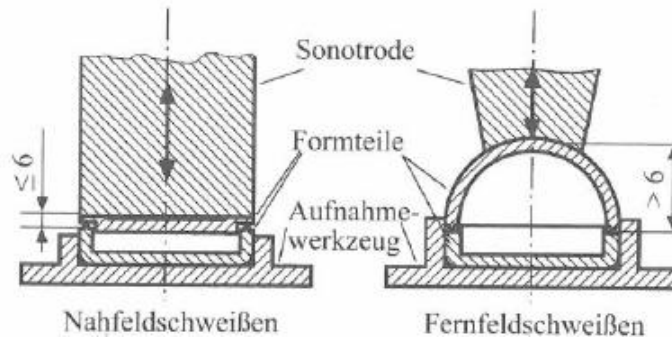


Vorteile	Nachteile	Nahteigenschaften
- sehr kurze Zykluszeiten - gut automatisierbar - energieeffizient	- spezielle Nahtkonturen erforderlich - bei Dichtschweißung Größe begrenzt - Schallschutz notwendig	geringe Schmelzeschichtdicke, dadurch nur mittlere Nahtfestigkeit

Fügezonengeometrie

Man unterscheidet je nach Abstand der Sonotrode zur Fügezone zwischen Nah- und Fernfeldschweißen

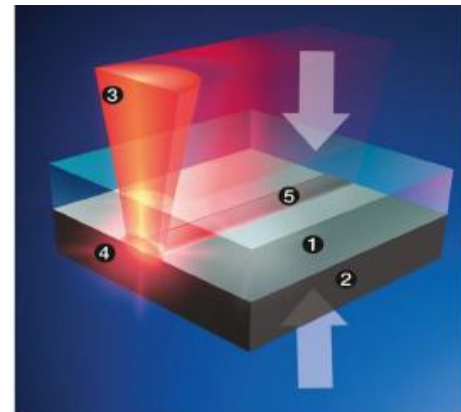
- Nahfeld: $< 6 \text{ mm}$
- Fernfeld: $> 6 \text{ mm}$



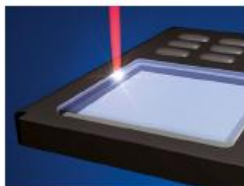
Laserschweißen

Funktionsprinzip

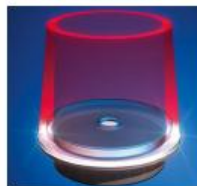
- Energie wird durch einen für die Laserstrahlung transparenten Fügepartner (1) in die Fügeebene (2) eingebracht
- Durch Absorption der Laserstrahlung (3) wird das absorbierende Fügeteil aufgeschmolzen (4). Das transparente Fügeteil wird dann durch Wärmeleitung geschmolzen
- Spezielle Pigmente erzeugen unterschiedliches Absorptionsverhalten



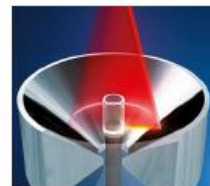
Konturschweißen



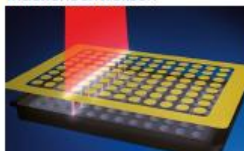
Simultanschweißen



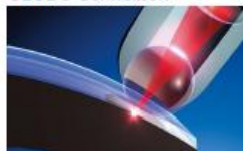
Radialschweißen



Maskenschweißen



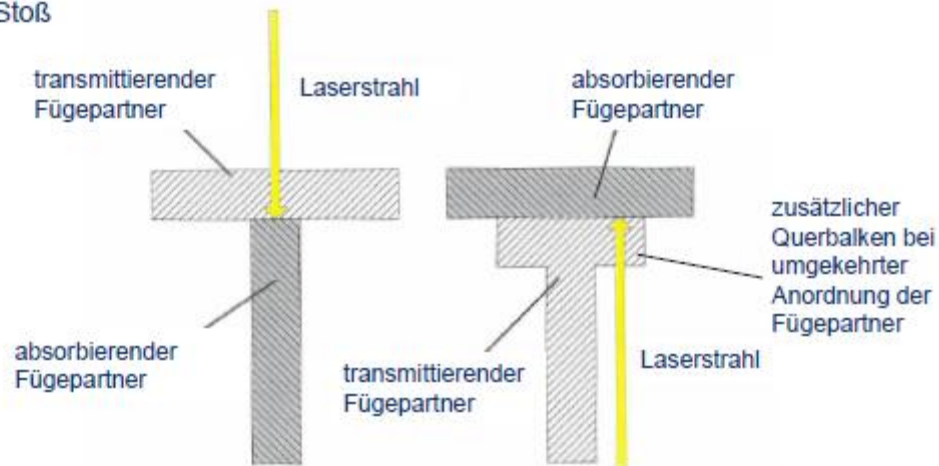
GLOBO-Schweißen



Vorteile	Nachteile	Nahteigenschaften
- keine mechanische Belastung - kein fusseliger Abrieb - örtlich begrenzte Wärme - komplizierte 3D-Konturen ausführbar	Bei Durchstrahlverfahren müssen Fügeteile unterschiedliche Absorptionseigenschaften aufweisen.	Dichtschweißung abhängig vom Verfahren möglich

