

Konstruieren mit Kunststoffen 2

Autor: Murat Kilic
Version: 1.0

Zusammenfassung

Dozent: D.S, M.H
Themengebiet: Kunststofftechnik 3

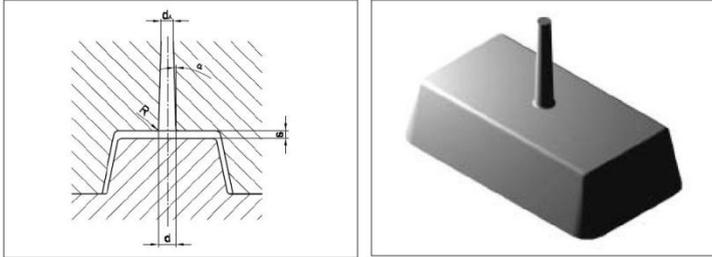
Erstellt am: 6. Januar 2013
Letzte Änderung am: 08.01.2013

Inhaltsverzeichnis

1	Fertigungsgerechte Gestaltung 1	3
2	Fertigungsgerechte Gestaltung 2	6
3	Werkstoffmechanik der Kunststoffe 1	8
4	Werkstoffmechanik der Kunststoffe 2	12
5	Werkstoffmechanik der Kunststoffe 3	15
6	Verbindungstechnik Grundlagen	17
7	Verbindungstechnik Schnapphaken	19
8	Verbindungstechnik Filmgelenke	22
9	Verbindungstechnik Pressverbindungen	24
10	Kalkulation von Spritzgiessteilen	27
11	Schadenanalyse an Kunststoffbauteilen	28

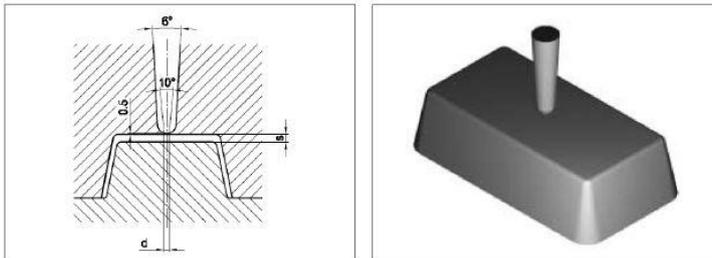
Stangenanguss

Der Stangenanguss ist geeignet für temperaturempfindliche, hochviskose Formmassen und Präzisionsteile mit grosser Wandstärke



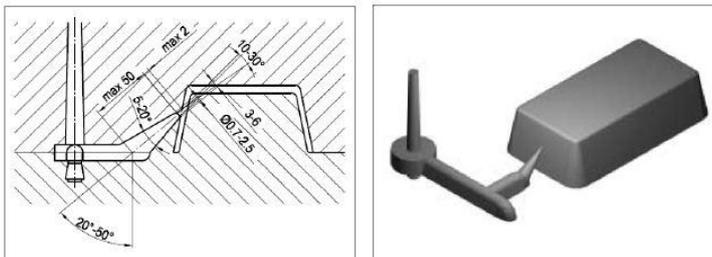
Punktanguss

Der Punktanguss ist für dünnwandige Spritzgussteile geeignet, bei denen keine Nachbearbeitung erwünscht ist.



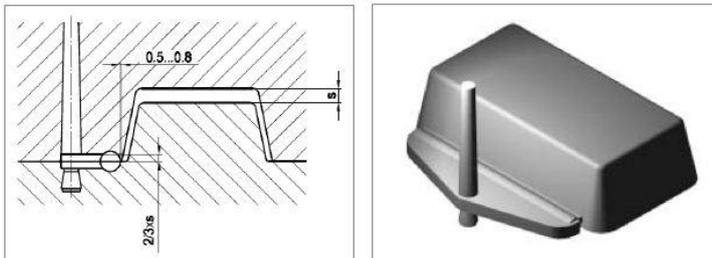
Tunnelanguss

Der Tunnelanguss ist der werkzeugtechnisch billigste Angusstyp. Bei dieser Variante trennt sich der Anguss nach dem Prozess durch den Entformungsvorgang von selbst. Er wird häufig bei Mehrfachformen eingesetzt, wenn das Formteil seitlich angespritzt werden kann.



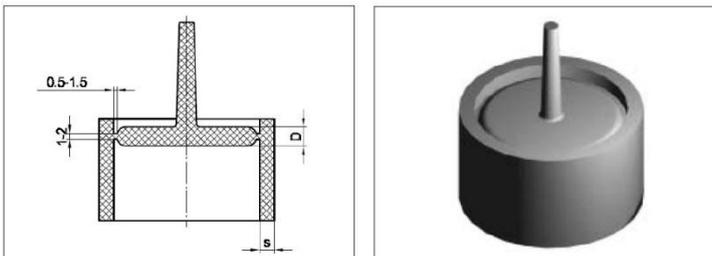
Filmanguss

Der Filmanguss wird für flächige Teile, wie Platten oder Leisten verwendet, wenn Bindenähte die bei Mehrfachanschnitten auftreten nicht zulässig sind.

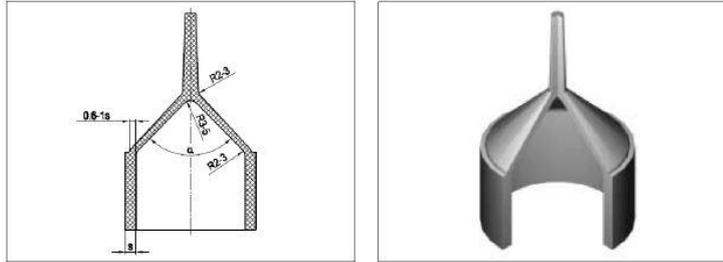


Ringanguss

Der Ringanguss eignet sich für ring- oder hülsenförmige Teile mit **beidseitiger** Kernlagerung



Schirmanguss Der Schirmanguss eignet sich für rotationssymmetrische Teile mit **einseitiger** Kernlagerung

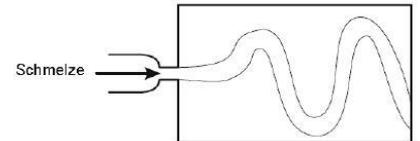


Angusspositionierung

- Vorzugsweise direkter Stangenanguss ins Zentrum des Teils vorzuziehen
- Den Anschnitt an die dickste Stelle legen, an hochbelasteten Stellen vermeiden
- Anschnittdicke mindestens 50% der Teilwanddicke
- Fließrichtung sowie Orientierung beeinflussen die mechanischen Eigenschaften sowie die Optik des Bauteils
- Bindenähte verursachen mechanische Schwachstellen und beeinträchtigen den optischen Eindruck

Ursachen:

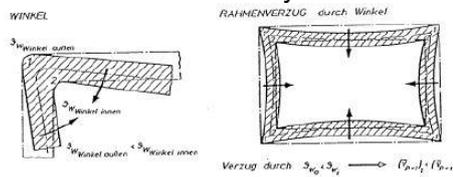
- o Mangelnde Interdiffusion der Makromoleküle der Schmelzfront über die neugeschaffene Grenzfläche hinweg
- o Hohe Orientierung der Makromoleküle parallel zur Bindenaht
- o Ausbildung einer an der Oberfläche um das Bauteil umlaufenden V-Kerbe
- Lufteinschlüsse verursachen Unterfüllung oder Brenner
- Angussstellen definieren Druckverteilung und Orientierungen
- Freistrahlbildung ist zu vermeiden
 - o Freistrahlführt zu undefiniertem Füllverhalten
 - o Lufteinschlüsse können folge sein



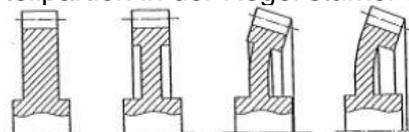
Schwindung Schwindung ist die Verkleinerung der Abmessungen eines Formteils bei der Abkühlung von Verarbeitungs- auf Raumtemperatur

Verzug Entsteht durch unterschiedliche Schwindung an verschiedenen Partien des Formteils

- Verzug durch **unterschiedliche Abkühlgeschwindigkeiten**
 - o Generell schwinden die langsamer abkühlenden Bereiche stärker als die schneller abkühlenden. Eine wichtige Ursache für den Verzug von Formteilen ist daher die asymmetrische Abkühlung



- Verzug durch **unterschiedliche Wanddicken und Masseanhäufungen**
 - o Wegen der langsameren Abkühlung schwinden die dickwandigeren Formteilpartien in der Regel stärker als die dünnwandigen Partien.



- **Art und Lage des Anschnitts**
 - o Art und Lage des Anschnittes sind für das verzugsarme Gestalten von Formteilen insofern von Bedeutung, da die Molekülorientierung die Schwindung direkt beeinflussen

2 Fertigungsgerechte Gestaltung 2

Regel 1

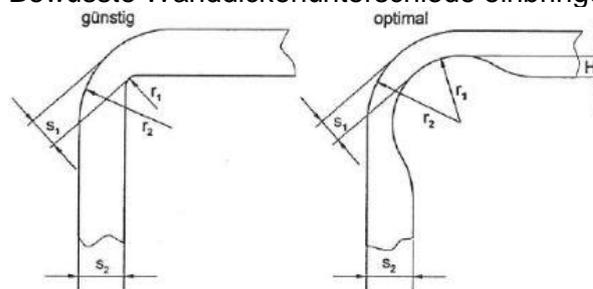
Wanddicke so dünn wie möglich auslegen

- Geringe Wanddicken minimieren den Materialeinsatz, verhindern Lunker -und Einfallstellenbildung und reduzieren die Zykluszeit (Kühlzeit 50 – 70% der Gesamtzykluszeit, nimmt quadratisch mit Wanddicke zu)
- Minimale Wanddicke wird durch das Fließverhalten der Schmelze im Werkzeug begrenzt

Regel 2

Gleiche Wanddicke vorsehen

- Wanddickenunterschiede führen zu ungleichmässiger Abkühlung und damit zu Verzug aufgrund unterschiedlicher Schwindung
- Notwendige Wanddickenübergänge sanft gestalten
- Bewusste Wanddickenunterschiede einbringen um Verzug zu minimieren