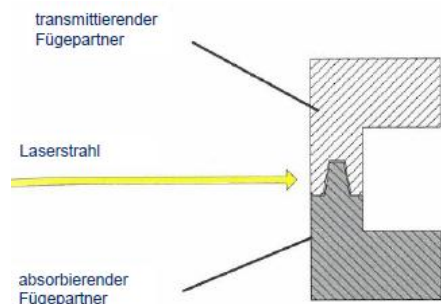
Fügezonengeometrie

Einfacher T-Stoß

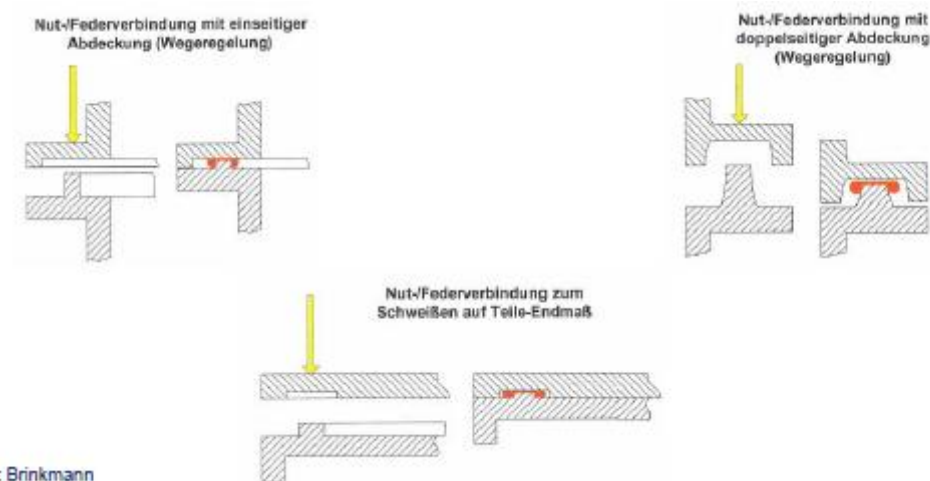


Feder-Nut-Naht

- Gut geeignet zum Ausgleich von Formteiltoleranzen
- Ausbildung eines optisch ungünstigen Wulstes wird verhindert

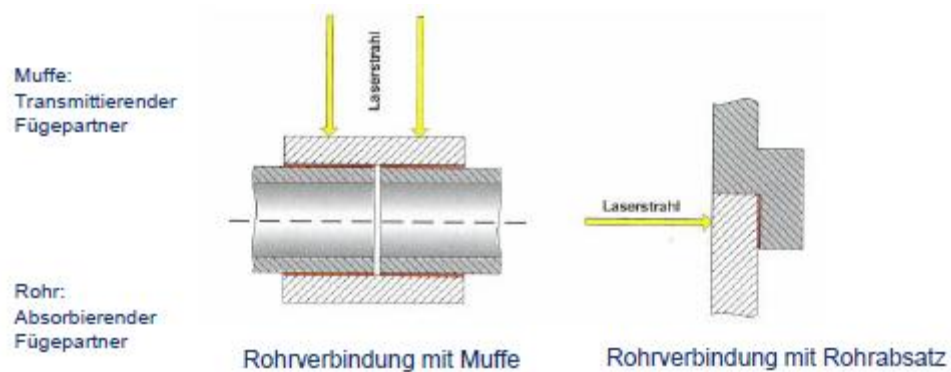


Abdeckung des Schweißaustritts beim sog. Simultan- oder Quasisimultanschweißen



: Brinkmann

Rohr-/Muffenverbindung mit Presspassung



Um einen ausreichenden Schweißdruck bei Rohrverbindungen gewährleisten zu können, sollte eine Presspassung vorliegen oder das GLOBO-Schweißverfahren angewendet werden

Schweißfaktor f_s

- Strukturelle und geometrische Kerben an den Fügestellen → Störung des homogenen Werkstoffzustands
- Konstruktiv bedingte Querschnittsänderungen an der Schweißnaht → Störung des Kraftflusses

→ Schweißfaktor f_s berücksichtigt das unterschiedliche mechanische Verhalten der Schweißverbindung im Vergleich zum umgebenden Grundmaterial:

$$f_s = \frac{\text{Zugfestigkeit der Schweißverbindung}}{\text{Zugfestigkeit des Grundwerkstoffs}}$$

f_s ist abhängig vom Werkstoff, den Schweißverfahren/-parametern und der Art der Belastung.

Schweißfaktor kann als Abminderungsfaktor direkt zur Dimensionierung genutzt werden. Beim mehrachsigen Spannungszustand werden die größten auftretenden Normalspannungen bzw. Dehnungen mit der zulässigen Spannung σ_{zul} verglichen:

$$\sigma_{zul} = \frac{\sigma \cdot f_s}{A_i \cdot S}$$

mit:

σ = Zeitstandfestigkeit bei Betriebsbedingungen

A_i = Werkstoffabminderungsfaktoren

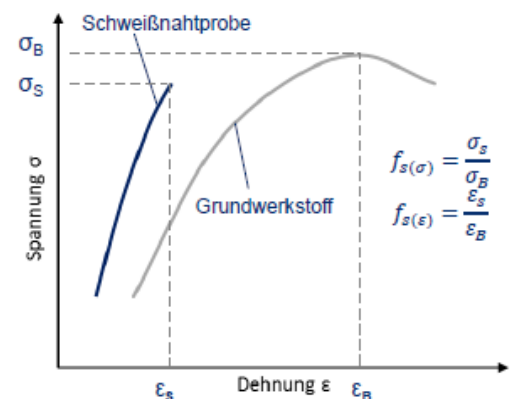
f_s = Schweißnahtfaktor

S = Sicherheitsbeiwert

Kurzschweißfaktor

Verwendung:

- Vergleich der Schweißbarkeit unterschiedlicher Kunststoffe
- Optimierung der Schweißparameter
- Auswahl des Schweißverfahrens
- Geringe Aussagekraft → häufig nur zur Vordimensionierung verwendet



Ermittlung: aus dem Zugversuch

Übersichtstabelle Schweißverfahren

Verfahren	Prinzip	Vorteile	Nachteile	Anwendung/Teileart	Nahtigenschaften
Heizelement-schweißen	Fügeflächen werden mit Heizelement durch Wärmestrahlung durch Berührung / berührungslos plastifiziert und unter Druck geschweißt.	Hohe Prozesssicherheit bei minimaler Fehlermöglichkeit, umfangreiche Kenntnisse vorhanden	Eingeschränkte Werkstoffpalette durch Haftung am Heizelement, lange Zykluszeit, hoher Energiebedarf	Serienschweißen: Formteile wie Rückleuchten, Haushaltsgeräte; Handwerk: Apparate- und Rohrbau, Fenster	hohe Kurz- und Langzeitfestigkeiten bis zur Materialfestigkeit, deutliche Wulstbildung
Vibrations-schweißen	Fügeteile werden in einer oszillierenden, translatorischen Relativbewegung unter definiertem Druck solange gegeneinander gerieben, bis die Werkstoffe in den Berührungszonen aufschmelzen.	kurze Zykluszeit, mehr als 2 Teile zu verbinden, für große Teile geeignet (Stößränger), energieeffizient	fusseliger Abrieb nicht immer zu vermeiden, Schallschutz z. T. erforderlich	Serienschweißen von Formteilen in der Kraftfahrzeug-, Elektro- und Haushaltsgeräte-Industrie	gute Schweißqualität, hohe Reproduzierbarkeit
Rotations-schweißen	Kunststoffteile werden mit den Fügestellen aufeinander gepresst und ein Fügeteil wird in eine rotierende Bewegung versetzt. Der Wärmeeintrag erfolgt durch Reibungsverluste. Ein Fügeteil muss eine rotationssymmetrische Kontur aufweisen.	kurze Zykluszeit, Schweißvorrichtung kann improvisiert werden (z. B. Drehmaschine)	Einschränkung auf Teile mit rotationssymmetrischer Naht	Serienschweißen und Einzelanfertigung von Teilen mit mindestens einer rotationssymmetrischen Fügestelle	gute Schweißqualität, hohe Reproduzierbarkeit

Verfahren	Prinzip	Vorteile	Nachteile	Anwendung/Teileart	Nahtigenschaften
Ultraschall-schweißen	Hochfrequente mechanische Schwingungen verursachen eine Molekular- und Grenzflächenreibung in der Fügezone	sehr kurze Zykluszeiten, gut automatisierbar, energieeffizient	spezielle Nahtkonturen erforderlich, bei Dichtschweißung Größe begrenzt, Schallschutz notwendig	Serienschweißen von kleinen und mittleren Bauteilen der Auto-, Elektro- und Hausgeräte-Industrie	geringe Schmelzschichtdicke, dadurch nur mittlere Nahtfestigkeit
Laserstrahl-schweißen	Ein Laserstrahl erwärmt die Schweißstelle lokal bis auf Schmelztemperatur. Die Werkstoffschmelze erstarrt und bildet dann die Schweißnaht	Keine mechanische Belastung, kein fusseliger Abrieb, örtlich begrenzte Wärme, komplizierte 3D-Konturen ausführbar	Bei Durchstrahlverfahren müssen Fügeteile unterschiedliche Absorptionseigenschaften aufweisen	Durchstrahl-schweißen in der Serienfertigung von empfindlichen Teilen: Sensoren, Elektronikgehäuse, Behälter	Dichtschweißung abhängig vom Verfahren möglich

Kleben

- Unter Kleben ist das nicht lösbare Verbinden/Fügen zwischen verschiedenen oder gleichen Werkstoffen/Materialien zu verstehen
- Das Verbinden/Fügen geschieht mit Hilfe eines Klebstoffes, welcher auf die Werkstoffe/Materialien aufgetragen oder zwischen ihnen eingebracht wird. Kleben ist somit eine feste und dauerhafte Oberflächenverbindung
- Kleben kann man alle Kunststoffe, d.h. neben Thermoplasten können auch Elastomere und Duromere geklebt werden (dagegen: nur Thermoplaste schweißbar!)
- Klebstoff ist ein nicht-metallischer flüssiger, plastischer oder fester Stoff der Füge Teile unterschiedlicher/gleicher Materialien durch Flächenhaftung (Adhäsion) und innere Festigkeit (Kohäsion) zeitweise oder dauerhaft miteinander verbinden kann

Vorteile	Nachteile
Kann zusätzliche Aufgaben erfüllen (Abdichten, Überbrücken von Unebenheiten, Schwingungsdämpfung, thermische oder elektrische Isolation)	Verbindung sollte nur auf Scherung belastet werden
Gute Flächenausnutzung	Aufwendige Vorbereitung der Fügeflächen
Verzugsausgleich in Grenzen möglich	Einige Kunststoffe schwer klebbar (PA, PE; PP)
	Aushärten oft sehr zeitaufwändig

Verfahrensablauf



Einteilung

Physikalisch abbindend
(Erstarrung durch Abkühlen bzw.
Abdampfen eines Lösungsmittels):

Lösungsmittelklebstoff

- Dispersionsklebstoff (UHU®)
- Schmelzklebstoff
- Kontaktklebstoff (Pattex®)

Chemisch abbindend

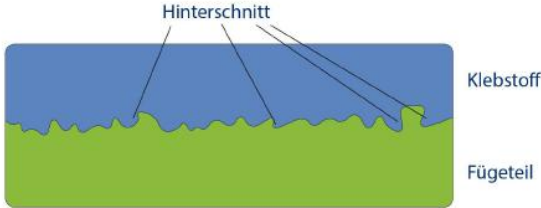
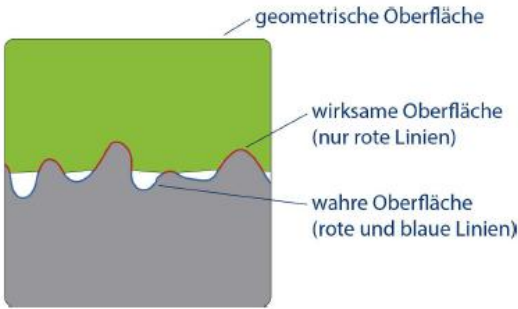
(Erstarrung durch Bildung chemischer
Bindungen / Netzstruktur):

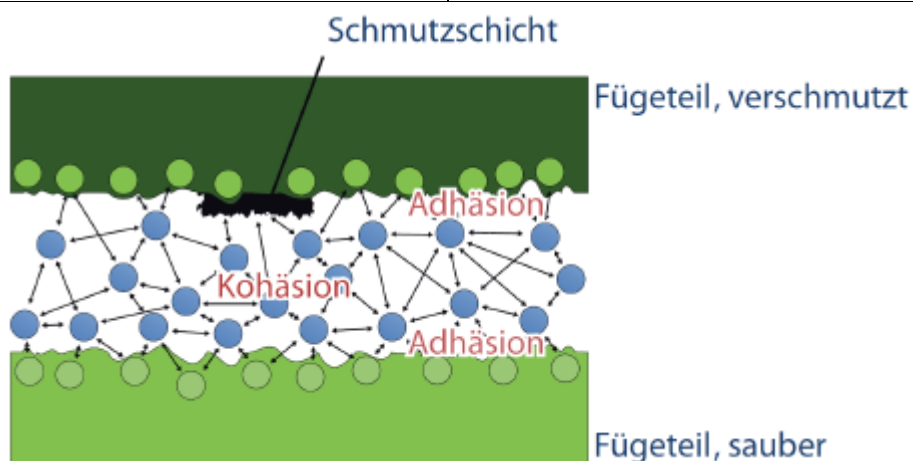
- Polymerisationsklebstoff
(1K und 2K)
- Polyadditionsklebstoff
- Polykondensationsklebstoff
(1K und 2K)