Regel 3

Masseanhäufungen vermeiden

- Führen wie grosse oder ungleichmässige Wanddicken zu Lunker und Einfallstellen

Regel 4

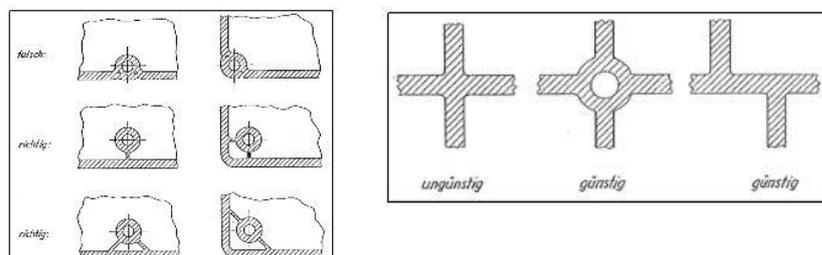
Ecken und Kanten mit Radien versehen

- Aufgrund Kerbspannungsrissempfindlichkeit häufig Ursache für Versagen der Bauteile
- Faustregel für Radien $r_{min} = 0.2 \text{ bis } 0.5 \text{ mm}$

Regel 5

Rippen Spritzgiessgerecht gestalten

- Lange und dünne Rippen vermeiden
- Hohe Rippen sind aufgrund der Herstellungskosten, schlechter Entlüftung und Entformung zu vermeiden
- Masseanhäufungen an Rippenkreuzungen sind zu vermeiden



Regel 6

Ebene Flächen Vermeiden

- Ebene Flächen sind nur schwierig plan herzustellen. Geringe Eigenspannungen, z.B. aufgrund unterschiedlicher Abkühlung im Werkzeug, kann zur Verformung führen.
- Flächen sollten deshalb gewölbt gestaltet werden, da dadurch das Flächenträgheitsmoment und die Steifigkeit der Fläche erhöht wird. Alternativ können auch abgestufte Zonen eingebracht werden

- Regel 7** ***Ausreichende Konizitäten vorsehen***
- Konizitäten (=Entformungsschrägen) werden benötigt um Entformungskräfte niedrig zu halten.
 - Sie helfen bei der Vermeidung von Entformungsspuren an der Bauteiloberfläche
 - Faustregel
 - Amorphe Thermoplaste 1.5° – 3°
 - Teilkristalline Thermoplaste: 0.5° – 3°
- Regel 8** ***Hinterschneidungen Vermeiden***
- Formelemente, die eine Entformung behindern, weil sie quer zur Werkzeugöffnungsrichtung liegen, werden als Hinterschneidung bezeichnet
- Regel 9** ***Keine genauere Bearbeitung als nötig vorsehen***
- Polierte Oberflächen sind empfindlich und gegenüber erodierten oder geschliffenen teuer in der Herstellung
 - Toleranzen nur so eng wie nötig (DIN 16901)
- Regel 10** ***Überprüfung der Konstruktion nach günstigere Gestaltung***
- Funktionsintegration
 - Schnappverbindungen, Filmscharniere
 - Metallkomponenten durch einlegen in WZ direkt integrieren
 - Sonderverfahren etc...

3 Werkstoffmechanik der Kunststoffe 1

Mechanisches Verhalten

Beanspruchung von Bauteilen

- Mechanisch
- Thermisch
- Elektrisch
- Chemisch

Abhängigkeit des mechanisches Verhaltens von

- Temperatur
- Belastungszeit
- Belastungsgeschwindigkeit
- z.T. Feuchtigkeit

Kennwertermittlung

Das mechanische Verhalten von Kunststoffen hängt sehr stark vom zeitlichen Verlauf der Belastung ab. Dementsprechend werden folgende Werkstoffprüfungen durchgeführt:

- **Kurzzeitversuche** mit stetig zunehmender Belastung
- **Zeitstandversuche** mit konstanter Belastung (statisch)
- **Dauerschwingversuche** mit periodischer Belastung
- **Schlagversuche** mit Schlagartig aufgebrachtter Belastung

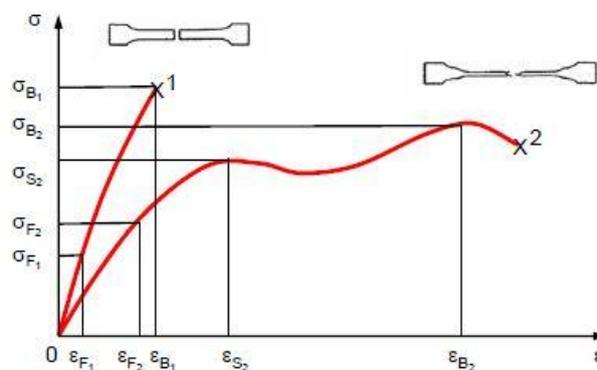
Die daraus gewonnen Kennwerte lassen sich in folgende Gruppen gliedern:

- Spannungs-Grenzwerte
- Dehnungs-Grenzwerte
- Verformungs-Grenzwerte

Statisches Verhalten

Kunststoffe zeigen bei statischen Belastungen grundsätzlich zähes und sprödes Materialverhalten auf. Bei statischer Belastung sind 3 unterschiedliche Versagenskriterien zu untersuchen

- Rissbildung
- Verstreckung
- Bruch



Belastung statisch / quasistatisch – Versagensverhalten:

- 1: Sprödes Verhalten mit Trennbruch
- 2: Zähes Verhalten mit Verformungsbruch
- F: Rissbildung
- S: Verstreckung
- B: Bruch

Bruch

Eine der kritischsten Versagensursachen. Die zum Bruch führenden Werte von Spannung und Dehnung hängen abgesehen von der Temperatur beim Kurzzeitversuch von der Belastungsgeschwindigkeit ab, beim Zeitstandversuch von der Belastungsdauer. Die Bruchfestigkeits-Kennwerte eignen sich bei der Festigkeitsberechnung in aller Regel nur für Kunststoffe mit sprödem Verhalten.

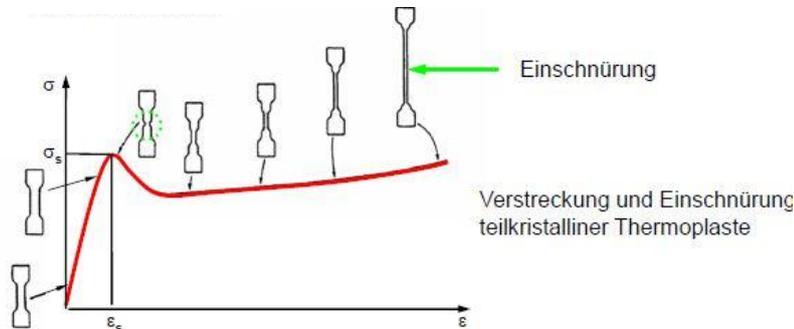
Wichtigsten Kennwerte:

- Zugfestigkeit
- Bruchdehnung
- Zeitstandfestigkeit

Verstreckung

Bei zähen Kunststoffen geht dem Bruch eine mehr oder weniger grosse Verstreckung voraus

- Makromoleküle gleiten dabei aneinander ab
- Äusserlich als sogenannten Weissbruch erkennbar
- Spannungen bleiben im Verstreckungsbereich relativ gleich, so dass die Verformung unkontrolliert zunimmt



Wichtigste Kennwerte:

- Streckspannung
- Streckdehnung

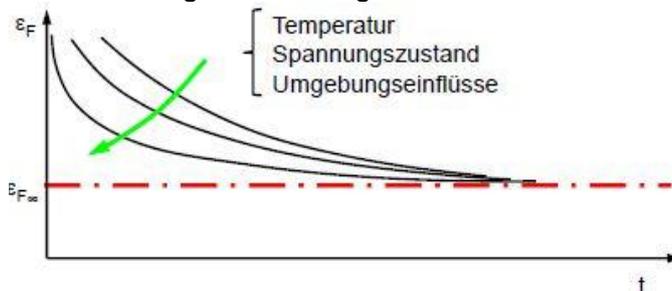
Rissbildung

Praktisch alle Kunststoffe, auch gefüllte und faserverstärkte, erfahren ab einer gewissen Verformung irreversible Schädigungen im Mikrobereich durch Bildung von Fließ- resp. Verstreckungszonen (Crazes) und Rissen sowie Aufreissen von Partikelgrenzflächen.

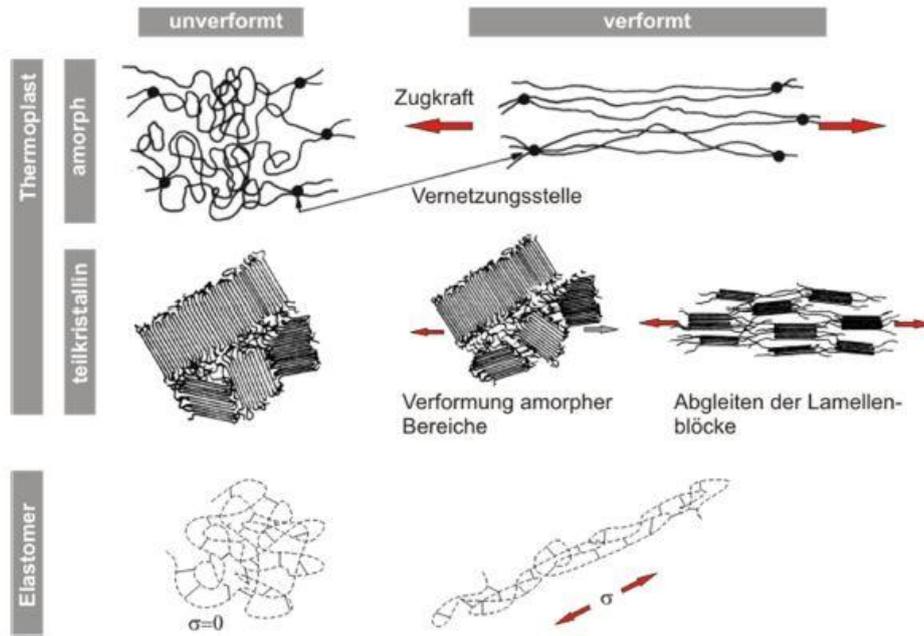
Diese führen in der Regel zu bleibenden Verformungen und bei transparenten Kunststoffen zur Trübung. Analoge Schädigungen im Mikrobereich existieren auch bei teilkristallinen Thermoplasten und bei faserverstärkten Kunststoffen, indem Grenzflächen zwischen Sphärolithen bzw. zwischen Matrix und Faser aufreissen.