1K: die Reaktion wird nachträglich initiiert durch
z.B. Wärme, UV-Strahlung, Luftfeuchte

Klebstoff muss zunächst in flüssiger Form vorliegen, um in alle Zwischenräume zu gelangen und dann fest zu werden.

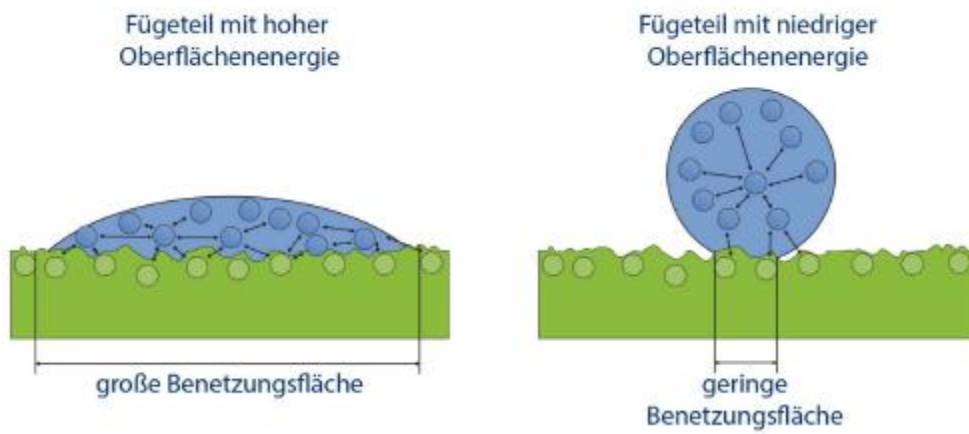
Wirkmechanismen Adhäsion

Mechanische Adhäsion	Spezifische Adhäsion
Haftung durch Hinterschnitte, hinter die der flüssige Klebstoff gelaufen ist.	Haftung durch Ausbildung zwischenmolekularer Kräfte:
	- Dipol-Dipol-WW - Dispersionskräfte - Wasserstoffbrückenbindungen
	

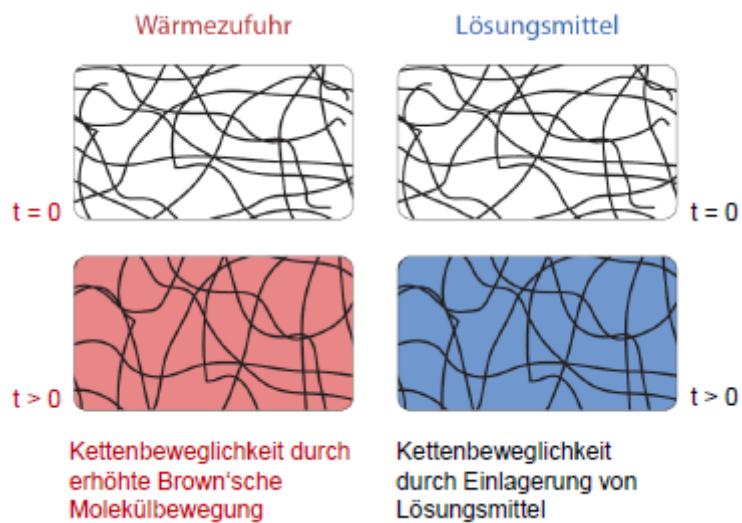


Spezifische Adhäsion (Nebenvalenzkräfte)

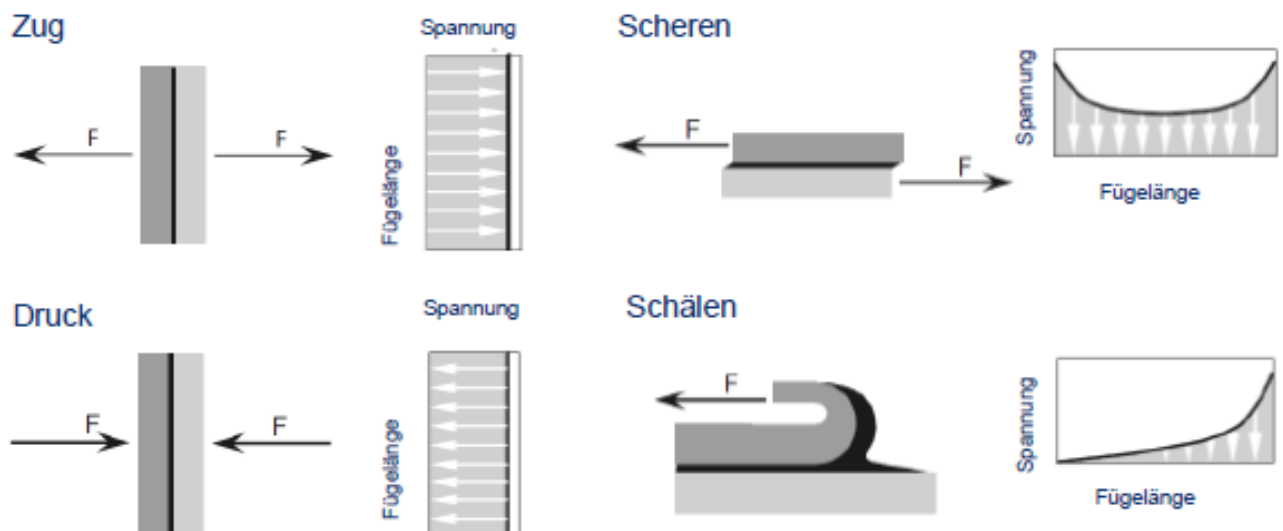
Polarität wichtig!