Wichtigste Kennwerte:

- Fließdehnung
- Fließgrenzdehnung



Verformungsverhalten



Kriechen (Retardieren)

Kriechen ist definiert als Verformungsabnahme in Funktion der Zeit bei konstanter Last

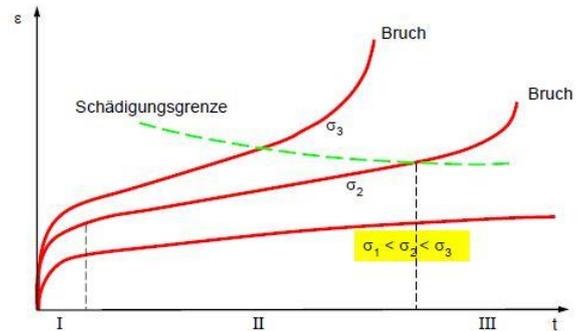
- Ermittlung im Zeitstand-Zugversuch
- Kriechgeschwindigkeit als Verformungsabnahme pro Zeiteinheit nimmt mit steigender Spannung zu
- Oberhalb der Schädigungsgrenze beschleunigt sie sich bis zum Bruch
- Erhöhte Temperatur führt ebenfalls zu höherer Kriechgeschwindigkeit

Als Mass dient das Verhältnis der aufgetragenen Spannung zur momentanen Dehnung

Kriechmodul

$$E_c = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t, \vartheta, \sigma)}$$

σ_0 : Spannung, konstant
 ε : Dehnung
 t : Belastungsdauer
 ϑ : Temperatur

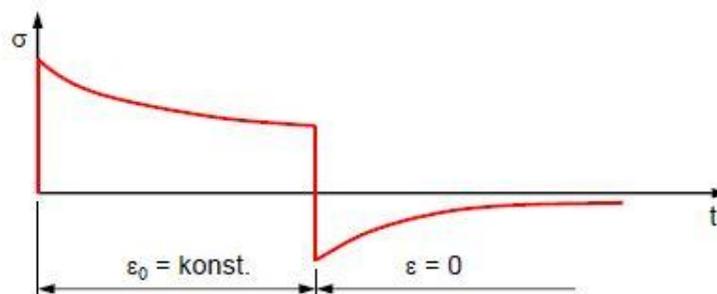


Entspannung (Relaxation)

Definiert als Spannungsabnahme in Funktion der Zeit bei konstanter Verformung. Das Verhältnis der momentan aufgetragenen Spannung zur aufgetragenen Dehnung wird als **Relaxationsmodul** bezeichnet.

$$E_R = \frac{\sigma(t, \vartheta, \varepsilon)}{\varepsilon_0}$$

σ : Spannung
 ε_0 : Dehnung, konstant
 t : Belastungsdauer
 ϑ : Temperatur



Rückverformung / Restitution

Restitution ist definiert als Verformungsabnahme in Funktion der Zeit nach der Entlastung. Ob nach der Entlastung mit einer vollständigen oder nur teilweisen Rückverformung gerechnet werden kann, hängt davon ab, ob der Werkstoff während der Belastungsphase eine Schädigung erfahren hat oder nicht. Falls die Schädigungsgrenze überschritten wird kommt es zu folgendem Materialverhalten

- Bleibende Restdehnung d.h. plastische (irreversible) Verformungen
- Bei erneuter Belastung wachsen die Schädigungen weiter

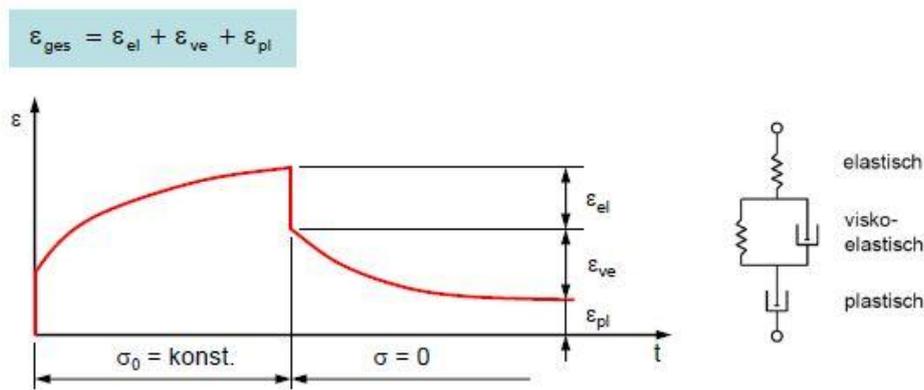
Verformungen bis zur Fließgrenze sind praktisch reversibel

Verformungsarten

Im Verformungsverhalten der Kunststoffe überlagern sich grundsätzliche drei verschiedenen Verformungsarten:

- **Energieelastische Verformung ϵ_{el}** : Reversible Verformung unter Änderung der inneren Energie in den Primärbindungen der Makromoleküle
- **Entropieelastische (viskoelastische) Verformung ϵ_{ve}** : Reversible Verformung unter Änderung des Ordnungszustandes der Makromoleküle
- **Plastische Verformung ϵ_{pl}** : Irreversible Verformung infolge Bildung von Verstreckungen und Mikrorissen (Crazes), Abgleiten und/oder Aufreißen von Molekülkettensegmenten sowie Aufreißen von Partikelgrenzen

Die drei Verformungsarten können zu der Gesamtdehnung aufsummiert werden.



Entspannen: Relaxationsversuch mit konstanter Verformung

Viskoelastizität

Als Viskoelastizität bezeichnet man die zeit-, temperatur- und frequenzabhängige Elastizität von polymeren Schmelzen oder Festkörpern. Die Viskoelastizität ist durch ein teilweise elastisches, teilweise viskoses Verhalten geprägt.

Lineare Elastizität: Hooksches Gesetz

$\sigma = E \cdot \epsilon$

Lineare Viskosität: Newtonsches Gesetz

$\sigma = \eta_E \cdot \dot{\epsilon} = 3 \cdot \eta \cdot \dot{\epsilon}$

- σ : Spannung, einachsig
- ϵ : Dehnung
- $\dot{\epsilon}$: Dehngeschwindigkeit
- E : Elastizitätsmodul
- η_E : Viskosität im Zugversuch
- η : Viskosität im Scherversuch

Isochrone Spannungs-Dehnungs-Diagramme haben sich für die Konstruktionspraxis als sehr nützlich erwiesen: Sie zeigen anschaulich den Zeiteinfluss auf die Werkstoffsteifigkeit und lassen problemlos erkennen, ob der Zusammenhang zwischen Belastung und Verformung resp. Spannung und Dehnung linear ist oder nicht.

4 Werkstoffmechanik der Kunststoffe 2

Nichtlinearität

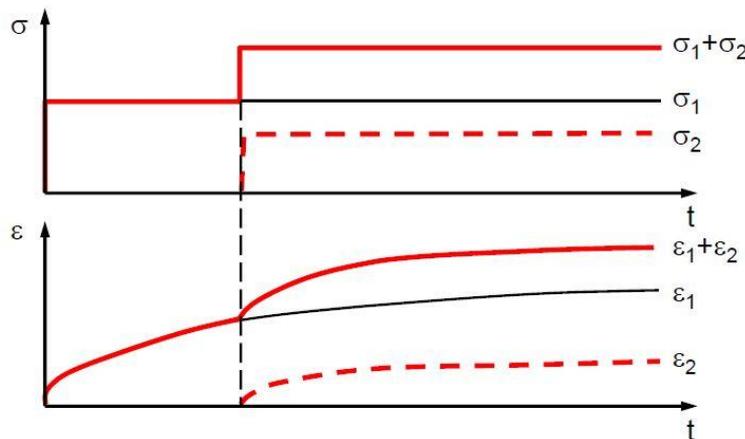
Bei geringen Verformungen sind die Dehnungen auch bei Kunststoffen proportional zu den Spannungen. Der Hooksche Bereich umfasst dabei praktisch reversible Verformungen. Bei Belastungen oberhalb dieses linearen Verformungsbereiches treten zunehmend Mikroschädigungen auf, wodurch irreversible Verformungen daraus folgen.

Korrespondenzprinzip

Das Korrespondenzprinzip ermöglicht die Anwendung der bekannten Lösungen der Elastizitätstheorie auf entsprechende Problemstellungen mit linearviskoelastischen Körpern, d.h. auch für Kunststoffe in ihrem linearen resp. linearisierbaren Verformungsbereich.

Superpositionsprinzip

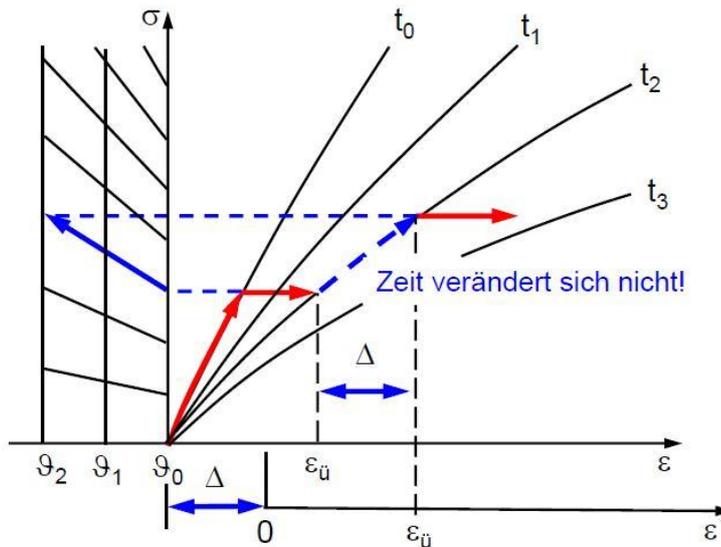
Wenn ein Bauteil unterschiedlichen Spannungen ($\sigma_1(t)$ und $\sigma_2(t)$) ausgesetzt wird, so führt die Summe der Spannungen $\sigma(t) = \sigma_1(t) + \sigma_2(t)$ zur Gesamtdehnung im Bauteil und umgekehrt.