Kaltschweißen durch Anlösen der Oberfläche

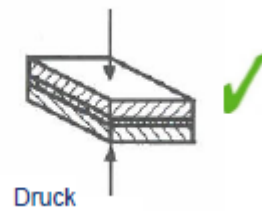
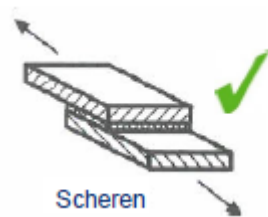


Spannungsausbildung bei unterschiedlicher Beanspruchung



Beanspruchungsarten

Klebschicht möglichst nur auf Scherung und/oder Druck beanspruchen

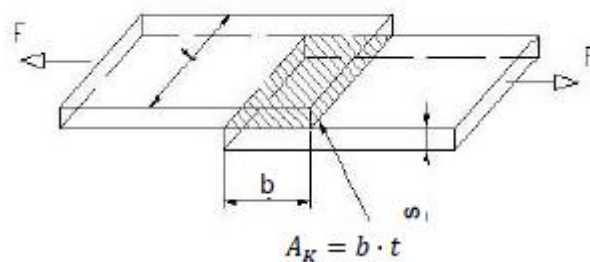


Schälbeanspruchung stellen einen linienförmigen Kraftangriff dar
→ vermeiden durch geeignete Maßnahmen ausgleichen

Klebgerechte Gestaltung der Konstruktion

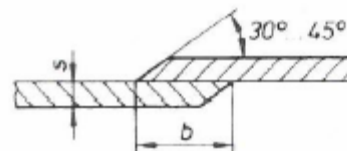
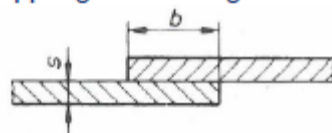
Es gilt als grobe Faustformel:

Überlappungslänge $b \sim 3$ bis 5-fache Fügeiteildicke, mindestens 10mm

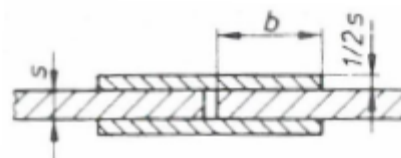
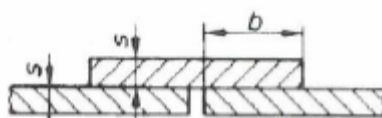


Einfluss der Überlappungsbreite t auf die Festigkeit von Klebverbindung ist im Gegensatz zu der Überlappungslänge b gering.

Überlappingsverbindungen



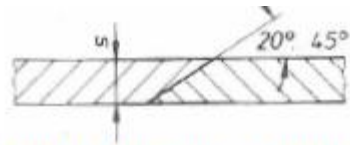
Laschung



Stumpfstoß



Einfacher Stumpfstoß → Kleine Klebfläche, nur für wenig beanspruchte Teile



Stumpfstoß mit Schäftung → Vergrößerung der Klebfläche, empfehlenswert bei Fügeteildicke $s \geq 5 \text{ mm}$

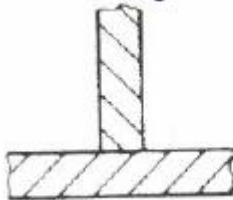


Stoßverbindung mit Nut und Feder → für rotations-symmetrische Bauteile, gute Zentrierwirkung

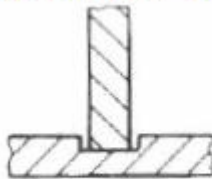


V-förmiger Stumpfstoß

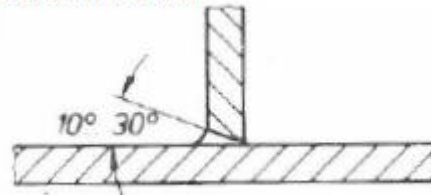
T-Stoßverbindung



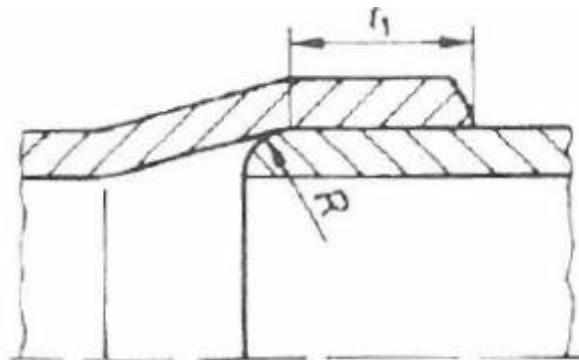
Einfacher T-Stoß → Nur bei mechanisch wenig beanspruchten Teilen



Modifizierter T-Stoß

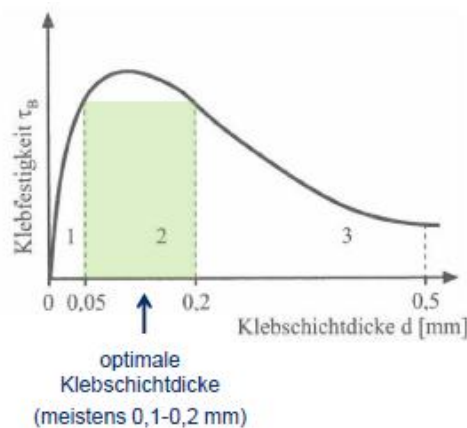


Rohrverbindung mit Muffe



Klebfestigkeit in Abhängigkeit von der Klebschichtdicke

Die Klebstoffmenge ist genau zu dosieren, da die Klebschichtdicke einen starken Einfluss auf die Klebfestigkeit hat



Vorbehandlung der Fügeteiloberflächen

Entfernen von haftungshemmenden Verunreinigungen (Schmutz, Öl)

- Waschaktive Substanzen (organische Lösungsmittel)
- Mechanische Oberflächenvorbehandlung (Bürsten, Schmirgeln, Strahlen)