Überlagerung zeitlich verschobener, konstanter Spannungen bzw. Dehnungen mit dem Zeit-Verformungs-Superpositionsprinzip (schematisch)

Verschiebungsprinzip

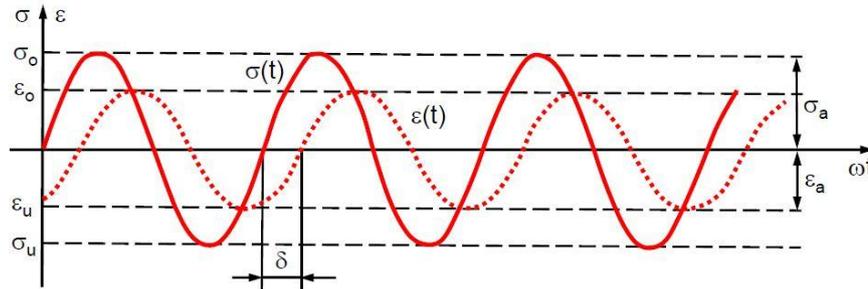
Das Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip gestattet es, aus Messungen in einem beschränkten Zeitbereich bei verschiedenen Temperaturen auf das Verhalten in einem sehr grossen Zeitbereich bei konstanter Temperatur zu schliessen (Zeitraffereffekt).



Zeit-Temperatur-Verschiebung bei Temperaturerhöhung, dargestellt im isochronen Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Schwingende Beanspruchung

Beanspruchung durch schwingende Spannung: Dehnschwingung erfolgt aufgrund Viskoelastizität mit einer merklichen zeitlichen Verzögerung. Diese Verzögerung drückt sich durch eine Phasenverschiebung aus.



Die Phasenverschiebung ist ein Mass für die allgemein hohe mechanische Dämpfung der Kunststoffe. Ein Teil der eingebrachten Leistung kann nicht zurückgewonnen werden => **Dissipation** vom Werkstoff d.h. Umsetzung in Wärme. Die Phasenverschiebung ist keine Konstante, sondern abhängig von der Belastungsfrequenz und der Temperatur

Thermisches Versagen

Die hohe mechanische Dämpfung der Kunststoffe bewirkt eine Wärmeproduktion (Eigenerwärmung). Erwärmung erhöht einerseits die Verformungen und kann unter ungünstigen Verhältnissen zu einem thermischen Versagen durch Überschreiten der Grenztemperatur oder gar durch Zersetzung führen.

Zu beachten ist, dass im Inneren des Bauteils die Temperatur einiges höher ist als an der Oberfläche, und zwar zunehmend mit grösserer Wanddicke.

Wärmespannungen

Wärmespannungen entstehen durch Verhinderung bzw. Behinderung von Wärmedehnungen. Sie sind abhängig von:

- Temperaturdifferenz
- Werkstoffsteifigkeit
- Thermisches Werkstoffverhalten

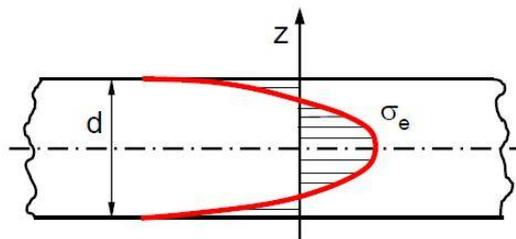
Feuchtespannungen

Gewisse Kunststoffe neigen aufgrund ihres Aufbaus dazu, Fremdmoleküle wie z.B. Wasser aufzunehmen. (bsp. Polyamid 6). Dabei diffundieren Fremdmoleküle in den Makromolekülverband des Polymers und beeinflussen dabei die Sekundärbindungen und Verdrängen das Volumen.

Kritisch ist vor allem die Feuchteabnahme, weil die Relaxationsprozesse mit sinkender Feuchte verlangsamt werden und dabei Zugspannungen auftreten, welche im Extremfall zur Rissbildung im Werkstoff führen.

Abkühlspannungen

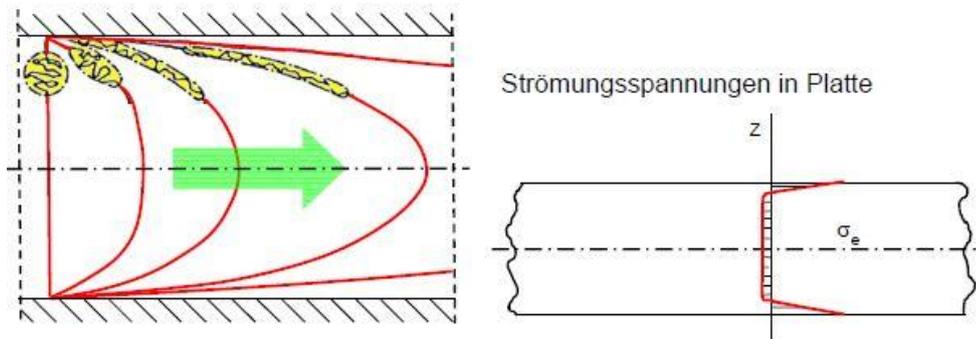
Die Schwindung beim Erstarren der Schmelze ist umgekehrt proportional zur Abkühlgeschwindigkeit. Konkret: **Je grösser die Abkühlgeschwindigkeit, desto kleiner die Schwindung**. Dickwandige Bereiche eines Formteils erfahren infolgedessen wegen geringeren Abkühlgeschwindigkeiten eine grössere Schwindung, was zu Zugspannungen führt. Die rasche Abkühlung an den Randzonen führt zu geringer Schwindung und dadurch zu Druckspannungen



Abkühlspannungen an symmetrisch abgekühlter Platte

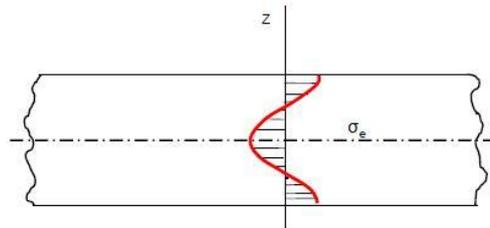
**Strömungs-
spannungen**

Die viskose Schmelze bildet beim Werkzeugfüllvorgang eine Scherströmung, wobei die äusserste Randschicht (ca. 0.2mm) durch Deformationen der Kneuelstruktur in hohem Mass verstreckt wird. Die deformierten Makromoleküle werden infolge rascher Abkühlung in den Randschichten eingefroren und verursachen Zugspannungen.



**Nachdruck-
und Expansi-
onsspannungen**

Bei zu hohem Nachdruck dehnt sich das Volumen nach dem Entformen des Bauteils bis zum Erreichen eines Inneren Gleichgewichtszustandes aus. Dies kann in den zuerst erstarrten Randschichten zu Zugspannungen führen, welche in Extremfällen zu Oberflächenrisse führen können.

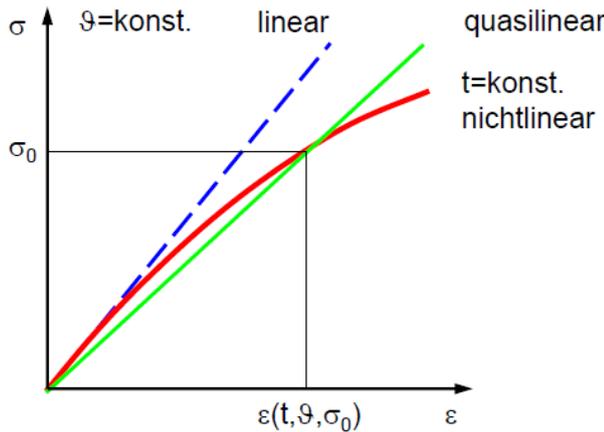


**Weitere Span-
nungen**

- *Einbettungsspannungen*: treten bei eingebetteten Fremtteilen (z.B. Metall-Inserts) infolge von Formbedingten Schwindungsbehinderungen auf.
- *Strukturspannungen*: Durch chemische Härtingsreaktionen bei Duroplasten oder durch Kristallisation und Orientierung bei Thermoplasten können strukturbedingte innere Spannungen entstehen, die sich je nach dem in Makro- oder Mikrobereichen auswirken.

5 Werkstoffmechanik der Kunststoffe 3

Checkliste	<p>Im Zusammenhang der Festigkeitslehre sind folgende Fragen zu klären:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Beanspruchung: Zug/Druck, Schub, Biegung, Torsion • Belastungsart: ruhend, schwingend, schlagartig, intermittierend • Spannungszustand: einachsig, mehrachsig, hydrostatisch • Betriebsbedingungen: Zeit, Temperatur, Medien • Versagenskriterien: Bruch, Verstreckung, Rissbildung, Verformung • Stabilität: Knicken, Beulen • Gestalteinflüsse: Kraftfluss, Kerbwirkung, Bindenähte • Sicherheit: Lebensdauer, sicheres Bestehen, beschränktes Versagen, gezieltes Versagen • Werkstoffverhalten: Festigkeit, Verformbarkeit, Steifigkeit, Zähigkeit
Ziele	<p>Je nach Problemstellung kann eine Festigkeitsrechnung unterschiedliche Zielsetzungen haben:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dimensionierung zwecks Festlegung der Bauteilabmessungen aufgrund der mechanischen Beanspruchung von der einfachen Querschnittsbestimmung bis zur Gestaltoptimierung • Sicherheitsnachweis zwecks Gewährleistung der verlangten Sicherheitsfaktoren • Werkstoffwahl (bestimmen der Mindestwerte für Festigkeit und Steifigkeit) <p>Ziel einer Festigkeitsrechnung: Eine mit vertretbarem Aufwand erhältliche, brauchbare Aussage innert nützlicher Frist. Elementare Festigkeitsrechnungen reichen in vielen Fällen vollkommen aus.</p> <p>Es ist stets eine mehr oder weniger rigorose Vereinfachung der realen Zusammenhänge notwendig. Dies gilt auch und vielleicht in besonderem Masse für die Berechnung von Bauteilen aus Kunststoffen mit ihrem komplexen mechanischen Verhalten.</p>
Lineares Verformungsverhalten	<p>Kunststoffe:</p> <ul style="list-style-type: none"> • bis gegen ca. 1 % der Verformung nahezu lineares Verhalten • Meist isotropes Verhalten <p>Achtung: Werkstoffkennwerte und Spannungs- und Verformungsgrößen sind zeit- und temperaturabhängig einzusetzen. Anstelle des Elastizitätsmoduls tritt somit der Kriechmodul.</p>
Nichtlineares Verformungsverhalten	<p>Bei bekannter Spannung bzw. Dehnung lässt sich die zugehörige Dehnung bzw. Spannung auch im nichtlinearen Verformungsbereich direkt aus dem isochronen Spannungs-Dehnungs-Diagramm ablesen, und der Kriechmodul kann anhand seiner Definition berechnet werden.</p>



Kriechmodulbestimmung bei Nichtlinearität

$$E_c = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t, \vartheta, \sigma_0)} = E_c(t, \vartheta, \sigma_0)$$

Bei starker Abweichung von der Linearität können die Lösungen aus der Fachliteratur nur noch als Näherungen gelten.

Verformungsbedingungen

Bei Rissbildung gilt:

$$\varepsilon_{\max} = \max(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3) \leq \varepsilon_{\text{zul}} = \varepsilon_G \frac{C}{S}$$

- ε_G : Dehnungs-Grenzwert, z.B.
- $\varepsilon_F \approx 2\varepsilon_{F\infty}$: Kurzzeitbelastung, d.h. $t < 1$ h
- $\varepsilon_{F\infty}$: Langzeitbelastung, d.h. $t \geq 1$ h

Bei Bruch oder Verstreckung gilt:

$$\sigma_{\max} \text{ bzw. } \sigma_V \leq \sigma_{\text{zul}} = \sigma_G \cdot \frac{C}{S}$$

Die Vergleichsspannung ist eine fiktive einachsig wirkende Spannung, die dem effektiv vorliegenden mehrachsigen Spannungszustand in der Wirkung auf den Werkstoff rechnerisch gleichwertig ist.

- Sprödes Verhalten unter Zug → Trennbruch: Normalspannungshypothese (NSH):

$$\sigma_V = \sigma_{\text{Max}} = \text{Max}(|\sigma_1|, |\sigma_2|, |\sigma_3|)$$

- Sprödes Verhalten unter Druck: Gleitbruch, sowie zähes Verhalten unter Zug oder Druck → Verformungsbruch oder Verstreckung: Schubspannungshypothese (SSH; Tresca):

$$\sigma_V = 2\tau_{\text{Max}} = \text{Max}(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_2 - \sigma_3|, |\sigma_3 - \sigma_1|)$$

- Zähes Verhalten unter Zug oder Druck → Verformungsbruch oder Verstreckung: Gestaltänderungsenergiehypothese (GEH; von Mises):

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

- Schwingende Belastung:

$$\sigma_{\max} = \text{max}(|\sigma_o|, |\sigma_u|) \leq \sigma_{\text{zul}} = \sigma_G \frac{C}{S}$$

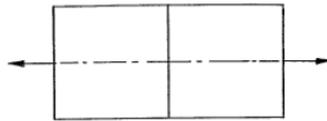
6 Verbindungstechnik Grundlagen

Grundlagen	<p>Durch Integralbauweise realisierbar: Gründe für den Einsatz der Füge- und Verbindungstechniken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Werkstoffeigenschaften • Grösse und Gestalt der Bauteile • Fertigungstechnik • Wirtschaftlichkeit <p>Hauptaufgaben der Verbindungen von Einzelteilen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Definition der Lage der Einzelteile (Geometrie) • Übertragung von Kräften und Momenten zw. den Einzelteilen (Statik, Kinetik) • Übertragung von Bewegungen zw. den Einzelteilen (Kinematik) <p>Arten der Verbindungstechnologien in der Kunststofftechnik:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fügen: z.B. Schweißen, Kleben, Schnappen, Pressen, Schrauben • Urformen: z.B. Spritzgiessen eines Filmgelenkes • Umformen: z.B. Prägen eines Filmgelenkes <p>Systematische Einteilung der Merkmale von Bauteilverbindungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Beweglichkeit • Lösbarkeit • Wirkprinzip • Werkstoffpaarung
Beweglichkeit	<p>Der Freiheitsgrad der Beweglichkeit wird durch die Verbindung mehr oder Weniger eingeschränkt. Feste Verbindungen: z.B. Schweißen und Kleben: Sie schränken alle 6 Freiheitsgrade (3 Translationen, 3 Rotationen) ein</p> <p>Bewegliche Verbindungen in Abhängigkeit der Freiheitsgrade:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Filmgelenke: 1 Freiheitsgrad offen (Rotation) • Schnappzylinder: 1 Freiheitsgrad offen (Rotation) • Schnappkugel: 3 Freiheitsgrade offen (Rotationen)
Lösbarkeit	<p>Das Merkmal Lösbarkeit ist ein entscheidendes Kriterium für die Funktion der Verbindung.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lösbare Verbindungen (häufige Füge- und Lösezyklen) → Schnapp- und Schraubverbindungen • Bedingt lösbare Verbindungen (wenige Füge- und Lösezyklen) → Pressverbindungen, Schraubverbindungen mit Direktverschraubung • Unlösbare Verbindungen → Filmgelenke, Schweissverbindungen

Wirkprinzip

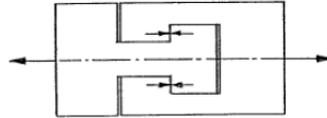
Wirkprinzip beschreibt den Zusammenhalt der Verbindungspartner:

Stoffschluss



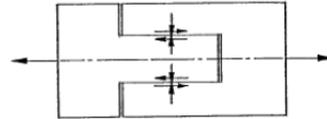
Stoffliche Einheit

Formschluss



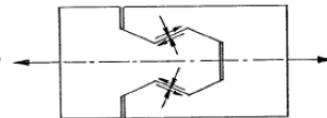
Druckkräfte in den Wirkflächen

Kraftschluss



Reibkräfte in den Wirkflächen

Kraft-Formschluss



Kombination Reib- und Druckkräfte



**Werkstoffpa-
rung**

Homogene Verbindungen: Fügepartner bestehen aus gleichen Werkstoffen

Heterogene Verbindungen: Fügepartner bestehen aus unterschiedlichen Werkstoffen

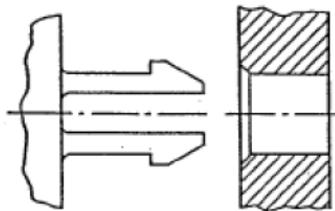
7 Verbindungstechnik Schnapphaken

Merkmale Schnappverbindungen sind ineinanderrasten von Hinterschnitten an elastisch federnden Elementen, mit den Eigenschaften:

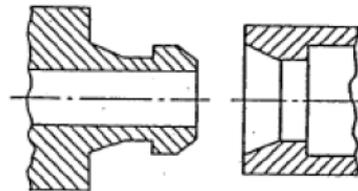
- feste oder teilweise bewegliche Verbindungen
- lösbare oder unlösbare Verbindungen
- form- oder kraftschlüssige Verbindungen
- mit homogener oder heterogener Werkstoffpaarung

Einteilung der Schnappverbindungen in 5 Grundformen:

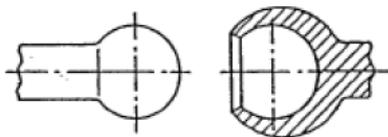
Schnapphaken



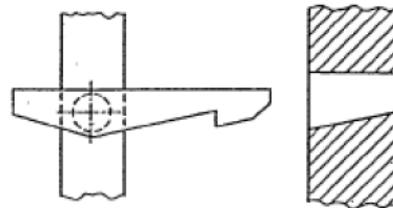
Schnappzylinder



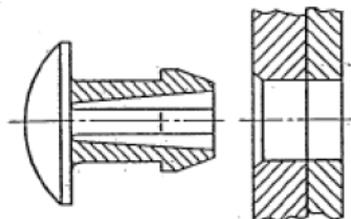
Schnappkugel



Torsionsschnappverbindung



Clips



Vorteile von Schnappverbindungen

- einfaches, schnelles Fügen
- einfaches und schnelles Lösen (bei lösbarer Verbindung)
- grosse Variantenvielfalt mit grossem konstruktivem Spielraum
- hohe Integrationsfähigkeit
- kostengünstige Herstellung der Schnappelemente

Kriterien an den Werkstoff

- Werkstoffe müssen über ausreichendes elastisches Verformungsvermögen besitzen.
- Vorzugsweise Thermoplaste mit hoher Steifigkeit und Dehnbarkeit
- Kunststoff darf bei der Auslenkung keine Schädigung in Form von Mikrorissen und Verstreckungen (Crazes) erleiden, sonst wird Rückstellvermögen beeinträchtigt.
- Einfluss von Füllstoffen beachten!!
- Einsatztemperaturbereich beachten!!

**Werkstoff-
kennwerte**

Elastizitätsmodul E:

Der Elastizitätsmodul dient zur Erfassung der Werkstoffsteifigkeit beim Fügen und beim Lösen der Schnappverbindung

Kriechmodul E_c:

Als Kriechmodul für das Fügen und das Lösen der Schnappverbindung kann jener für eine Belastungsdauer von 10⁻² h verwendet werden. Für eine Dauervorspannung der Schnappverbindung ist die Belastungsdauer gemäss Pflichtenheft massgebend.

Zulässige Dehnung ε_{zul}:

Die Begrenzung der Dehnung auf einen zulässigen Wert soll sicherstellen, dass:

- die Verformungen reversibel bleiben
- beliebig viele Wiederholmontagen möglich sind.

Grenzwerte für die schädigungsfreie Dehnbarkeit der Kunststoffe

- bei kurzzeitiger Beanspruchung: Fliessdehnung ε_F
- langzeitiger Beanspruchung: Fliessgrenzdehnung ε_{F∞}

Auf keinen Fall darf bei der Verformung die Streckdehnung ε_S erreicht oder gar überschritten werden.