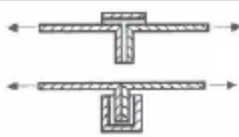
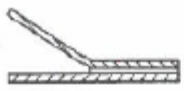
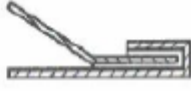
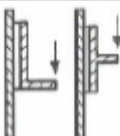
Aufrauen der Oberfläche zur Erhöhung der Haftungskräfte

- Schleifen, Strahlen

Ggf. chemische Veränderung der Oberfläche

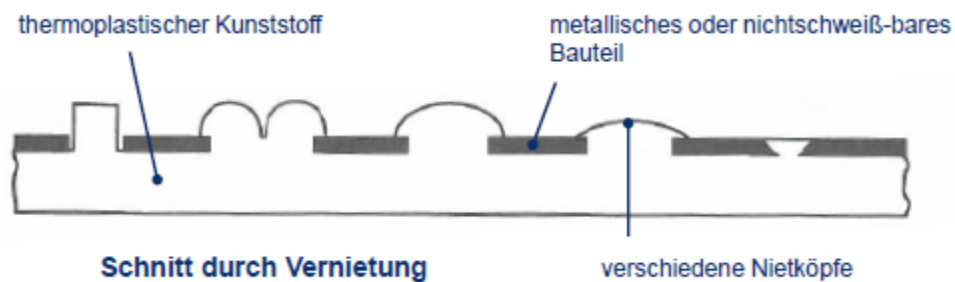
- Beflammen mit Stad- oder Propangas, Plasmabeflammung (Bildung polarer Gruppen, v.a. bei Polyolefinen angewandt)
- Corona-Verfahren (Oxidation der Oberfläche durch Ionen und Radikale)

gut	schlecht		gut	schlecht	
✓				✗	
	✗		✓		
✓				✗	
✓				✗	

gut	schlecht		gut	schlecht	
					
					
					

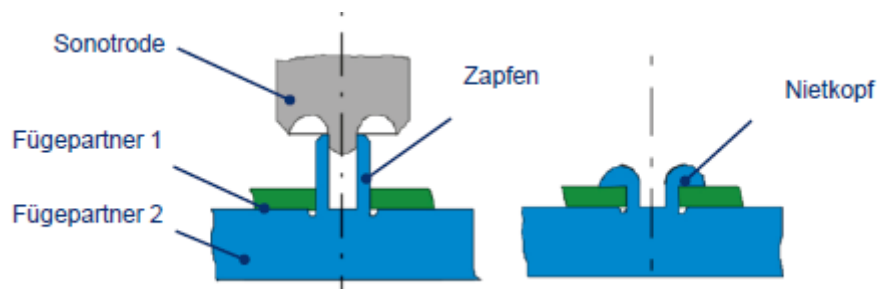
Nieten

- Formschlüssige Verbindung
- Umzuformender Werkstoff: Thermoplast
- Schnelle und hochwertige Verbindung mit metallischen oder nicht schweißbaren Bauteilen
- Keine weiteren Fügeelemente nötig



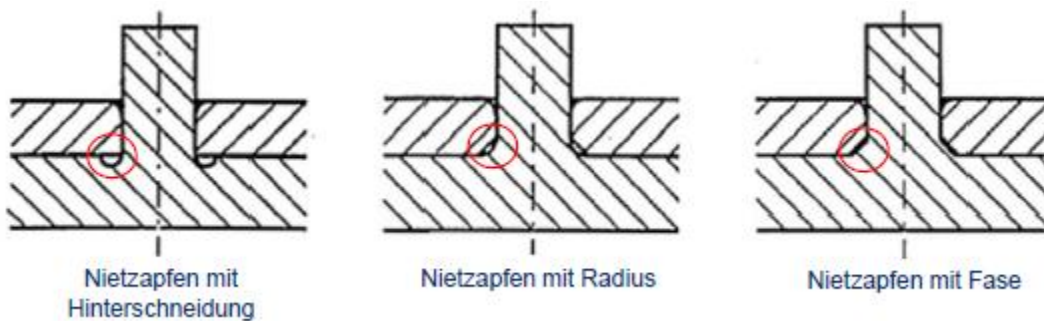
Ultraschallnieten

- Angespritzter Zapfen (Nietschaft) wird mit Ultraschallenergie erwärmt und zu einem Nietkopf umgeformt
- Keine gleichmäßige Plastifizierung → Orientierungen und Eigenspannungen können auftreten
- Thermische Überbelastung des Materials ist nahezu ausgeschlossen (enge Erwärmungsbereiche)
- Unterschied zum Ultraschallschweißen: Eine Schmelzverformung findet statt und nur ein Fügepartner wird plastifiziert



Gestaltungsrichtlinien

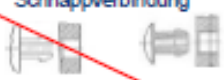
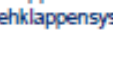
- Anbindung des Nietzapfens mit einer ringförmigen Hinterschneidung, mit einem Radius oder mit einer Fase versehen
- Geringes Durchmesserspiel von 0,1 bis 0,2 mm der gefügten Teile einhalten
- Evtl. zusätzliche Niederhalter vorsehen
- Scharfe Kanten/Kerben bei eingienieteten oder umbrödelten harten Werkstoffen vermeiden



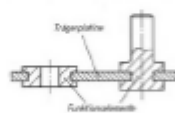
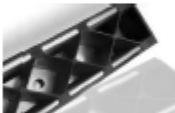
Auswahl des Fügeverfahrens

Morphologischer Kasten

→ Auswahl der zahlreichen Fügeverfahren beispielsweise über „Morphologischen Kasten“ möglich

	Lösungsalternative 1	Lösungsalternative 2	Lösungsalternative 3
Verbinden von beweglichen Funktionsträgern innerhalb des Bilanzsystems	Lager, Achsen und Wellen 	Gelenk (Kugel) 	Filmscharnier 
Führung	Lager, Achsen und Wellen 	Kurvenführung 	Gelenk (Kugel) 
Verbinden externer Bilanzsysteme	Schraubverbindung 	Schnappverbindung 	Pressverbindung 
Öffnen / Schließen, Durchflussquerschnitt der Pipe	Kugelventil (Bohrung durch Kugel) 	zwei ineinander laufende geschlitzte Hülsen 	Herzklappenverschluss (Drehklappensystem) 

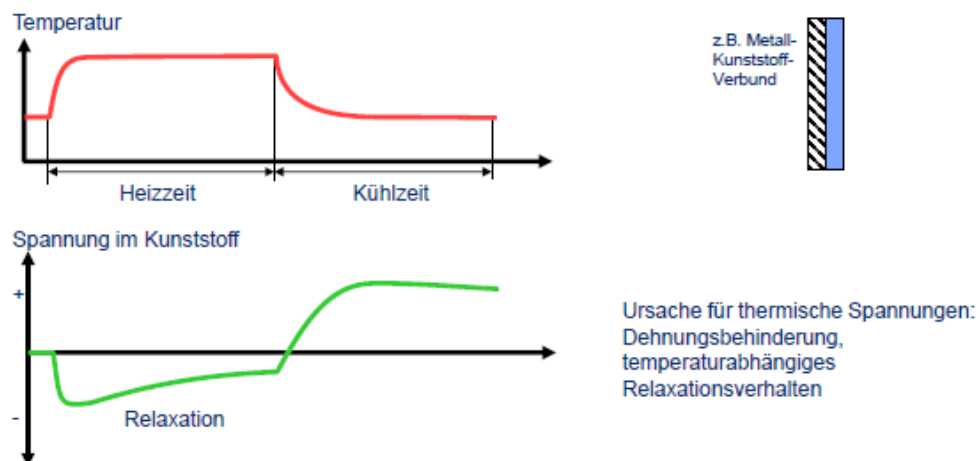
12) Kunststoff-Metall-Verbunde

	Insert-Technik	Outsert-Technik	Multifunktionale Hybrid-Konstruktionen
Prinzip	Metallteil (Funktionselement) wird in ein Kunststoffteil eingebettet	Kunststoffteil (Funktionselement) wird in ein Metallteil (z. B. Blechplatte) eingefügt	Metallteil und Kunststoffteil werden miteinander verbunden, Metall- und Kunststoffteil dienen als Funktionselement
			
Funktions- element	Metall: ▪ Gewindeeinsätze ▪ Hülsen ▪ Achsen, Wellen	Kunststoff: ▪ Distanzbolzen ▪ Gleitlager ▪ Schiebeführung ▪ Schnapphaken	Metall: ▪ meist dünnwandiges Blech Kunststoff: ▪ meist Versteifungsrippen

Berücksichtigung des unterschiedlichen Werkstoffverhaltens

- Unterschiede im Wärmeausdehnungskoeffizienten
 - Unverstärkte Polymere: ~10 mal größer als bei Stahlblech
 - 30% faserverstärkte Polymere: ~3mal größer als bei Strahlblech
- Unterschiede im Elastizitätsmodul:
 - Unerwünschte Wärmespannungen bei Temperaturbelastung besonders bei unsymmetrisch aufgebauten Strukturen
- Ausgeprägte Temperatur- und Zeitabhängigkeit der Eigenschaften der Kunststoffkomponente
 - Erschwerte Berechnung des Einsatzverhalten

Entstehung thermischer Eigenspannungen

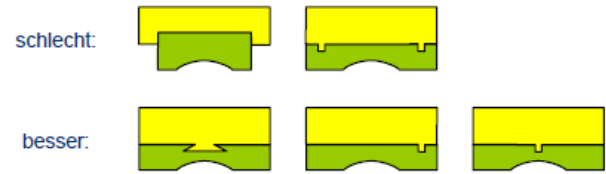


- Risse aufgrund von thermischen Eigenspannungen

Spannungsrisssbildung

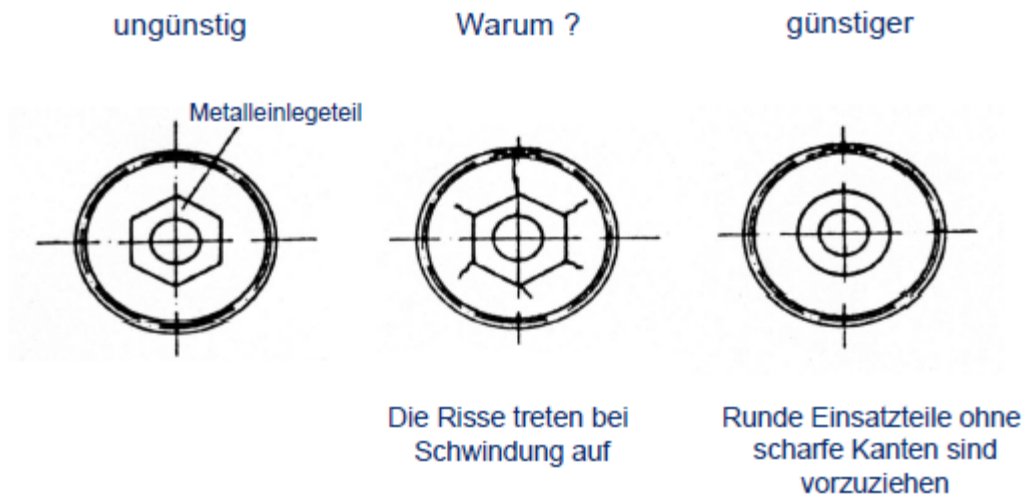
Metall-Kunststoff-Verbindung durch Formschluss

- Bei Metall-Kunststoff-Verbindungen ergeben sich unter Temperaturwechsel immer thermische Spannungen!
- Geeignete Gestaltung oder Werkstoffwahl kann diese reduzieren
- Beispiel: Kugellager, mit Thermoplast umspritzt