Zulässige Dehnung ε_{zul}

Fügen und Lösen: Kurzzeitbelastung

$$\epsilon_{zul} \approx \epsilon_F \approx 2 \cdot \epsilon_{F\infty}$$

Dauervorspannung: Langzeitbelastung

$$\epsilon_{zul} \approx \epsilon_{F\infty}$$

Fliessgrenzdehnung ε_{F∞} verschiedener Kunststoffgruppen

Kunststoffgruppe	ε _{F∞} [%]
Thermoplaste, amorph	0,6 ÷ 1,0
Thermoplaste, amorph, gefüllt	0,3 ÷ 0,5
Thermoplaste, teilkristallin	2,0 ÷ 4,0
Thermoplaste, teilkristallin, gefüllt	1,0 ÷ 2,0
Duroplaste	0,1 ÷ 0,2

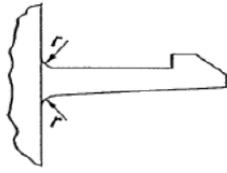
Querkontraktionszahl, Querszahl, Poissonzahl μ:

Poissonzahl verschiedener Kunststoffgruppen (Richtwerte für 0 °C ≤ θ ≤ 50 °C)

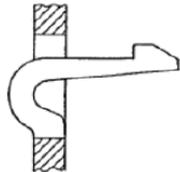
Poissonzahl μ	Werkstoffe
0,30 ÷ 0,35	Harte Kunststoffe: Duroplaste, amorphe Thermoplaste
0,35 ÷ 0,40	Zähe, steife Kunststoffe: Teilkristalline Thermoplaste (PA, POM)
0,40 ÷ 0,45	Zähe, weiche Kunststoffe: Teilkristalline Thermoplaste (PE, PP)
0,45 ÷ 0,50	Hochelastische, weiche Kunststoffe: Elastomer

Gestaltungsmöglichkeiten

Kerbwirkung



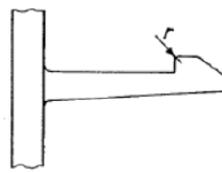
Vergrosserte Federlänge



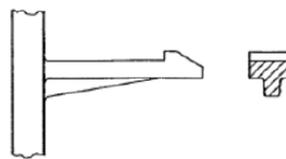
Gekrümmter Haken



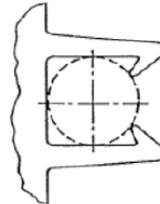
Kantenpressung



Erhöhte Federkraft

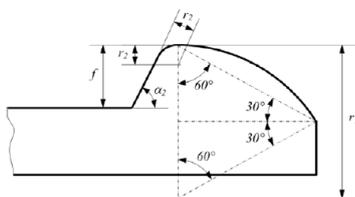


Sonderformen



Mit einer Fügegeometrie in gerundeter Form lässt sich das Verhältnis der Lösekraft zur Fügekraft deutlich verbessern. Gleichzeitig ergibt sich eine erhebliche Senkung der hohen Druckspannungen in der Kontaktzone am Hakenkopf.

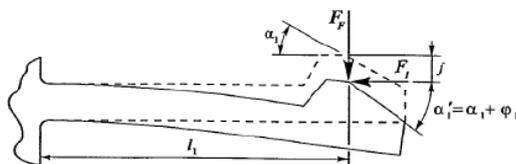
Optimierte Fügegeometrie:



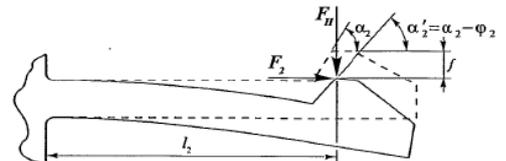
Auslegung

Schnapphaken können auf der Grundlage der Biegetheorie berechnet werden. Dabei geht es um die Begrenzung der Dehnung und um die Bestimmung der Fügekräfte und der Lösekräfte.

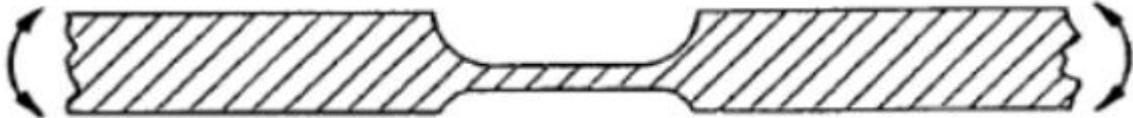
Maximale Fügekraft



Maximale Lösekraft



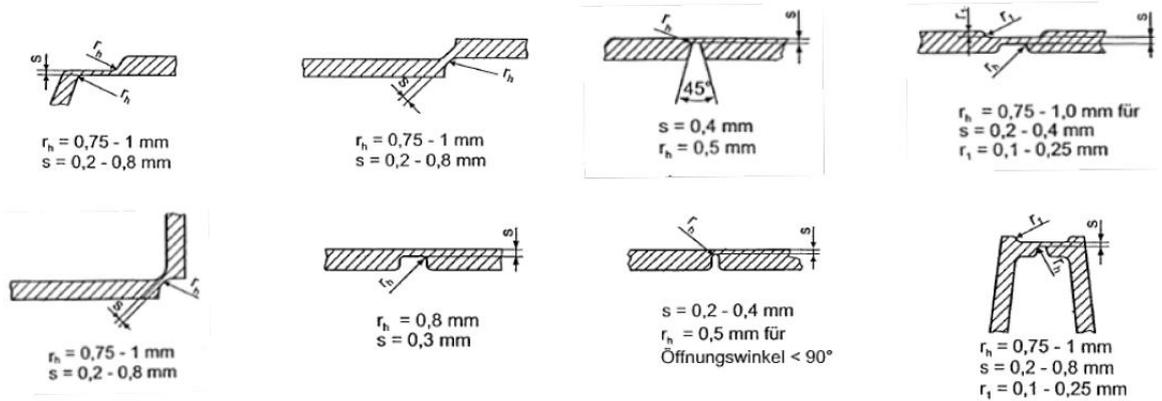
8 Verbindungstechnik Filmgelenke

Merkmale	<p>Filmgelenke (auch: Filmscharniere) sind:</p> <ul style="list-style-type: none"> • teilweise bewegliche Verbindungen • unlösbare Verbindungen • stoffschlüssige Verbindungen • mit naturgemäss homogener Werkstoffpaarung.
Wirkprinzip	<p>Gelenkrille mit stark verjüngtem Querschnitt gegenüber der Wanddicke der angrenzenden Formteilpartien:</p>  <p>Diese Verjüngung auf einige Zehntelmillimeter gestattet bei verformungsfähigen Werkstoffen relativ grosse Biegewinkel bei geringem Kraftaufwand.</p>
Einteilung	<ul style="list-style-type: none"> • Filmgelenke für häufige Betätigung und kleinen Biegewinkeln • Filmgelenke für seltene Betätigung und grossen Biegewinkeln
Werkstoff	<p>Für Filmgelenke eignen sich Kunststoffe mit hoher Zähigkeit und leichter Verformbarkeit, und bei hohen Biegezahlen ist eine hohe Biegechselfestigkeit erforderlich.</p> <p>Diesen Anforderungen entsprechen vorzugsweise teilkristalline Thermoplaste. Als besonders geeignet hat sich vor allem PP erwiesen, in Frage kommen aber auch PE, POM, PA, PBT, PET u.a..</p> <p>Die Elastomermodifikation des Grundwerkstoffs verbessert die Gelenkeigenschaften, während gefüllte und vor allem faserverstärkte Kunststoffe weniger geeignet sind, da sie eine reduzierte Dehnbarkeit aufweisen.</p>
Herstellung	<p>Filmgelenke werden zusammen mit den zueinander beweglichen Formteilpartien in einem Stück und in einem Werkzeug hergestellt:</p> <ul style="list-style-type: none"> • zumeist durch Spritzgiessen • seltener durch Extrudieren oder Extrusionsblasformen • oder Prägen. <p>Dem Spritzgiessprozess sollte eine Biegung des Filmgelenks nachgeschaltet werden, um den Werkstoff in diesem Bereich zu orientieren, um hierdurch die mechanischen Eigenschaften zu verbessern.</p>

Konstruktion

- Wahl geeigneter Abmessungsverhältnisse
- Vermeiden scharfer Kanten an den Übergängen zur Gelenkkrille.

Ausführungen nach Dahlke:



Spritzgiessgerechte Gestaltung:

Richtlinien Filmscharniere	ungünstig	günstig	Richtlinien Filmscharniere	ungünstig	günstig
Eine Hohlkante am Ende des Filmscharniers vergrößert den Einreißwiderstand			Gebogene Filmscharniere sind nicht möglich		
Scharfe Kanten sind im Bereich des Filmscharniers zu vermeiden			Bei der Werkzeugfüllung darf es im Bereich des Filmscharniers nicht zu Schmelzestillstand, Luft einschließen oder Bindenähten kommen. Es muß daher gleichmäßig durchströmt werden.		
Bei einem Bewegungsbereich von 180° ist gegenüber der Hohlkehle eine Aussparung vorzusehen					

9 Verbindungstechnik Pressverbindungen

Merkmale	<p>Pressverbindungen sind:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Feste Verbindungen • bedingt lösbare Verbindungen • kraftschlüssige Verbindungen in meist rotationssymmetrischer Form. • Die Werkstoffpaarung kann homogen sein, ist aber bei Kunststoffanwendungen üblicherweise heterogen.
Wirkprinzip	<p>Haftreibung, die durch Umsetzung eines Passungs-Überschlusses über aufgezwungene elastische Verformungen in Normalspannungen ausgenutzt werden kann. Sie unterliegen der Relaxation.</p> <p>Die Funktionsfähigkeit einer Pressverbindung beruht einerseits auf der Verformungsfähigkeit und dem elastischen Rückstellvermögen der Kunststoffe, andererseits auf der Haftreibung zwischen den Fügepartnern.</p>
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • einfache und kostengünstige Herstellung, spanend oder im Spritzgiessverfahren, • einfacher und schneller Fügevorgang, gute Automatisierbarkeit, • bei passender Geometrie einfache Demontage der Fügepartner
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • abnehmender Kraftschluss infolge Spannungsrelaxation, • relativ enge Toleranzen
Verbindung Welle/Nabe	<p>Anwendung vorzugsweise in der Feinwerktechnik für die Lagerung von Zahnrädern, Rollen, Kupplungen, Lüfterrädern, Mitnehmern, Stellgliedern usw.</p>
Verbindung Buchse/Gehäuse	<p>Anwendung vorzugsweise im Maschinen-, Apparate- und Werkzeugbau für Radial- und Achsialführungen, beispielsweise als Lagerschalen von Gelenken.</p>
Herstellung	<p>Pressverbindungen mit Kunststoffteilen werden üblicherweise mechanisch gefügt, d.h. durch einen Pressvorgang.</p> <p>Seltener ist das thermische Fügen, bei dem unter Ausnützung der Wärmedehnung die Durchmesser-Differenz überwunden wird. Solche Verbindungen werden auch etwa als Schrumpfverbindungen bezeichnet.</p>
Werkstoff	<p>Grundsätzlich können Pressverbindungen mit praktisch allen Kunststoffen hergestellt werden, welche über ein ausreichend grosses Verformungsvermögen verfügen.</p> <p>Vorzugsweise geeignet sind zähelastische Kunststoffe, welche</p> <ul style="list-style-type: none"> • hohe Steifigkeit • hohe Dehnbarkeit • gutes Rückstellvermögen • geringe Kriechneigung • ausreichende Adhäsion zum Fügepartner (Haftreibung) aufweisen.

Dies trifft besonders auf teilkristalline Thermoplaste zu.

Relevante Kennwerte für Pressverbindungen:

- Elastizitätsmodul: Werkstoffsteifigkeit beim Fügen
- Kriechmodul: Spannungsverlust über Betriebsdauer
- Zulässige Dehnung: Schädigungsfreie Dehnbarkeit der Kunststoffe
- Querkontraktionszahl: Querkontraktionsverhalten der Werkstoffe
- Haftreibung: Reibungsverhältnisse zwischen den Oberflächen der Fügepartner, Belastbarkeit der Pressverbindung
- Wärmedehnzahl: Ausdehnung bei schwankenden thermischen Verhältnissen.

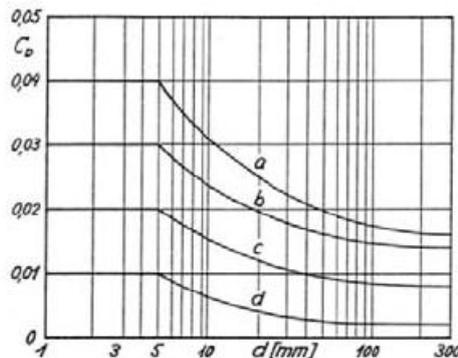
Zulässige
Belastung

Pressverbindungen mit zähen Kunststoffen werden anhand der zulässigen Durchmesser-Differenz Δd (Passungs-Übermass) ausgelegt.

1. Zulässige Durchmesser-Differenz

$$\Delta d_{zul} \approx C_d \cdot d \approx \varepsilon_{zul} \cdot d$$

Größenfaktor C_d für zulässige Durchmesser-Differenz bei Zähen Kunststoffen.



- a: Teilkristalline Thermoplaste geringer Steifigkeit (PE, PP)
- b: Teilkristalline Thermoplaste hoher Steifigkeit (PA, POM, PBT)
- c: Amorphe Thermoplaste, unverstärkt
- d: Thermoplaste, faserverstärkt

2. Sicherheit gegen Bruch; es gilt die Festigkeitsbedingung

Wirkungsweise

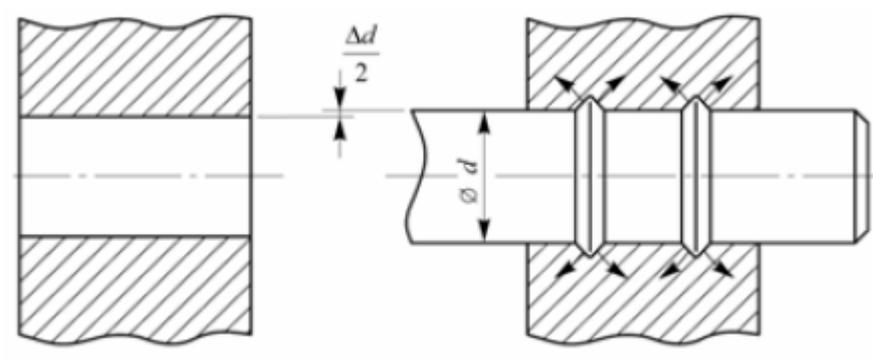
- rein Kraftschlüssig
- teils Formschluss unterstützt

Vorteile Formschlussunterstützung:

- Erhöhung der übertragbaren Kräfte und Momente
- Verlangsamung der Relaxation

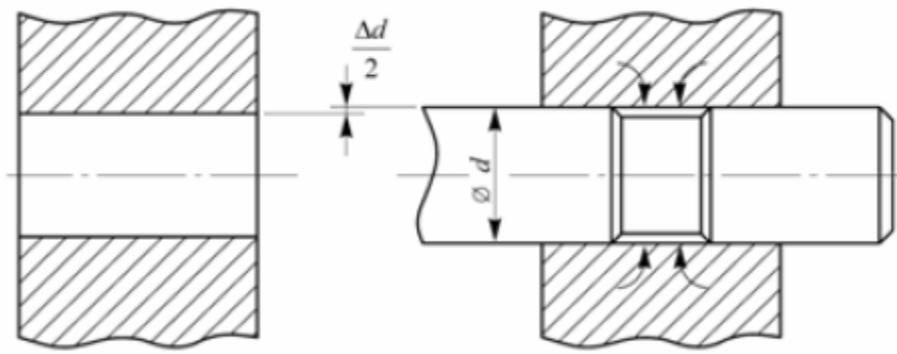
Aktive Formschlussunterstützung

Lokale Verdrängungen von Kunststoffvolumen durch geeignet gestaltete, ausserhalb des Fügedurchmessers liegende, konvexe Formelemente der Welle.



Passive Formschlussunterstützung

Lokales Rückkriechen (Restitution) von verdrängtem Kunststoffvolumen in geeignet gestaltete, innerhalb des Fügedurchmessers liegende, konkave Formelemente der Welle.



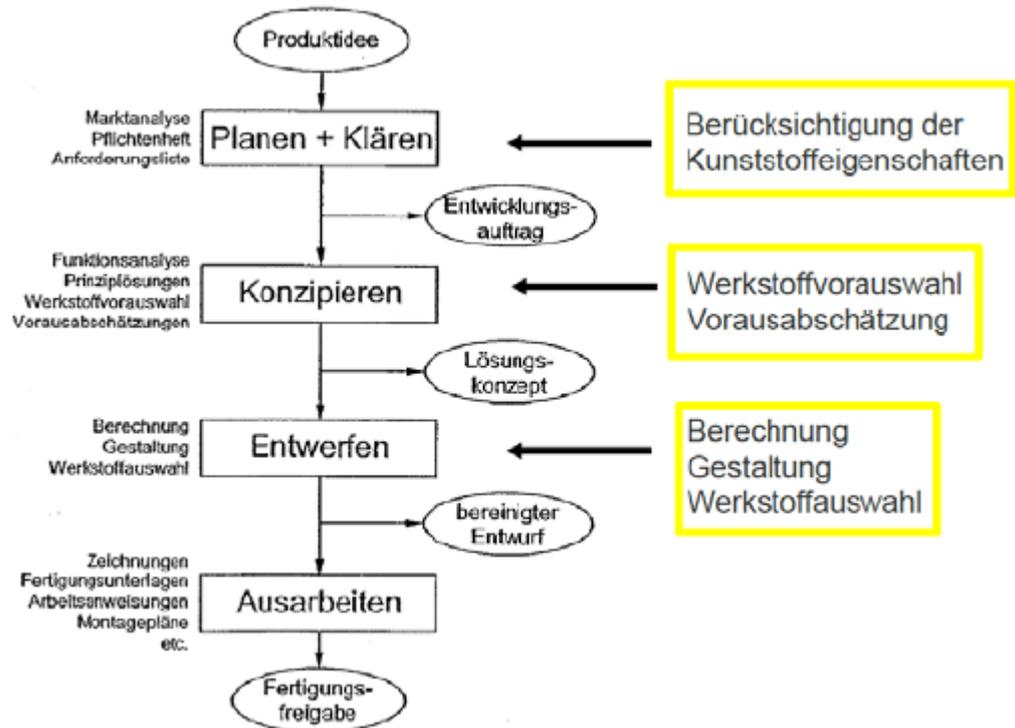
Formschlussunterstützende Massnahmen können konstruktiv so gestaltet werden, dass sie entweder achsial oder azimutal wirken, also zur Verhinderung einer translatorischen oder einer rotatorischen Bewegung zwischen Welle und Nabe, oder auch in beiden gleichzeitig wirken.

Dabei dürfen allerdings folgende Auslegungsaspekte nicht vergessen werden:

- die erforderlichen Fügekräfte nehmen ebenfalls zu,
- die Rändelung ist mit grosser Sorgfalt auszuführen, um einen allfälligen unerwünschten Materialabtrag so gering wie möglich zu halten,
- die Pressverbindung wird durch die Formschlussunterstützung nur noch bedingt lösbar sein, d.h. die Anzahl von Wiederholmontagen ist eng begrenzt wenn nicht Null.

10 Kalkulation von Spritzgiessteilen

Allgemein



Vorgehensweise bei der Angebotserstellung

1. Besprechung mit Projektleiter über Sinn und Zweck des Angebots
2. Studium der zur Verfügung gestellten Unterlagen
3. Überlegungen zur Werkstoffauswahl, Herstellprozess und Make or Buy
4. Zusammenstellung der notwendigen Kosten
5. Besprechung der Ausarbeitung mit Projektleiter

Aspekte bei der Kostenermittlung

1. Werkstoff€ und Zukaufteile
2. Fertigungsprozess
3. Logistik
4. Overhead und ggf. Umlage Entwicklungskosten
5. Gewinn

11 Schadenanalyse an Kunststoffbauteilen

Schadenursachen

1. Fehler in der Produktion

- Werkstoffwahl
- Konstruktion, Auslegung des Bauteils
- Verarbeitung, Formgebung
- Veredlung
- Lagerung, Transport