Kerbspannungsrissempfindlichkeit

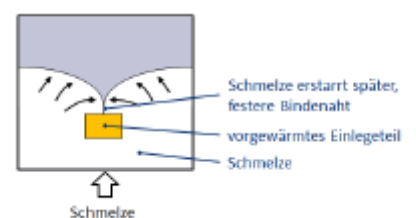
Vermeidung scharfer Ecken und Kanten



Insert-Technik

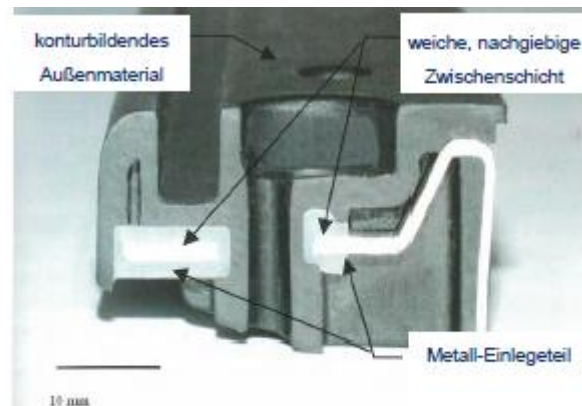
Verarbeitungstechnische Hinweise

- Schlagzähmodifizierte Kunststoffe sind empfehlenswert
 - o Höhere Dehnungsfähigkeit und Rissbeständigkeit
- Einlege­teile vor dem Spritzgießen vorheizen
 - o Einlege­teil wird vorgedehnt
 - o Verbesserte Festigkeit der Fließ-/Bindenähte
 - o Testreihen unter Betriebsbedingungen schon in der Prototypphase der Produktentwicklung durchführen



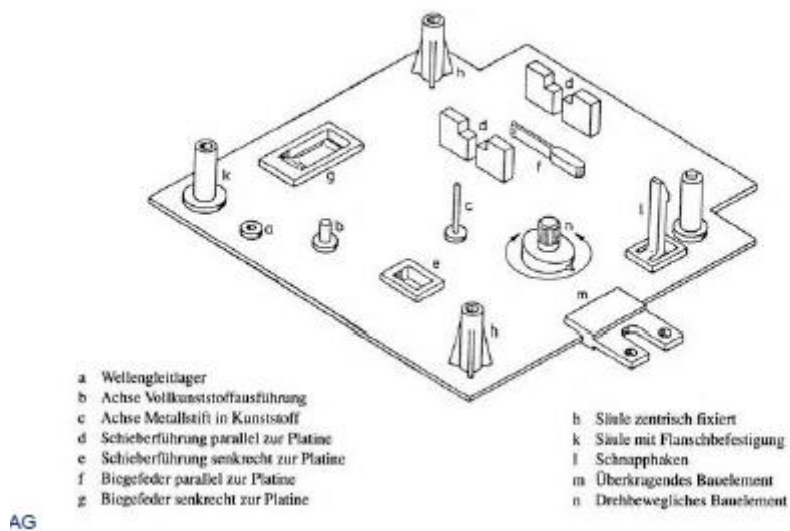
Gestaltungsrichtlinien

Möglichkeit zur Verringerung des Aufschwindens des Kunststoffs auf einem Metall-Einlegeteil:



→ Nachgiebige, eigenspannungsreduzierende Zwischenschicht

Outsert-Technik → Funktionselemente



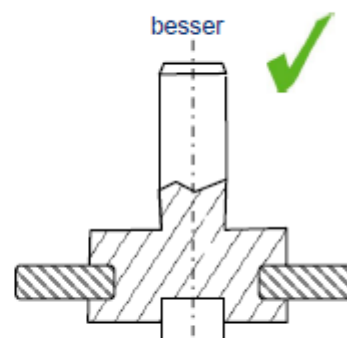
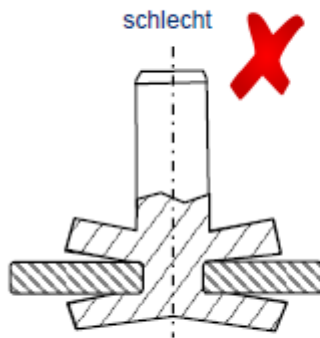
Verarbeitungstechnische Hinweise

- Platinen-Werkstoff: meist kostengünstiges Stahlblech
- Funktionsteile-Werkstoff: meist höherwertige Thermoplaste (POM, PA)
- Platinen entgraten, um Kerbwirkung auf Kunststoffteile zu vermeiden
- Hohe Werkzeugtemperatur und vorgewärmte Platinen → vollständigere Kristallisation
→ verbesserte Festigkeit und Widerstand gegen Abscheren einzelner Funktionselemente

Gestaltungsrichtlinien

Achsen und Distanzhalter

Maßnahmen zur Verbesserung der Standsicherheit:



- Vergrößerung des Flanschaußendurchmessers
→ leichtes Abheben von der Platine

- Vergrößerung des Platinenlochdurchmessers
- Aussparung vermeidet Lunker

Quelle: Hoechst AG

	Insert-Technik	Outsert-Technik
Vorteile	▪ Montage an den Grundkörpern entfällt ▪ keine Verbindungsteile ▪ Vorverlagerung von Montagevorgängen in die Fertigung	▪ Einzelmontage und spanende Bearbeitung entfallen ▪ keine Verbindungsteile ▪ Vorverlagerung von Montagevorgängen in die Fertigung ▪ hohe Maßgenauigkeit
Nachteile	▪ Demontage nicht möglich ▪ Metallteil muss in Spritzgusswerkzeug eingelegt werden (Zeit und Kosten!)	▪ Demontage schwierig ▪ Platine muss in Spritzgusswerkzeug eingelegt werden (Zeit und Kosten!)

Quelle: Ehrenstein

Multifunktionale Hybrid-Konstruktionen

Versteifung/geometrische Stabilisierung u-förmiger Blechprofile durch eingespritzte Kunststoffbereiche

Vorteile

- Hohe Bruchdehnung (über 50%)
- Hohe Festigkeit und Steifigkeit
- Integration neuer Funktionalitäten
- Gewichtseinsparung
- Korrosionsbeständigkeit
- Elektrische Leitfähigkeit (Stanzteile)
- Elektrische Isolierfähigkeit (Kunststoff)
- Verbesserte Geräuschkämpfung
- Stilistische und aerodynamische Gestaltungsfreiheiten
- Wirtschaftlichkeit durch integrierte Fertigungsverfahren

→ kostengünstiges, einfaches Metallteil (i.d.R. Blech) mit hoher Steifigkeit und Festigkeit

→ kostengünstige Formgebungsvielfalt z.B. durch Spritzgießen der Kunststoffkomponente