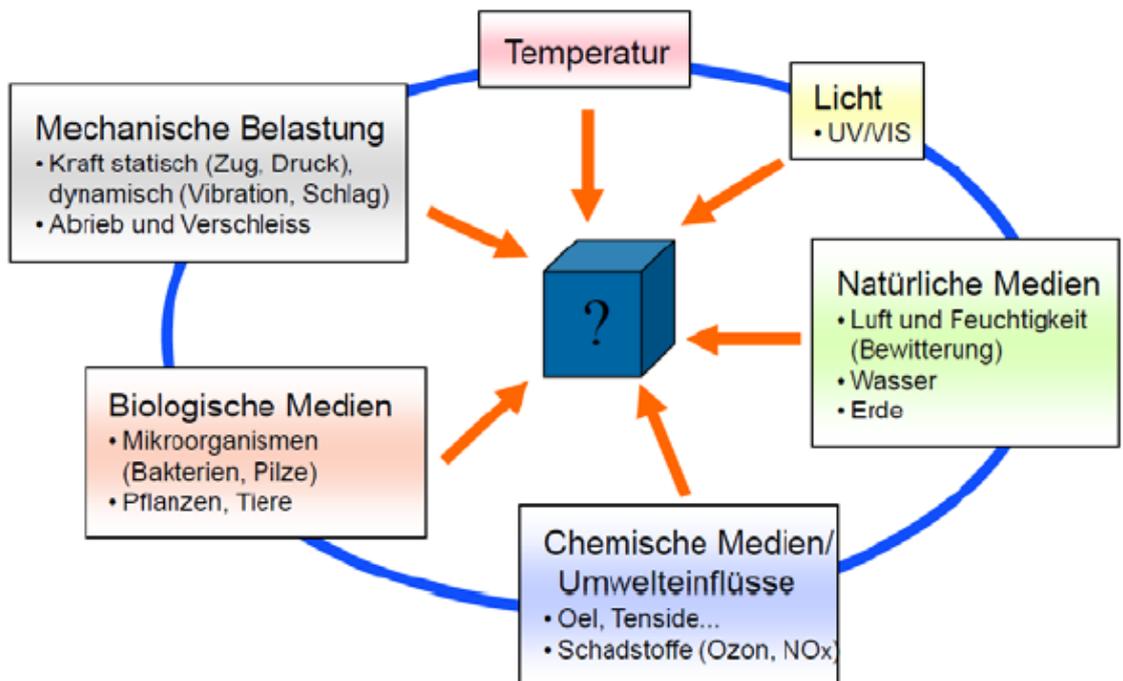
- *vorhersehbar*
- *vermeidbar*
- *optimierbar*

2. Versagen bei der Anwendung

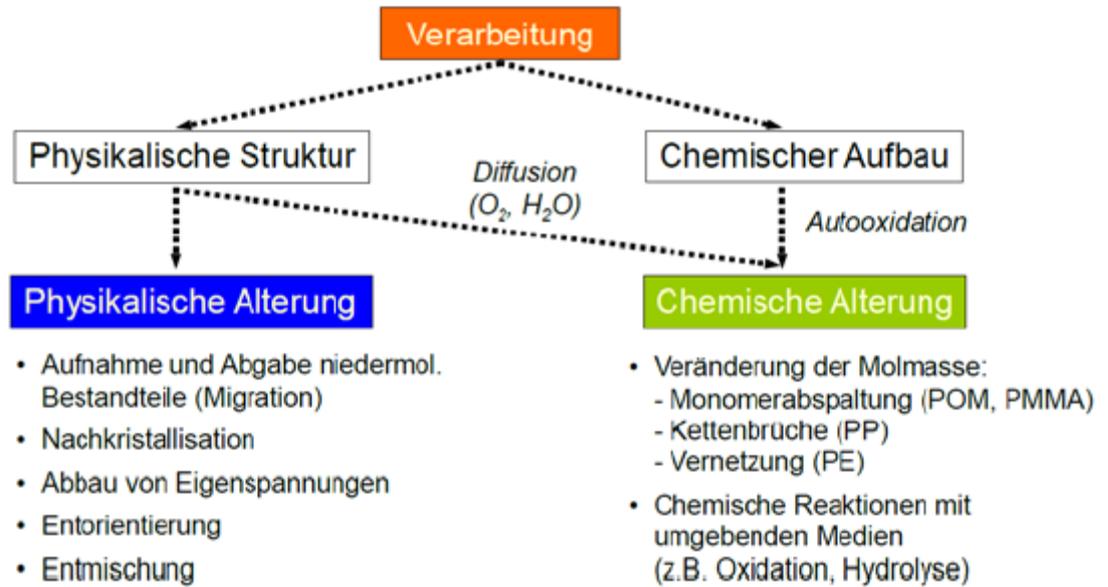
- mechanische Überlastung
- nicht vorgesehene Beanspruchung
- physikalische & chemische Alterung durch Licht, Wärme, Chemikalieneinfluss

- *unvorhersehbar*
- *kaum vermeidbar*
- *nachträglich optimierbar*

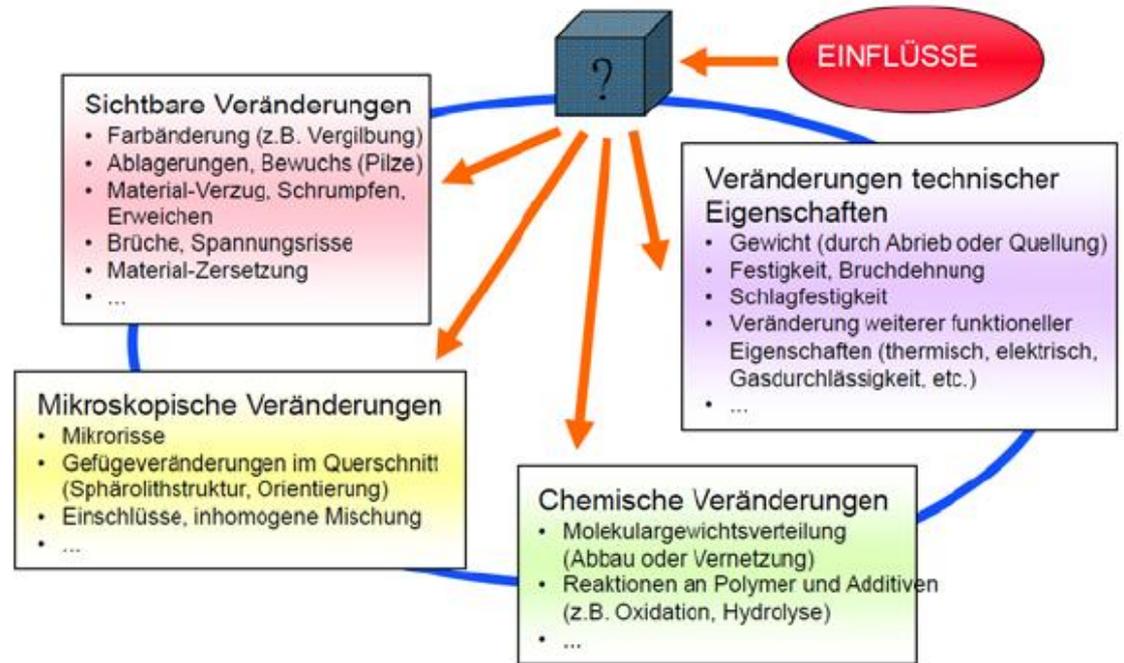
Einflüsse auf Kunststoffbauteile



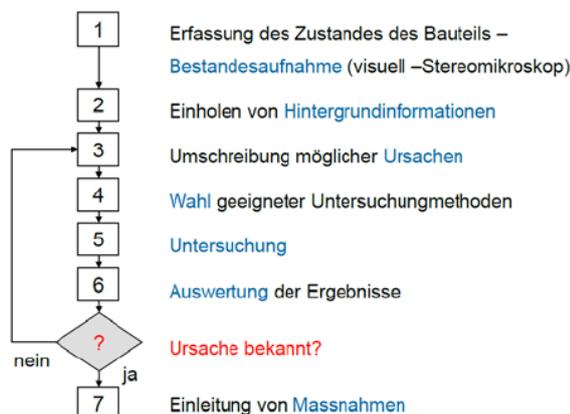
Werkstoffbezogene Alterungsprozesse



Resultierende Veränderung



Vorgehen bei der Fehler- und Schadensanalyse



Weitere Vorgehensart:

1. Gesamtheitliche Betrachtung des Bauteils
2. Betrachtung der Oberfläche
3. Schnitt für die Gefügebetrachtung legen

Auswirkungen durch Schäden

- Imageverlust
- Wirtschaftliche Verluste
- Belasten das Kundenverhältnis

Bedeutung des Rückstellmusters

- Schadenfälle ohne Vergleich mit Rückstellmuster lassen Ursache häufig nur erraten, kaum aber sicher feststellen!
- Rohgranulat und Chemikalien (Additive, Veredlung) sowie nicht eingesetzte Bauteile sind daher oft bei Schadenanalysen von unschätzbarem Wert!

Wo sind Rückstellmuster hilfreich?

- Erkennung von Materialverwechslungen
- Beurteilung von visuellen und mikroskopischen Veränderungen
- Ermittlung des Alterungszustandes

Chemische Analysemethoden

1. Thermoanalyse
 - Dynamisch differenzielle Kalorimetrie DSC
 - Thermogravimetrie TGA
2. Spektrometrie
 - Infrarot-Spektrometrie IR
 - Röntgenfluoreszenzspektrometrie RFA
3. Chromatographie (Trennverfahren)
4. Rasterelektronenmikroskopie REM

Mikroskopische Verfahren

1. Lichtmikroskopie
 - Makroskopie
 - Mikroskopie
2. Elektronenmikroskopie
3. Rasterelektronenmikroskopie

Präparation für die Mikroskopie (Dünnschliff)

Für die Betrachtung des Gefüges mittels Durchlicht müssen die Proben auf ca. 10-30 µm Dicke geschnitten oder geschliffen werden.

Dünnschliffe werden in erster Linie bei verstärkten Kunststoffen durchgeführt (Glas-, C-Faserverstärkt), sowie bei Bauteilen mit Metalleinlegeteilen.

1. Einbetten der Proben mittels kaltaushärtendem Harz (Bsp. Harz Araldit DBF HY 842 Huntsman / Härter REN HY 956 Huntsman)
2. Anschliff bis in die gewünschte Ebene, mit anschliessendem Feinschleifen oder Polieren des Anschliffs
3. Aufkleben der Probe auf einen Objektträger
4. Mittels Sägen und Schleifen den Dünnschliff erstellen

**Präparation
für die Mikro-
skopie (Dünn-
schnitt)**

Dünnschnitte werden für unverstärkte, elastische, leicht gefüllte Kunststoffe eingesetzt.

1. Einbettung der Proben
2. Anschleifen der Probe bis Oberfläche sauber und eben ist.
3. Vorsichtig schneiden, bis gleichmässiger Schnitt entsteht
4. Dünnschnitt vorsichtig auf Objektträger übertragen
5. Dünnschnitt mittels Deckglas und Schnelleinschlussmittel einbetten